



HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT DRESDEN

Fakultät: Bauingenieurwesen/Architektur

Studiengang: Bauingenieurwesen M.Sc.

Lehrgebiet: Stahlbau

MASTERARBEIT

Bemessungsverfahren und Sicherheitsstandards für Tragwerke von Windenergieanlagen im Offshorebereich

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. C. Wolf

Bearbeitungszeitraum: Wintersemester 2010

Frank Heitmann

geb. 02.04.1983

in Görlitz

Bildungsweg

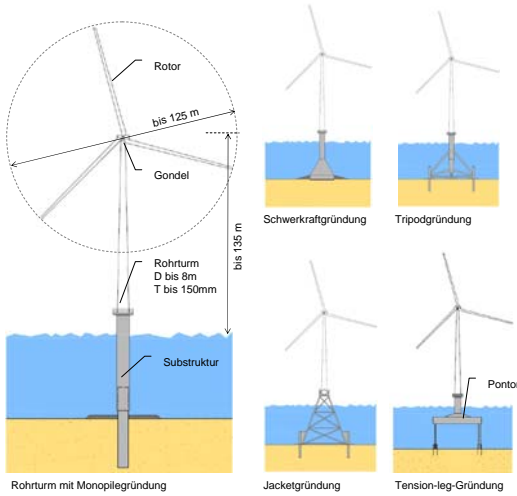
- 1989-1991 Deutsche Schule Stockholm
- 1991-1993 Grundschule Horka (OL)
- 1993-1996 Städtisches Gymnasium Rothenburg
- 1996-1999 Städtisches Gymnasium Niesky
- 1999-2002 Ausbildung zum „Maurer mit Fachhochschulreife“ in Chemnitz
- 2002-2003 Zivildienstleistender, Martinshof Rothenburg
- 2003-2007 Studium des Bauingenieurwesens an der HTW-Dresden (FH)
- 2007-2010 Postgraduales Masterstudium an der HTW-Dresden (FH)



Aufgabenstellung:

Entsprechend Thema sollten die wesentlichen Tragstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen in Stahlbauweise dargestellt, und die wesentlichen Nachweise für deren Bemessung identifiziert werden. Des Weiteren waren die relevanten Regelwerke darzustellen und deren Bemessungsverfahren zu vergleichen. Die Gleichwertigkeit der ggf. verschiedenen Verfahren und Sicherheitsniveaus war anhand von exemplarischen Detailnachweisen zu überprüfen.

Wesentliche Tragstrukturen



Planstand für deutsche Nord- und Ostsee



Fertiggestellte Offshore-Windparks bis 12/2009, weltweit

Parkname	Land	Anlagenzahl	In Betrieb seit	Turbinenhersteller/Typ	Turbinenleistung (MW)	Mittlere Klasse	Mittlere Wassertiefe (m)	Mittlere Wassertiefe (m)	Gründung	Lage
Vindby	Dänemark	11	1991	AN Bonus 450/25	0,45	2	3,8		Schwerekraft	Östsee
Lely	Niederlande	4	1994	Waldhof 40	0,5	2,8	4,5		Monopile	Nordsee
Tux Kibb	Dänemark	10	1995	Vestas V90/50	0,5	4	4,0		Schwerekraft	Östsee
Bockbreen	Schweden	5	1998	Vestas V90/20	0,55	4	6,0		Monopile	Östsee
Ugruviken	Schweden	7	2000	Vestas V90/20	0,55	1,5	12	8,5	Monopile	Östsee
Blyth	UK	2	2000	Vestas V90/43	2	1	5,5		Monopile	Nordsee
Møllegaard	Dänemark	20	2001	AN Bonus 2MW/25	2	2,8	4		Schwerekraft	Östsee
Vito Svangard	Schweden	5	2001	MIG Micon MM 2005/2	2	5	8		Monopile	Östsee
Horns Rev	Dänemark	80	2002	AN Bonus	2	17	10		Monopile	Nordsee
Tanes	Dänemark	10	2003	AN Bonus	2,3	3,5	15		Monopile	Östsee
Nysted	Dänemark	72	2003	Siemens SWT 2.3 MW	2,3	9	8		Schwerekraft	Östsee
Aldem Bank	UK	7	2003	GE 1.5	3,8	8,5	5		Monopile	Ästsee
North Hoyle	UK	30	2003	Vestas V90/2.0	2	7,5	12		Monopile	Ästsee
Sandby Sands	UK	30	2004	Vestas V90/2.0	2	2,3	12		Monopile	Nordsee
Camfry Head	UK	30	2005	Vestas V90/2.0	3	9	5		Monopile	Nordsee
Barnes	UK	30	2006	Vestas V90/2.0	3	7	17,5		Monopile	Ästsee
Øst Sydland Sea Star	Niederlande	36	2006	Rijswater SW	3	14	18		Monopile	Nordsee
Moby Earth Beatrice	UK	2	2007	Rijswater SW	3	25	45		Jack-up	Nordsee
Blyth Liverpool Bay	UK	25	2007	Siemens 3.0MW/10/2	3,8	10	4,5		Monopile	Ästsee
Lilgrund	Schweden	48	2007	Siemens 2.3MW/9/2	2,3	10	10		Schwerekraft	Östsee
Landing Bay	China	1	2007	Goldwind 10.5	1,5	10	20		Jack-up	Pazifik
Q1-101	Dänemark	60	2008	Vestas V90/2.0	2	29	21,5		Monopile	Nordsee
Thyborøn Bank phase 1	Belgien	6	2008	Rijswater SW	3	28,5	20		Schwerekraft	Nordsee
Wier Oostwing	UK	27	2008	Siemens 3.0MW/10/2	3,8	5,2	10		Monopile	Nordsee
Lynn	UK	27	2008	Siemens 3.0MW/10/2	3,8	5,2	10		Monopile	Nordsee
Shanghai, Donghai Bridge	China	8	2009	Siemens 3.0MW/10/2	3	2,5	10		Monopile	Pazifik
Rubin Bank	UK	30	2009	Vestas V90/2.0	3	9	4,20		Monopile	Ästsee
alpha ventus	Deutschland	12	2009	Rijswater SW	5,15	45	30		Jack-up	Nordsee
Horns Rev 2	Dänemark	31	2009	Siemens 3.0MW/9/2	2,3	30	12		Monopile	Nordsee
Ryl Fats	UK	25	2009	Siemens 3.0MW/10/2	3,8	8	8,5		Monopile	Ästsee
Hywind (Karmøy)	Norwegen	1	2009	Siemens 2.3MW/9/2	2,3	10	>100		Schwerekraft	Nordsee

Normen + Richtlinien

DIN 18800
Herausgeber - Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)
Sicherheitskonzept - Teilsicherheitskonzept

Eurocode 3 (EC 3)
Herausgeber - Europäisches Komitee für Normung
Sicherheitskonzept - Teilsicherheitskonzept

GL Wind 2005
Herausgeber - Germanischer Lloyd WindEnergie GmbH
Sicherheitskonzept - Teilsicherheitskonzept

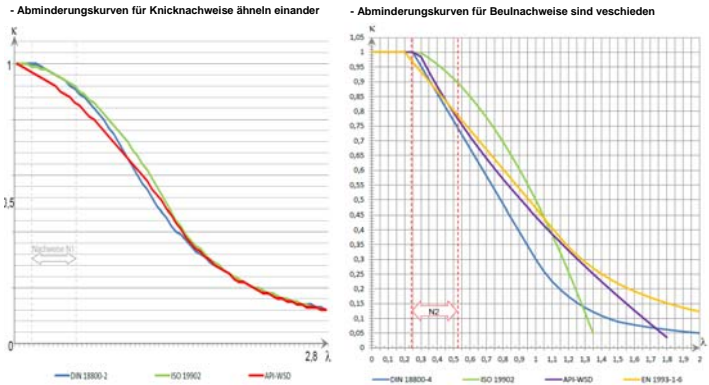
ISO 19902:2007
Herausgeber - ISO - The International Organization for Standardization
Sicherheitskonzept - Teilsicherheitskonzept

API RP 2A-WSD
Herausgeber - API - American Petroleum Institute
Sicherheitskonzept - Globales Sicherheitskonzept

Teilstrukturtyp (TST)	DIN 18800	EC 3	GL Wind	API-WSD	ISO 19902
TST für vertikale Einwirkungen	1,35	1,35	1,10	-	1,30
TST für vertikale Einwirkungen	1,35	1,35	1,35	-	1,30
TST für äußere vertikale Einwirkungen	1,0	1,0	1,1	-	1,1
TST für erdbebenbedingte Einwirkungen	1,35	1,35	1,35	-	1,30
TST für horizontale Einwirkungen	1,10	1,10	1,10	-	1,18
TST für horizontale Einwirkungen	1,10	1,10	1,10	-	1,05
TST für horizontale Einwirkungen	1,10	1,10	1,10	-	1,05
TST für horizontale Einwirkungen	1,10	1,10	1,10	-	1,05
TST für horizontale Einwirkungen	1,35	1,35	1,35	(5-10)²	(6-10)²

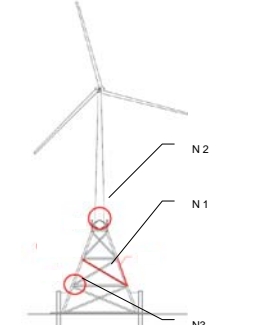
DIN 18800	EC 3	GL Wind	API-WSD	ISO 19902
Zul. Umlaufzeit bei D > 100mm	2,0%	A: 1,4% B: 2,2% C: 0,9%	0,8%	Bei 100mm zulässig Bei 125mm zulässig
Zul. Umlaufzeit bei D > 125mm	0,8%	A: 0,7% B: 1,1% C: 1,0%	0,9%	Bei 100mm zulässig wenn umlaufzeit von 100mm bis 125mm
Verhalten	MIN (B, 2,19mm)	A: 1,19mm (1,4) B: 1,91mm (2,2) C: 0,91mm (0,9)	MIN (B, 1,91mm)	Einseitige Einwirkungen bis (D/10)mm Zweiseitige Einwirkungen bis (D/10)mm
Verhalten	0,01L	A: 0,006L B: 0,010L C: 0,016L	0,01L	0,01L

Erkenntnisse aus den Vergleichen der Regelwerke



Wesentliche Nachweise für Offshore-Tragwerke und exemplarische Vergleichsrechnungen

Tragwerk - Rohrtrum mit Jacketgründung



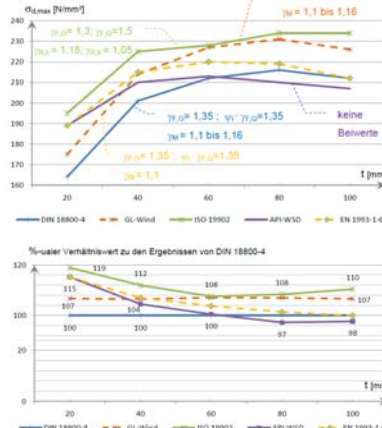
Ergebnisse - Stabknicken

Nachweisparameter: Rohrdurchmesser, D = 900mm
Blechdicke, t = 45mm
Stabsegmentlänge, L = 5,0 m bis 15,0m
Stahlsorte, S355



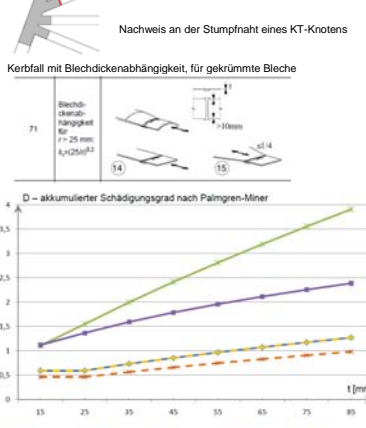
Ergebnisse - Schalenbeulen

Nachweisparameter: Rohrdurchmesser, D = 4000mm
Blechdicke, t = 20 bis 100mm
Rohrsegmentlänge, L = 20 m
Stahlsorte, S355



Ergebnisse - Ermüdung

Nachweisparameter: Blechdicke, t = 15 bis 85mm
Belastungsszenario: 2 schadensäquivalente Spannungskollektive
- Windkollektiv, 55N/mm² und n=1*10⁶
- Wellenkollektiv, 10N/mm² und n=1*10⁹



Nachweis N1
Stabknicken von Rundhohlprofilen der Jacketstruktur

Nachweis N2
Schalenbeulen des Rohrturmes

Nachweis N3
Ermüdung an einem geschweißten Knoten der Jacketstruktur