



Forschung für die Praxis P 633

Detaillösungen bei Ermüdungsfragen und dem Einsatz hochfester Stähle bei Offshore Windenergieanlagen

Detailed solutions regarding fatigue and the use of high strength steels in offshore wind energy converters



**Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.
im Stahl-Zentrum**

Inhaltsverzeichnis (Table of contents)

1	<u>Einleitung (Introduction)</u>	1
1.1	Anlass (Motivation)	1
1.2	Zielsetzung (Aims)	2
2	<u>Stand der Technik (State of the art)</u>	3
2.1	Entwicklungsstand vor Projektbeginn (State of Development at Project Commencement)	3
2.2	Entwicklung während der Projektlaufzeit (Developments during the project)	8
3	<u>Innovativer Entwurf eines Tripods (Innovative design of a tripod)</u>	10
3.1	Einleitung (Introduction)	10
3.2	Berechnung der Tripod-Gründungsstruktur als Gesamtsystem mit Stabwerksprogramm (Design of the Tripod Base Structure as a complete system using a Framework Program)	13
3.3	Übertragung der Stabendschnittgrößen und Randbedingungen für einen Bauteilausschnitt auf das FE-Modell (Transfer of Member End Forces and Boundary Condition to an FE Model of the Node)	15
3.4	Berechnung des FE-Modells und Analyse der Spannungskonzentration (FE Analyses and Determining the Stress Concentrations)	16
3.5	Vergleich des Tripod-Knotens einer 3MW- und einer 5MW-Anlage (Comparison of Tripod Nodes for a 3MW and 5MW Converter)	17
3.6	Innovatives Knotendesign (Innovative Node Design)	19
4	<u>Detaillösungen (Detail Solutions)</u>	22
4.1	Einleitung (Introduction)	22
4.2	Festlegung der kritischen Punkte und detaillierte Modellierung der kritischen Bereiche mit FE (Establishing the Critical Points and Detailed Modelling of the Critical Areas with FE)	23
4.3	Ermüdungsversuche an Ausschnitten eines Knotens (Fatigue Tests on Cut-outs of a Tripod)	25
4.3.1	Vorüberlegungen (Considerations)	25
4.3.2	Herstellung der Probekörper (Fabrication of the Test Specimens)	26
4.3.3	Versuchsaufbau und -durchführung (Test Arrangement and Performance)	28
4.3.4	Versuchsergebnisse (Test Results)	29
4.3.5	Bewertung der Ergebnisse (Evaluation of the Results)	31

4.3.6	Übertragung auf den oberen Zentralknoten des Tripods (Transfer to the Upper Central Node of the Tripod)	31
4.4	Anwendung vorhandener Bemessungskonzepte (Application of Existing Design Concepts)	31
4.4.1	Nennspannungskonzept (Method of Nominal Stress Range)	31
4.4.2	Strukturspannungskonzept (Method of Stress Range for Geometrical (Hot Spot) Stress)	32
5	Restnutzungsdauer - Lebensdauer (Remaining service life-durability)	37
5.1	Allgemeines (General)	37
5.2	Schweißnahtnachbehandlungsmethoden (Weld Improvement Methods)	38
5.2.1	Allgemeines (General)	38
5.2.2	Hochfrequente Hämmerverfahren (High Frequency Peening Methods)	43
5.3	Experimentelle Untersuchungen (Experimental Investigations)	44
5.3.1	Untersuchungen an Ringflanschdetails (Investigations on ring flange details)	44
5.3.2	Untersuchungen an Stumpfnähten und Quersteifen (t=30mm) (Experimental investigations on butt welds and transverse stiffeners (t=30mm))	51
5.4	Zusammenfassung (Conclusions)	59
6	Korrosionsschutz (Corrosion protection)	60
6.1	Einleitung (Introduction)	60
6.1.1	Interaktion zwischen Beschichtung und kathodischem Korrosionsschutz (zu a) (Interaction between Coating System and cathodic Protection System (re a))	62
6.1.2	Bewertung des Abrostungszuschlages von 0,3 mm pro Jahr (zu b) (Evaluation of the Corrosion Allowance 0.3 mm per Year (re b))	63
6.1.3	Korrosionsverhalten im Innenraum (abgeschlossenes System) (zu c) (Corrosion Process Interior (Capsuled System) (re c))	63
6.1.4	Rissbildung im Stahl unterhalb des Beschichtungssystems (zu d) (Cracking of the Steel beneath the Coating System)	64
6.2	Korrosionsabrostungsraten und Korrosionszuschläge Corrosion Rate and Corrosion Allowance	65
6.3	Rissbildung von Stahl unterhalb der Beschichtung (Cracking of the Steel beneath the Coating System)	67
6.3.1	Der Riss im Stahl (The Crack in the Steel)	67
6.3.2	Beschichtungssysteme (Coating Systems)	67

Inhaltsverzeichnis

6.3.3	Interaktionsmöglichkeiten Beschichtung – Stahl (The Possibilities of Interaction Coating System – Steel)	68
6.3.4	Verhalten der Beschichtungssysteme bei Rissbildungen im Stahl (Behaviour of Coating System at Cracking of Steel)	68
6.3.5	Risserkennung (Detecting Cracks)	72
6.3.6	Gegenstand weiterer Forschungen: Verhalten von unterschiedlichen Beschichtungssystemen unter zyklischen Beanspruchungen (Further Research: Behaviour of Coating Systems under cycle Loads)	73
6.4	Zusammenfassung (Summary)	74
7	<u>Zusammenfassung (Conclusions)</u>	75
8	<u>Ausblick (Future Trends)</u>	77
8.1	Weitere Entwicklung der Offshore-Windenergie (Further development of offshore wind energy)	77
8.2	Mögliche zukünftige Forschungsschwerpunkte (Possible topics for further research)	80
9	<u>Literaturverzeichnis (References)</u>	82

Verzeichnis der Anhänge (List of Annexes)

ANHANG A Detaillösungen (Detail Solutions)

ANHANG B Restnutzungsdauer (Remaining Service Life)

ANHANG C Korrosionsschutz (Corrosion Protection)