

## UNTERSUCHUNGEN ZUR TRAGFÄHIGKEIT VON ROHRKNOTEN FÜR OFFSHORE-WEA MIT TRIPOD-GRÜNDUNG

Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann\*, Dipl.-Ing. Nicolai Cosack\*\*, Dipl.-Ing. Patric Kleineidam\*  
 \*Institut für Stahlbau; Universität Hannover; Germany  
 \*\*Rheine, Germany

### 1. Einleitung

Für die Konstruktion von Offshore-WEA kommen unterschiedliche Konstruktionsformen in Frage. Während bei Wassertiefen bis etwa 15 m bisher sowohl Schwerkraftfundamente als auch so genannte Monopile-Gründungen eingesetzt worden sind, werden für größere Wassertiefen aufgelöste Strukturen wie Tripod- und Jacket-Strukturen diskutiert. Zur Bemessung der Tragfähigkeit der Rohrknoten dieser Verbindungen existieren empirische Bemessungsverfahren, die auf Versuchen bei bestimmten Geometrien beruhen und nur in entsprechenden Parameterbereichen gültig sind. Im Rahmen dieses Beitrages werden die mechanischen Modelle der Bemessungsverfahren kurz erläutert und die Einflüsse auf die Bemessung nach unterschiedlichen Normen untersucht. Da bei den zu erwartenden Abmessungen der Tripod-Gründungen für Offshore-WEA der Anwendungsbereich der Bemessungsansätze verlassen wird, wurde ein FE-Modell entwickelt und validiert, um damit die Einflüsse auf die Tragfähigkeit eines Knotens im erwarteten Abmessungsbereich zu untersuchen. Die vorgestellten Untersuchungen wurden im Rahmen eines BMWi-Forschungsprojektes (Kurzname: GIGAWIND) am Institut für Stahlbau der Universität Hannover durchgeführt.

### 2. Bemessungsverfahren für Hohlprofilverbindungen

Das Tragverhalten von Hohlprofilen ist in den letzten Jahren ausführlich untersucht worden, siehe z.B. [9] und [12]. Dabei wurden aufbauend auf den Ergebnissen von Versuchen und Berechnungen die empirischen Bemessungsverfahren weiterentwickelt.

#### 2.1 Mechanische Modelle

Zur Beschreibung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit werden vor allem zwei unterschiedliche mechanische Modelle diskutiert. Im Ringmodell wird der Gurtstab mit seinen geometrischen Eigenschaften als ebener Ring der wirksamen Breite  $B_e$  idealisiert, der im Sattelpunkt der anschließenden Strebe durch eine Linienlast beansprucht wird. Das Versagenskriterium ist das Plastizieren des Gurtstabes. Die angesetzte wirksame Breite beruht auf der Auswertung von Versuchsergebnissen (siehe [9]). Alternativ wird das so genannte „Punching-Shear-Modell“ verwendet. Hierbei wird eine horizontale Projektion des Strebenanschlusses betrachtet. Die dort angenommene konstante Schubspannungsverteilung im Gurtstab wird der aufnehmbaren Schubspannung des Gurtmaterials gegenübergestellt wird. Zur Anpassung an unterschiedliche

Geometrieverhältnisse werden in Anlehnung an Versuchsergebnisse Beiwerte ermittelt.

#### 2.2 Bemessungsregeln

Für die Bemessung der Verbindungen wurde zunächst das Durchstanzmodell verwendet. Aufbauend auf den Arbeiten von Yura und Sanders, siehe [13] und [10], werden in den neueren Vorschriften meist zulässige Schnittgrößen für die anschließenden Stäbe (Normalkraft, Biegung in und aus der Anschlussebene) ermittelt.

Die Bemessungsgleichungen für die zulässigen Schnittgrößen können in allgemeiner Form nach Gl. 1 dargestellt werden. Der Beiwert  $Q_g$  beinhaltet die Einflüsse aus der Geometrie, mit dem Beiwert  $Q_u$  wird die Spannung im Gurtstab berücksichtigt. Die Parameter  $t_0$  und  $\theta$  können Abb. 1 entnommen werden,  $f_y$  ist die Streckgrenze des Materials.

$$N_r = Q_g \cdot Q_u \cdot \frac{f_y \cdot t_0^2}{\sin \theta} \quad \text{Gl. 1}$$

Die Gleichungen für  $Q_g$  und  $Q_u$  sind für einige der hier betrachteten Vorschriften in [5] zusammengestellt. Hohlprofilknoten werden bei der Betrachtung eines ebenen Anschlusses in Abhängigkeit des Kraftverlaufes in der Verbindung in Y-, X- und K-Knoten unterschieden (siehe z.B. [1]), diese Unterscheidung wirkt sich auf die Parameter aus. Die unterschiedlichen Vorschriften geben für die Knotenparameter nach Abb. 1 weitgehend übereinstimmend die Zulässigkeitsbereiche an (vgl. auch [5]):

$$0,2 < \beta < 1,0$$

$$10 < \gamma < 50 \quad (25 \text{ bzw. } 20 \text{ nach EC 3})$$

$$30^\circ < \theta < 90^\circ$$

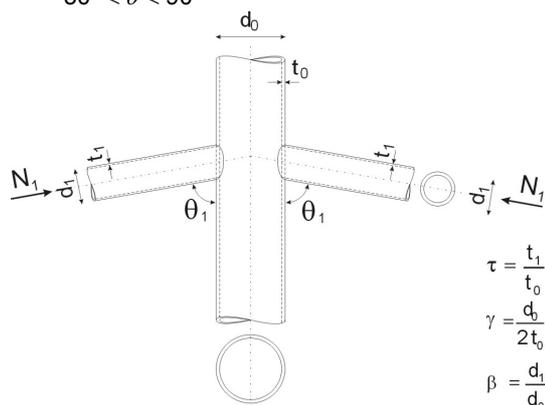


Abb. 1: Ebener X-Knoten, Knotenparameter

Die verschiedenen Versagenszustände werden in den Vorschriften durch halbempirische Abminderungsfaktoren berücksichtigt, die auf der Auswertung von Versuchen beruhen. Die in Anspruch genommenen plastischen Querschnittstragfähigkeiten sind von der Schlankheit des Querschnitts

abhängig, daher ist die Übertragung der Ergebnisse auf andere Schlankheiten in Frage zu stellen. Dies findet sich in der Begrenzung des Wertes  $\gamma$  wieder. Für einen X-Knoten nach Abb. 1 wurden beispielhaft die Normalkrafttragfähigkeiten nach unterschiedlichen Normen ermittelt und in Abb. 2, als dimensionslose Größe (nach [12]), bezogen auf ein vergleichbares Sicherheitsniveau, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Werte in einem weiten Bereich von  $\beta$  nur gering voneinander abweichen und mit steigendem  $\beta$  überlinear ansteigen. Das bedeutet, dass bei konstantem Füllstabdurchmesser die Tragfähigkeit mit abnehmendem Gurtstabdurchmesser zunimmt. Größere Abweichungen treten nur für  $\beta < 0,30$  auf. Besonders fällt hier auf, dass die Werte des Eurocodes deutlich über den anderen Werten liegen. Dies kann mit der strengeren Anforderung an den Wert  $\gamma$  erklärt werden, der zu kompakteren Querschnitten führt, da bei kleinen Werten von  $\beta$  eher mit lokalen Versagen zu rechnen ist.

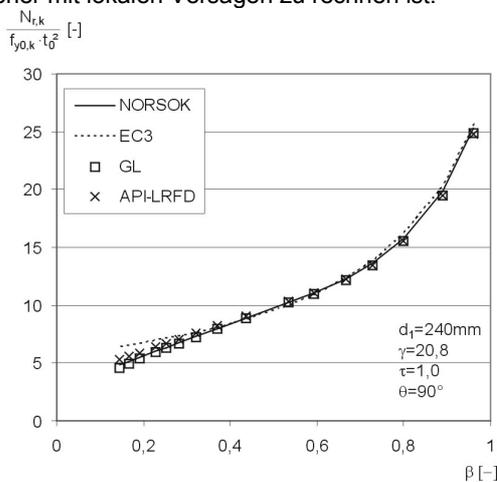


Abb. 2: Bez. Normalkrafttragfähigkeiten ebener X-Knoten, Normenvergleich in Abhängigkeit des Knotenparameters  $\beta$ ,

### 3. Numerische Untersuchungen

Vor dem Hintergrund momentan diskutierter Abmessungen von Offshore-WEA mit Tripod-Tragstruktur, kann erwartet werden, dass die Knotenparameter an der Grenze des zulässigen Bereiches bzw. außerhalb davon liegen. Weiterhin gelten die Formeln zunächst nur für ebene und nicht für räumliche Knoten, wie sie bei einer Tripod-Struktur vorliegen. Für die Berücksichtigung räumlicher Belastungssituationen können nur für bestimmte Bedingungen Erhöhungs- bzw. Abminderungsfaktoren ermittelt werden. Die Situation einer überwiegenden Biegemomentenbeanspruchung des Tripods aus der WEA kann nicht erfasst werden. Aus diesen Gründen wurden numerische Analysen durchgeführt.

#### 3.1 Validierung des Modells

Um die verwendeten Modellierungsansätze zu validieren, wurden Vergleichsrechnungen zur Ermittlung der Tragfähigkeiten von Rohrknoten durchgeführt, für die in [12] und [11] Ergebnisse von

Versuchen und FE-Berechnungen angegeben sind. Insbesondere werden dort nicht nur ebene sondern auch räumliche Knoten untersucht. Damit bilden diese Daten eine gute Vergleichsgrundlage für die hier betrachteten Tripod-Knoten. Anschließend werden die Modellierungen auf Knoten übertragen, die sich an den zu erwartenden Abmessungen von Tripod-Knoten von Offshore-WEA orientieren.

#### 3.1.1 Modellierung X-Knoten

Die numerischen Untersuchungen wurden mit dem FE-Programmsystem ANSYS® 6.0 durchgeführt. Die Modellierung der Struktur erfolgte mit 4-Knoten Schalenelementen (6 Freiheitsgrade pro Knoten) mit linearen Ansatzfunktionen (Elementtyp SHELL 143). Im Hinblick auf den späteren Vergleich mit Normenwerten wurden die vorgestellten Berechnungen mit einem linear-elastisch – idealplastischem Materialgesetz durchgeführt. Als Fließgrenze werden die in der Literatur angegebenen Werte der Probekörper verwendet. Die Berechnungen werden unter der Berücksichtigung geometrischer Nichtlinearitäten durchgeführt. Das Modell mit Belastung ist in Abb. 3 dargestellt.

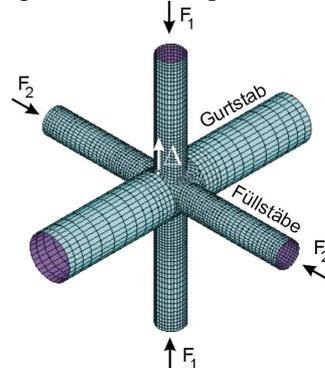


Abb. 3: FE-Modell des untersuchten X-Knotens

#### 3.1.2 Versagenskriterium

Die FE-Berechnungen werden verschiebungssteuert durchgeführt. Bei Druckbeanspruchungen besitzt der Last-Verformungspfad für die Füllstäbe ein Maximum nach dessen Erreichen bei geringeren Lasten noch weitere Verformungen aufgenommen werden können. Die Tragfähigkeit wird neben dieser maximalen Last zusätzlich durch das Erreichen zulässiger Verformungen begrenzt. Die in Übereinstimmung mit [12] angesetzte Grenze beruht auf einer Festlegung nach [13] und gibt die maximale Verschiebung  $\Delta$  in Füllstabrichtung nach Gl. 5 an (siehe Abb. 3). Diese Grenze ist dort für typische Offshore-Konstruktionen entwickelt worden und soll eine übermäßige Verformung des Knotens verhindern, die die Tragfähigkeit der Gesamtkonstruktion beeinflussen könnte.

$$\Delta = \frac{60 \cdot f_y \cdot d_i}{E} \quad \text{Gl. 5}$$

#### 3.1.3 Ergebnisse X-Knoten

In Tab. 3 sind die Parametersätze für die hier vorgestellten Berechnungen zusammengestellt. Neben den allgemeinen Knotenparametern nach Abb. 1 ist die Zahl N der am Gurt angreifen Füllstäbe angegeben, sowie gegebenenfalls die Anzahl  $n_2$  der

Stäbe, die mit der Last  $F_2$  (vgl. Abb. 3) beansprucht werden. Die Knoten K1 bis K4 entsprechen den Dimensionen und Lasten, für die in [12] Ergebnisse vorliegen. Repräsentativ für den Parameterbereich der Tripod-Knoten werden die Ergebnisse der Knoten K5 und K6 dargestellt.

	$\beta$ [-]	$\gamma$ [-]	$\tau$ [-]	$\theta$ [°]	$N(n_1/n_2)$ [-]	$F_2/F_{1u}$ [-]
K1	0,6	20	1	90	2(2/0)	-
K2	0,6	20	1	90	4(2/2)	0
K3	0,6	20,43	1	90	4(2/2)	0,6
K4	0,6	20	1	45	2(2/0)	-
K5	0,28	73	0,5	90	2(2/0)	-
K6	0,28	73	0,5	45	2(2/0)	-

Tab. 2: Untersuchte Parameter der Knotenverbindung

Die dimensionslosen Knoten Tragfähigkeiten für K1 bis K3 stimmen, wie in Abb. 4 zu sehen, gut mit den in [12] und [11] dargestellten Ergebnissen überein, so dass die Modellierung und Belastung als verifiziert angesehen werden kann. Nach den Vorschriften ergeben sich bei Auswertung auf dem charakteristischen Niveau durchweg geringere Tragfähigkeiten. Zum Einfluss der aussteifenden Wirkung nicht belasteter Füllstäbe, wie z.B. bei K2 festzustellen, werden dort keine Angaben gemacht. Die Vergrößerung der Tragfähigkeit durch räumliche Beanspruchung (wie bei K3) bzw. durch einen Anschlusswinkel  $\theta = 45^\circ$  (wie bei K4) wird in den Berechnungen im Vergleich zu den Vorschriften höher ermittelt. Bei der Übertragung auf die Tripod-Abmessungen begrenzt die maximale Verformung die Tragfähigkeit (in Abb. 4 mit Yura gekennzeichnet). Hier wirkt sich der größere Wert für  $\gamma$  aus. Die Tragfähigkeiten liegen oberhalb der Werte, die sich nach den Vorschriften ergeben, wenn auch zum Teil nur gering (z.B. K5 in Abb. 4). Für eine Abschätzung der Tragfähigkeiten sind die Vorschriften im untersuchten Bereich daher geeignet.

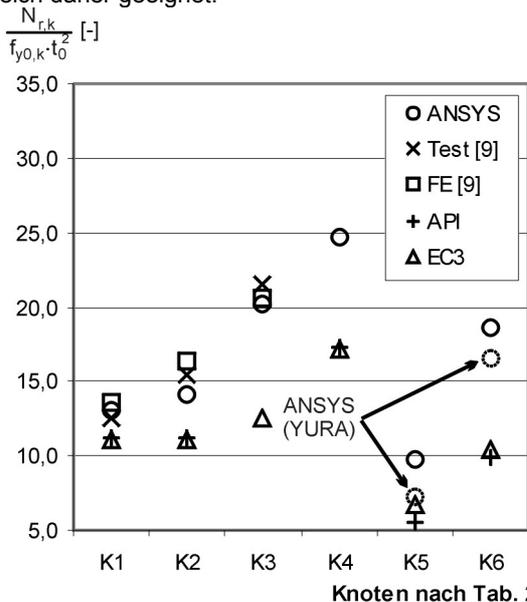


Abb. 4: Normalkrafttragfähigkeit der untersuchten Knoten nach Tab. 2; Vergleich FE, Normen, Test

### 3.2 Tripod-Knoten

Die an den Knotenuntersuchungen gewonnenen Erkenntnisse werden auf die Anwendung für Tripod-Gründungen übertragen. Die hier vorgestellten Untersuchungen orientieren sich an Abmessungen von Tripod-Gründungen, die für Offshore-WEA der Leistungsklasse um 4,5 MW und bei 30 m Wassertiefe erwartet werden und beziehen sich auf den oberen Knoten (siehe Abb. 5). Die in der Untersuchung konstant gehaltenen Abmessungen sind in Abb. 5 dargestellt. Die weiteren Abmessungen können für die hier vorgestellten Untersuchungen aus Tab. 3 abgeleitet werden. Das Modell 2 weist im Bereich des Knotens einen konischen Turmabschnitt auf. Der Parameter  $\beta$  und die unten angegebenen Tragfähigkeiten nach den Vorschriften wurden mit dem gemittelten Turmdurchmesser bestimmt.

	$\beta$	$\gamma$	$\tau$	$\theta$
T1	0,276	72,5	0,7	45,0°
T2	0,276	72,5	0,7	53,5°
T3	0,250	80,0	0,7	45,0°
T4	0,308	65,0	0,7	45,0°
T5	0,308	49,2	0,5	45,0°

Tab. 3: Untersuchte Tripod-Knotenparameter

#### 3.2.1 Modellierung

Das Tripod-Modell (siehe Abb. 5) ist wie die in Abschn. 2.2 beschriebenen Knotenmodelle aus SHELL 143-Schalenelementen aufgebaut, mit einer Elemententeilung, die sich an den Knotenmodellen orientiert. Ein Tripod-Modell besteht aus circa 27500 Elementen.

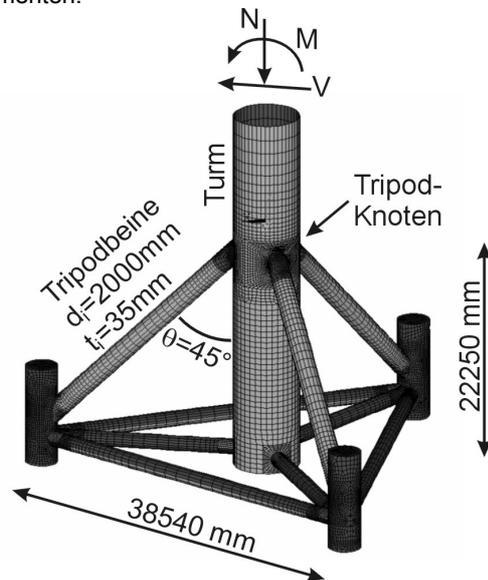


Abb. 5: Tripodmodell, Abmessungen und Lasten

Die Materialeigenschaften wurden mit den charakteristischen Werten berücksichtigt. Für das Material wurden ein Elastizitätsmodul von 210000 N/mm<sup>2</sup> und eine aufgrund der Blechdicken in Anlehnung an DIN 18800 auf 325 N/mm<sup>2</sup> abgeminderte Streckgrenze angesetzt. Alle nachfolgend dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Annahme eines bilinearen Materialverhaltens, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass die Ergebnisse durch eine Berücksichtigung von Verfestigungseffekten nur gering beeinflusst werden.

Eine Parameterstudie hat gezeigt, dass sich die Lagerungsbedingungen der Fußpunkte auf die Tragfähigkeit des Tripodknotens kaum auswirken. In den durchgeführten Berechnungen wurden die Fußpunkte daher als starr eingespannt angenommen.

### 3.2.2 Berechnung Tripod-Knoten

Die Belastung des Modells erfolgt in zwei Schritten: Zuerst wird eine Vertikalkraft aufgebracht, die der Eigenlast von Turm und Gondel mit Rotor entspricht. Im zweiten Lastschritt folgen wind- und welleninduzierte Momente und Querkräfte. Diese Kräfte sind so ausgerichtet, dass das dominierende Biegemoment maximale Druckkräfte in einem der Tripod-Beine hervorruft. Diese zusätzlichen Kräfte werden so weit gesteigert, bis die Tragfähigkeit des Tripod-Knotens erreicht ist. Als Versagenskriterium wird das Überschreiten der aufnehmbaren Kräfte verwendet. Die zulässigen Verformungen nach Yura und die kritischen Dehnungen nach [8] wurden im untersuchten Parameterbereich nicht überschritten.

### 3.2.3 Ergebnisse Tripod-Modelle

Die Tragfähigkeiten der Modelle sind in Tab. 4 durch die aufnehmbaren Momente bis zum Versagen im Turm als maßgebende Belastungsgröße charakterisiert. Die zugehörige dimensionslose Normalkraft im höchstbeanspruchten Füllstab wird im Vergleich zu den Tragfähigkeiten nach [1] bei Annahme eines ebenen X- bzw. Y-Knotens aufgeführt.

	$\frac{M_{\text{Turm},j}}{M_{\text{Turm},1}}$	$\frac{\sigma_{\text{el},j}}{\sigma_{\text{el},1}}$	$N_{r,k}(\text{Ansys})$ $f_{y0,k} \cdot t_0^2$	$N_{r,k}(\text{API-X})$ $f_{y0,k} \cdot t_0^2$	$N_{r,k}(\text{API-Y})$ $f_{y0,k} \cdot t_0^2$
T1	1,00	1,00	12,8	9,4	11,6
T2	0,84	0,88	11,9	8,4	10,4
T3	0,90	0,77	12,0	9,1	11,2
T4	1,10	1,43	13,6	9,6	12,0
T5	2,20	2,20	11,8	9,1	12,3

Tab. 4: Vergleich aufnehmbarer Turmmomente der Tripod-Modelle; Querschnittsausnutzung im Turm und Normalkrafttragfähigkeiten (mit Vergleich API)

Im Hinblick auf die aufnehmbaren Biegemomente im Turm unterscheiden sich die Modelle T1 bis T4 wenig. Sie spiegeln die z.B. bei [2] beschriebenen Einflüsse der Knotenparameter wider: Eine Vergrößerung des Anschlusswinkels führt ebenso wie ein kleineres Verhältnis  $\beta$  zu geringeren Tragfähigkeiten. Eine Vergrößerung von  $\beta$  und eine damit verbundene Reduzierung von  $\gamma$  wirken sich dagegen genau wie ein kleineres  $\tau$  positiv auf die Belastbarkeit der Struktur aus. Insbesondere können die Querschnitte der Modelle T4 und T5 besser ausgenutzt werden, wie der Vergleich der maximalen Normalspannungen im Turm unter Annahme einer linearen Spannungsverteilung in Tab. 4 zeigt.

Die numerisch ermittelten Tragfähigkeiten der Modelle T1 bis T4 liegen etwas oberhalb der Werte nach den Vorschriften für Y-Knoten. Für Modell T5 wird eine etwas geringere Tragfähigkeit ermittelt. Die Werte für X-Knoten liegen durchgehend unter denen der Y-Knoten und den FE-Ergebnissen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Ovalisierung des Querschnittes bei X-Knoten gegenüber Y-Knoten verstärkt wird. Bei einem Tripod-Knoten mit drei angreifenden Füllstäben wird bei einer allseitigen

Druckbeanspruchung die Verformung behindert, dies führt zu einer Vergrößerung der Tragfähigkeit. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit geht in den untersuchten Modellen die Druckbeanspruchung in den der Biegedruckseite abgewandten Tripod-Beinen deutlich zurück. Der Knoten verformt sich ähnlich wie ein ebener Y-Knoten. Damit können die korrespondierenden Tragfähigkeiten begründet werden.

## 4. Zusammenfassung

Die Tragfähigkeiten von stählernen Rohrknoten lassen sich in ebenen Anschlüssen mit Hilfe der Bemessungsregeln nach den unterschiedlichen Vorschriften gut bestimmen. Der Parameterbereich für diese empirischen Ansätze ist begrenzt, da sie auf Versuchen beruhen. Mit einem anhand von Versuchsergebnissen validierten FE-Modell wurden Tragfähigkeiten für ebene Knoten bestimmt, die den zulässigen Parameterbereich verlassen. Im untersuchten Bereich liefern die empirischen Formeln konservative Tragfähigkeiten.

An einem FE-Modell einer Tripod-Gründungen wurden die Auswirkungen der speziellen räumlichen Beanspruchungsverhältnisse untersucht. Bei Annahme eines Y-Anschlusses konnte die Tragfähigkeit des Knotens im untersuchten Bereich gut vorausgesagt werden.

## Dank

Einen wesentlichen Beitrag zu den durchgeführten Untersuchungen hat Frau cand.-ing. Judith Ullrich im Rahmen der Bearbeitung ihrer Diplomarbeit geleistet.

## 5. Literatur

- [1] API RP 2A-LRFD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Load and Resistance Factor Design. October 1993.
- [2] Dutta, D.: Hohlprofil-Konstruktionen. Berlin: Ernst & Sohn 1999.
- [3] ENV 1993-1-1:1992/A1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Anhang K. Dez. 1994
- [4] Germanischer Lloyd [Hrsg.]: Regulations for the Certification of Offshore Wind Energy Conversion Systems. 1995.
- [5] HSE [Hrsg.]: Comparison of tubular joint strength provisions in codes and standards. OTO 2001/082, 2002.
- [6] Marshall, P.W.: Design of welded tubular connections. Amsterdam: Elsevier 1992.
- [7] N-004, Design of Steel Structures. NORSOK Standard December 1998.
- [8] Peschmann, J.; Kulzep A.; Lehmann, E.: Strukturverhalten von Doppelhüllenschiffen bei Kollision und Grundberührungen. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft, Bd 95, Berlin: Springer 2001.
- [9] Puthli, R.: Hohlprofilkonstruktionen aus Stahl. Düsseldorf: Werner, 1998.
- [10] Sanders, D. H.; Yura, U.: Strength of Double-Tee Tubular Joints in Tension. Proceedings Offshore Technology Conference 1987, Vol. 2, OTC 5437.
- [11] Vegte, G.J. van der et al.: The static Strength and Stiffness of Multiplanar Tubular Steel X-Joints. International Journal Offshore and Polar Eng., IJOPE, Vol.1 (1991), Nr.1, S. 42-52.
- [12] Vegte, G.J. van der: The static behaviour of axially loaded uniplanar and multiplanar tubular X-joints. Delft: Delft Univ. of Technology, 1994.
- [13] Yura, J. A. Zettlemyer, N., Edwards I.F.: Ultimate Capacity Equations for Tubular Joints. Proceedings Offshore Technology Conference 1980, OTC 3690.