

# **Zum Trag- und Ermüdungsverhalten biegebeanspruchter Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen**

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation  
von

Dipl.-Ing. Stephan Lochte-Holtgreven  
geboren am 01.03.1978 in Hannover

2013

**Promotionskommission**

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes

Tag der Promotion: 1. März 2013

Schriftenreihe des Instituts für Stahlbau  
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Heft 29

**Stephan Lochte-Holtgreven**

**Zum Trag- und Ermüdungsverhalten biegebeanspruchter  
Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen**

Shaker Verlag  
Aachen 2013

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2013

Herausgeber:  
Prof. Dr.-Ing. Peter Schaumann  
Institut für Stahlbau  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover

<http://www.stahlbau.uni-hannover.de>

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1987-2

ISSN 1617-8327

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Peter Schaumann für die Betreuung meiner Arbeit und die Erstberichterstattung. Die fachlichen und fachübergreifenden Diskussionen und Gespräche waren für mich von großem Wert. Für die hervorragende Unterstützung und den wissenschaftlichen Freiraum sowie das Vertrauen, das er mir entgegengebracht hat, schulde ich Herrn Professor Schaumann sehr großen Dank.

Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Ludger Lohaus für die Übernahme des Zweitgutachtens herzlich bedanken. Die mit ihm geführten Diskussionen haben mir sehr weitergeholfen. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Raimund Rolfes danke ich herzlich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Die Grundlage der vorliegenden Arbeit bildete das Forschungsvorhaben „Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Grout-Strukturen in Offshore-Windenergieanlagen (GROW) (Fkz 0327585)“, welches vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanziell gefördert wurde. Für die finanzielle Förderung möchte ich mich herzlich bedanken. Zudem bedanke ich mich bei den Projektpartnern vom Germanischen Lloyd, SIAG Anlagenbau Finsterwalde sowie Heijmans Oevermann für die gute Zusammenarbeit. Diesen Dank richte ich in gleicher Weise an die Industriepartner des Nachfolgeprojektes „GROWup“ (Fkz: 0325290).

Zusätzlich möchte ich mich bei den Vergussbetonherstellern für die Bereitstellung von Füllmaterial bedanken. Des Weiteren gilt mein Dank der MPA-Bau Hannover, der SLV Halle und der inneruniversitären Unterstützung durch das Institut für Baustoffe und das Institut für Werkstoffkunde, beide Leibniz Universität Hannover, für die Durchführung von Materialuntersuchungen, metallurgischen Untersuchungen und Zugversuchen.

Im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlichen Mitarbeiter am Institut für Stahlbau sind von mir zahlreiche Studien- und Abschlussarbeiten auf dem Forschungsgebiet der Grout-Verbindungen entstanden. Ich danke den Verfassern der einzelnen Arbeiten für die zahlreichen Anregungen und Diskussionen. Besonders bedanken möchte ich mich bei meinen ehemaligen studentischen Hilfskräften Frau Christina Kanjahn sowie den Herren Rasmus Eichstädt, Jan Kulikowski und Alexander Raba.

Ein besonderer Dank für die gute Zusammenarbeit und das hervorragende Arbeitsklima geht an alle Kolleginnen und Kollegen am Institut für Stahlbau. Insbesondere möchte ich mich bei meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Cord Böker, Herrn Dr.-Ing. Frithjof Marten und Herrn Dr.-Ing. Fabian Wilke bedanken. Dieser Dank gilt auch meiner Kollegin Anne Bechtel und meinem Kollegen Jan Dubois sowie seiner Frau Diane, die mit großer Sorgfalt das Lektorat dieser Arbeit übernommen haben. Zusätzlich gilt mein großer Dank Herrn Karl-Heinz Hentschel, Herrn Björn Vortmann und Herrn Christian Fricke, ohne deren äußerst gewissenhafte Vorbereitung und erfolgreiche Durchführung der Großversuche ein Kernstück dieser Arbeit nicht entstanden wäre.

Zu guter Letzt geht mein größter Dank an meine Familie und insbesondere an meine Frau Simone. Für die Durchsicht der Endfassung aber vor allem ihre unendliche Geduld und moralische Unterstützung, die sie in der Endphase meiner Arbeit aufgebracht hat, möchte ich ihr meinen tiefsten Dank aussprechen. Auch danke ich meinem Sohn Paul für seine Fröhlichkeit und sein Lachen.

Stephan Lochte-Holtgreven



---

## Kurzfassung

Grouted Joints werden als Rohr-in-Rohr-Steckverbindungen vielfach für die Verbindung der Gründungspfähle mit den Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen eingesetzt. Für Monopile-Tragstrukturen wird hierfür ein Stahladapter, das Transition Piece, über den Monopile gefädelt und der Zwischenraum zwischen den Stahlrohren mit einem hochfesten Vergussbeton verfüllt. Mit Grouted Joints können Ausrammungen und Rohrschiefstellungen ausgeglichen und Offshore-Installationszeiten verkürzt werden. Im Jahr 2009 wurden an Grouted Joints in Monopiles mit glatten Stahlrohren vertikale Setzungen festgestellt. Das Versagen konnte auf fehlerhafte Bemessungsverfahren und eine zu geringe Axialtragfähigkeit zurückgeführt werden. Zukünftige Grouted Joints werden deshalb mit Schubrippen als zusätzliche Oberflächenprofilierungen ausgeführt, die zu einer Erhöhung der axialen Tragfähigkeit führen. Es ist bislang ungeklärt, wie sich die Schubrippen bei kurzen Übergreifungslängen der Stahlrohre und reduzierten Vergussbetondruckfestigkeiten auf das Trag- und Ermüdungsverhalten auswirken. Des Weiteren liegen keine etablierten Berechnungskonzepte für Grouted Joints mit Schubrippen bei Einsatz hochfester Vergussbetone vor.

In dieser Arbeit werden Untersuchungen zum Trag- und Ermüdungsverhalten biegebeanspruchter Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen durch Anwendung experimenteller und numerischer Methoden durchgeführt. Im experimentellen Teil der Arbeit wird der Einfluss unterschiedlicher Vergussbetondruckfestigkeiten auf das Trag- und Ermüdungsverhalten axial beanspruchter Grouted Joints an kleinmaßstäblichen Prüfkörpern untersucht. Die Einsatzmöglichkeiten von normal- und hochfesten Vergussbetonen in Grouted Joints werden dabei überprüft. Experimentelle Untersuchungen an großmaßstäblichen Grouted Joints unter Biegebeanspruchung sollen Erkenntnisse zum Einfluss der Übergreifungslänge, der Schubrippenanzahl und der Vergussbetondruckfestigkeit auf das Tragverhalten unter Extrem- und Ermüdungslasten liefern. Die Ergebnisse der Großbiegeversuche werden für die Kalibrierung numerischer Modelle aufbereitet. Zusätzlich dazu werden die axialen Resttragfähigkeiten der Großversuchskörper ermittelt und mikroskopische Untersuchungen zur lokalen Abrasion sowie Oberflächenrauigkeiten im Bereich der Verbundfuge zwischen Stahlrohr und Grout durchgeführt.

Der numerische Teil dieser Arbeit umfasst zunächst die Weiterentwicklung eines vorliegenden Materialmodells für Beton speziell auf die Besonderheiten hochfester Vergussbetone und Grouts. In diesem Zusammenhang werden Kalibrierparameter für Vergussbetone festgelegt, das Materialmodell mit einer nichtlinearen Verfestigungsfunktion gekoppelt und mit Schädigungsvariablen für Ermüdungsbeanspruchungen erweitert. Die abschließende Implementierung des Modells in ein numerisches Programmsystem erlaubt die Ableitung von vereinfachten mehraxialen Wöhlerlinien für hochfeste Vergussbetone. Das entwickelte Modell wird an Versuchsergebnissen für Betone, hochfeste Vergussbetone und Grouts validiert und bildet die Grundlage der numerischen Untersuchungen.

In den numerischen Untersuchungen werden zunächst numerische Modelle der Großbiegeversuche entwickelt und auf die erzielten Versuchsergebnisse kalibriert. Mit den kalibrierten Modellen werden Parameterstudien durchgeführt. Zusätzlich werden unter Verwendung des Materialmodells lokale Spannungszustände im Bereich der Schubrippen betrachtet und die Anwendbarkeit des Modells für Ermüdungsbeanspruchungen überprüft.

Die Ergebnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen zeigen, dass die Übergreifungslänge und die Vergussbetondruckfestigkeit signifikant das Langzeitverformungsverhalten biegebeanspruchter Grouted Joints dominieren. Im Bereich der Schubrippen wird das Ermüdungsversagen durch die Ermüdungsfestigkeit des Vergussbetons stark beeinflusst. Durch den Einsatz des entwickelten Materialmodells lassen sich bemessungsrelevante mehraxiale Spannungszustände in der Grout-Schicht realistisch abbilden und erlauben erstmalig eine Prognose des lokalen Ermüdungsverhaltens im Bereich der Schubrippen im Abgleich mit Schadensbildern aus Großversuchen.

Schlagwörter: Grouted Joints, Offshore-Windenergie, Materialermüdung, Materialmodellierung

---

## Abstract

Grouted joints are used for the connection between foundation piles and substructures of Offshore Wind Turbines. In Monopiles the grouted joint consists of an inner steel tube, the pile, and a transition piece, the sleeve, which is slid over the inner tube. The annulus between pile and sleeve is filled with a high performance grout. This type of connection enables a compensation of pile inclinations and leads to a reduction of offshore installation times. In 2009, vertical settlements have been detected on grouted joints in Monopiles realized with plain steel surfaces. The reasonable failure was a matter of flaws in the design approach, leading to an overestimation of the axial capacity of grouted joints. To increase the axial load bearing capacity, future grouted connections will be built with shear keys as additional mechanical interlock. Nevertheless, one core issue remains unsolved. How do shear keys affect the ultimate and fatigue performance of grouted joints, specifically when the overlap length between pile and sleeve shall be reduced or a grout core with less compressive strength shall be installed? Additionally, recognised design concepts for grouted joints with high performance grout layers under bending loads have not yet been rendered.

In the framework of this thesis, investigations on the ultimate and fatigue capacity of grouted joints under bending stress for Offshore Wind Turbines are conducted. Therefore, experimental and numerical methods are applied.

The experimental investigations incorporate the evaluation of different high performance grouts. Axial tests on a small scale are considered to investigate the influence of the grout strength under ultimate and fatigue loading conditions. Moreover, the applicability of the materials for grouted joints under bending loads is examined. Large scale bending tests are performed in order to investigate the influence of different overlap lengths and numbers of shear keys as well as the influence of the grout strength. Results of the bending tests are also fundamental for the benchmark of numerical models. In addition to the bending tests, axial post fatigue capacities of large scaled grouted joint test specimen are determined. The influence of abrasive wear at the grout-steel interface is examined and surface roughness measurements at the steel-grout-interface are conducted.

Within the numerical part of this thesis a multi-axial failure model for concrete is adopted and expanded to deal with high performance grouts. Besides the definition of calibration parameters for high strength concrete, the multi-axial failure model is coupled with a nonlinear plasticity function and extended by fatigue damage parameters. Finally, the compiled model is implemented in a commercial finite element programme. With the multi-axial plasticity-based fatigue failure model simplified multi-axial SN-curves for high performance grouts under multi-axial compression are developed. Finally, the model is benchmarked against material tests for normal and high performance concrete and used for subsequent numerical investigations.

Within the numerical investigation, numerical models of the large scale bending tests are developed and calibrated against the test results. Based on this, parameter studies are conducted by use of calibrated models. Beyond the numerical models of the tests, submodells of the shear keys are generated. Consequently, local stress states at the shear keys are thoroughly assessed and the applicability of the model and its simplified SN-curves are checked.

The results of the experimental and numerical investigations indicate that the overlap length and the grout compressive strength are the governing parameters for the global long-term displacement behaviour of grouted joints under predominant bending loads. On a local level at the shear keys, the performance of the connection is mainly affected by the grout fatigue strength. Primarily, local stress states at the shear keys are captured sufficiently by the suggested model and design relevant local fatigue resistances can be predicted.

key words: Grouted Joints, offshore wind energy, fatigue, material modelling

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Einführung und Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Aufbau der Arbeit .....	5
2	Stand der Technik und Forschung .....	7
2.1	Allgemeines .....	7
2.2	Beanspruchungen auf Offshore-Windenergieanlagen .....	8
2.2.1	Traglastbeanspruchungen .....	8
2.2.2	Ermüdungsbeanspruchungen.....	9
2.2.3	Lastkollektive .....	10
2.3	Grout-Verbindungstypen .....	12
2.3.1	Aufbau, Verwendung und Installation.....	14
2.3.2	Beschreibung globaler Tragmechanismen.....	15
2.3.3	Beschreibung lokaler Tragmechanismen.....	17
2.4	Einflüsse auf die Tragfähigkeit und Ermüdungsfestigkeit.....	19
2.4.1	Oberflächengestaltung der Stahlrohre .....	20
2.4.2	Verbindungssteifigkeit.....	21
2.4.3	Füllmaterialdruckfestigkeit.....	22
2.4.4	Übergreifungslänge .....	24
2.4.5	Beanspruchungsart.....	26
2.4.6	Weitere Einflüsse.....	27
2.5	Vorliegende Nachweiskonzepte für biegebeanspruchte Grouted Joints in OWEA .....	28
2.5.1	Nationale Situation .....	28
2.5.2	Konzepte in Offshore-Richtlinien.....	29
2.5.3	Konzept nach Lotsberg.....	31
2.5.4	Konzept nach Schaumann und Wilke.....	31
2.6	Adaptierte Nachweismethoden .....	32
2.6.1	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	32
2.6.2	Nachweise im Grenzzustand der Ermüdung.....	34
2.7	Diskussion und zentrale Forderungen an die eigenen Untersuchungen.....	38
3	Werkstoffe für Grout-Verbindungen.....	41
3.1	Stahl .....	41
3.1.1	Stahlgüten und Materialkennwerte .....	42
3.1.2	Materialverhalten von Stahl unter monotonen Beanspruchungen .....	43
3.1.3	Materialverhalten von Stahl unter zyklischen Beanspruchungen.....	45
3.2	Grouts und Vergussbetone .....	47
3.2.1	Typen, Zusammensetzung und Materialkennwerte .....	48
3.2.2	Materialverhalten von Beton unter monotonen Beanspruchungen.....	50
3.2.3	Materialverhalten von Beton unter zyklischen Beanspruchungen .....	55
3.2.4	Bewertung einaxialer Beton-Wöhlerlinien für hochfeste Offshore-Grouts.....	62
3.2.5	Kriechen und Schwinden.....	65
3.3	Zusammenfassung und Folgerungen für die eigene Materialmodellierung.....	66

---

4	Experimentelle Untersuchungen zum Trag- und Ermüdungsverhalten.....	69
4.1	Festlegung der Versuchsparameter .....	70
4.1.1	Füllmaterialdruckfestigkeit.....	70
4.1.2	Übergreifungslänge und Schubrippenanzahl.....	71
4.1.3	Tabellarische Zusammenfassung.....	71
4.2	Materialuntersuchungen an axial beanspruchten Kleinversuchskörpern.....	72
4.2.1	Traglastversuche.....	73
4.2.2	Ermüdungsversuche.....	80
4.2.3	Diskussion der Materialuntersuchungen.....	85
4.3	Biegebeanspruchte Großmodellversuche.....	86
4.3.1	Referenzstruktur .....	86
4.3.2	Versuchsaufbau und Herstellung der Versuchskörper.....	88
4.3.3	Verwendete Materialien .....	92
4.3.4	Zusammenfassung der Versuchskörperkonfigurationen .....	92
4.3.5	Mess-Sensorik .....	92
4.3.6	Versuchsdurchführung.....	96
4.3.7	Ergebnisse der Biegeversuche unter Ermüdungslasten .....	97
4.3.8	Ergebnisse der Biegeversuche unter Traglasten .....	110
4.3.9	Ergebnisse der axialen Resttraglastversuche .....	115
4.3.10	Bruchbildanalyse.....	117
4.4	Detailuntersuchungen der Stahloberflächen .....	118
4.4.1	Probekörper .....	118
4.4.2	Messung der Oberflächenrauigkeit mittels taktiler Rauheitsmessung.....	119
4.4.3	Messung der Oberflächenrauigkeit mittels konfokaler Weißlichtmikroskopie.....	121
4.4.4	Mikroskopische Bewertung der Oberflächen .....	122
4.5	Detailuntersuchungen an Schubrippen.....	123
4.6	Erkenntnisse.....	125
5	Materialmodell für Offshore-Grouts .....	127
5.1	Grout unter monotonen Beanspruchungen .....	127
5.1.1	Einaxialer Spannungszustand .....	127
5.1.2	Mehraxialer Spannungszustand.....	131
5.1.3	Kopplung von Versagensmodell und Verfestigungsfunktion.....	135
5.2	Grout unter Ermüdungsbeanspruchungen.....	137
5.2.1	Ermittlung der Anzahl ertragbarer Lastwechsel bei mehraxialer Beanspruchung .....	137
5.2.2	Entwicklung eines Schädigungsmodells.....	140
5.2.3	Modifikationsfaktoren für Ermüdungsnachweise.....	143
5.3	Numerische Implementierung.....	145
5.3.1	Berechnungsalgorithmus .....	146
5.3.2	Flussdiagramm.....	149
5.4	Validierung des implementierten Materialmodells.....	150
5.4.1	Statischer Beanspruchungszustand.....	150
5.4.2	Dynamischer Beanspruchungszustand .....	156
5.5	Vergleich des implementierten Materialmodells mit anderen Versagensmodellen.....	157
5.5.1	Abbildung mehraxialer Spannungs- und Verzerrungszustände.....	157
5.5.2	Anwendungsgrenzen des Drucker-Prager-Versagenskriteriums .....	158
5.6	Zusammenfassung und Erkenntnisse.....	160

---

6	Numerische Untersuchungen .....	161
6.1	Parameter der numerischen Modellbildung .....	162
6.1.1	Verwendete Elementtypen und Kontaktbedingungen .....	162
6.1.2	Netzfeinheit .....	163
6.1.3	Reibkoeffizienten.....	163
6.1.4	Berücksichtigte Materialmodelle und Materialkennwerte.....	164
6.2	Kalibrierung numerischer Modelle an Versuchsergebnissen.....	164
6.2.1	Numerisches Modell der großmaßstäblichen Biegeversuche.....	164
6.2.2	Untersuchungen für quasi-statische Beanspruchungszustände.....	165
6.2.3	Untersuchungen für zyklische Beanspruchungszustände.....	174
6.3	Parameterstudien an kalibrierten Gesamtmodellen.....	182
6.3.1	Übergreifungslänge, Schubrippenanzahl und Füllmaterialdruckfestigkeit.....	182
6.3.2	Schubrippenweite und Übergreifungslänge.....	183
6.3.3	Reibbedingungen in der Kontaktfuge.....	184
6.3.4	Materialsteifigkeit.....	185
6.4	Betrachtung lokaler Spannungs- und Verzerrungszustände mit Submodellen .....	185
6.4.1	Lage und Parameter der numerischen Submodelle.....	186
6.4.2	Vergleich von Spannungszuständen am Submodell 1 .....	187
6.4.3	Schädigungsberechnungen am Submodell 2 und 3 .....	189
6.5	Zusammenfassung und Erkenntnisse .....	191
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	193
7.1	Zusammenfassung.....	193
7.2	Ausblick.....	197
8	Literatur.....	198
8.1	Normen, Richtlinien und Gesetze .....	198
8.2	Monographien, Handbücher und Aufsätze .....	199
8.3	Produktinformationen und -datenblätter .....	207
8.4	Betreute studentische Arbeiten .....	207
9	Verzeichnisse.....	210
9.1	Abbildungsverzeichnis.....	210
9.2	Tabellenverzeichnis .....	214
	Anhang.....	216
	Lebenslauf.....	247

## Nomenklatur

### Kleine griechische Buchstaben

$\alpha$	°	Druckstrebenneigungswinkel
$\alpha_c$		Abminderungsfaktor für Langzeitwirkungen
$\alpha_{DP}$	-	Parameter im Drucker-Prager-Kriterium
$\alpha_{cone}$	°	Konuswinkel
$\alpha_{cc}$	-	Verhältniswert zwischen Quer- und Hauptdruckspannung
$\beta$	-	Nichtlinearitätsindex
$\beta_a$	-	Schwellenwert der Nichtlinearität
$\beta_{c,sw}(t, t_0)$	-	Koeffizient zur Berücksichtigung hoher Mittelspannungen
$\beta_{c,t}(t)$	-	Koeffizient für den Festigkeitsanstieg infolge fortschreitender Hydratation
$\delta$	mm	Oberflächenungenauigkeit
$\varepsilon$	‰	Verzerrung
$\varepsilon_0$	‰	Erstbelastungsverzerrung
$\varepsilon_3$	‰	Verzerrung in dritter Hauptspannungsrichtung
$\varepsilon_a$	‰	Dehnungsamplitude
$\varepsilon_{axial}$	‰	axiale Verzerrung
$\varepsilon_c$	‰	Betonverzerrung
$\varepsilon_{c1}$	‰	Einaxiale Gesamtverzerrung bei Erreichen der Bruchspannung
$\varepsilon_{c1,pl}$	‰	Plastischer Anteil der Verzerrung bei Erreichen der Bruchspannung
$\varepsilon_{c1,mehraxial}$	‰	Mehraxiale Gesamtverzerrung bei Erreichen der Bruchspannung
$\varepsilon_{c,el}$	‰	elastischer Anteil der Betonverzerrung
$\varepsilon_{c,lim}$	‰	Grenzbetonstauchung
$\varepsilon_{c,pl}$	‰	plastischer Anteil der Betonverzerrung
$\varepsilon_{cas}$	‰	Schrumpfverzerrung
$\varepsilon_{c,ds}$	‰	Trocknungsschwindverzerrung
$\varepsilon_{cr}$	‰	Kriechverzerrung
$\varepsilon_{el}$	‰	elastischer Anteil der mechanischen Verzerrung
$\varepsilon_f^{fat}$	‰	Verzerrung bei Eintritt des Ermüdungsbruchs
$\varepsilon_{cs}$	‰	Schwindverzerrung
$\varepsilon_{cas}$	‰	Schrumpfdehnung
$\varepsilon_{c,ds}$	‰	Trocknungsschwinddehnung
$\varepsilon_{ges}$	‰	Gesamtverzerrung
$\varepsilon_{lateral}$	‰	laterale Verzerrung
$\varepsilon_{pl}$	‰	plastischer Anteil der Verzerrung, plastischer Verzerrungstensor
$\gamma_{Sd}$ $\gamma_M$	-	Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialwiderstandsseite
$\gamma_c$	-	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
$\gamma_c'$	-	Vergrößerungsfaktor für Beton
$\lambda$	-	Beiwert im Ottosen-Kriterium
$\lambda_c$	-	Modifikationsfaktor für die Mehraxialität (Index: c2 biaxial, c3 triaxial)
$\lambda_s$	-	Skalierungsfaktor
$\eta_c$	-	Faktor zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Betondruckspannungen
$\kappa$	-	Verfestigungsbeiwert nach Grassl et al. (2002)
$\kappa_c^{fat}$	-	Schädigungsvariable unter dreiaxialen Druck
$\kappa_t^{fat}$	-	Schädigungsvariable unter zweiaxialen Druck
$\mu$	-	Reibungskoeffizient
$\nu$	-	Poisson-Zahl

$\rho$		bezogener deviatorischer Spannungsanteil $\rho = \sqrt{2 \cdot J_2} / f_c$
$\rho_c, \rho_s$		Dichte von Beton und Stahl
$\theta$	◦	Lode-Winkel
$\varphi'$	◦	Winkel der inneren Reibung
$\varphi_p$	◦	Schiefstellung des Gründungsrohres
$\sigma_3$		betragsmäßig maximale Hauptdruckspannung
$\sigma_{3,f}$		mehraxiale Bruchspannung
$\sigma_{3,max}$	N/mm <sup>2</sup>	einaxiale Ermüdungsspannung
$\sigma_{axial}$	N/mm <sup>2</sup>	Axialspannung
$\sigma_c$	N/mm <sup>2</sup>	Betonspannung
$\sigma_{c,max}$	N/mm <sup>2</sup>	maximale Betondruckspannung
$\sigma_{c,min}$	N/mm <sup>2</sup>	minimale Betondruckspannung
$\sigma_c / f_c$	-	bezogene Spannung
$\sigma_{cr}$	-	Beginn des Vorbruchbereichs
$\sigma_{lateral}$	N/mm <sup>2</sup>	Umschnürungsspannung, Lateralspannung
$\sigma_m$	N/mm <sup>2</sup>	hydrostatische Spannung
$\sigma_{oben}$	N/mm <sup>2</sup>	Oberspannung
$\sigma^r$	N/mm <sup>2</sup>	Spannungstensor der Testspannungen
$\tau_{kf}$	N/mm <sup>2</sup>	ertragbare Verbundspannung infolge Reibung
$\tau_{ks}$	N/mm <sup>2</sup>	ertragbare Verbundspannung infolge Schubrippen
$\xi$		bezogener hydrostatischer Spannungsanteil $\xi = I_1 / (\sqrt{3} \cdot f_c)$

### Große griechische Buchstabe

$\Delta$	-	Abweichung bzw. Differenz
$\Delta\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Doppelspannungsamplitude
$\Delta\sigma_{eq}$	N/mm <sup>2</sup>	schadensäquivalente Spannungsschwingbreite
$\Delta k$	%	Mittelwert der Steifigkeitsveränderung
$\Delta u$	mm	Doppelverschiebungsamplitude
$\Delta M_{eqv}$	kNm	Biegemomentenspektrum
$\Delta N$	-	Lastwechselzahldifferenz
$\Delta S$	N/mm <sup>2</sup>	Doppelspannungsamplitude

### Kleine lateinische Buchstaben

$c'$	N/mm <sup>2</sup>	Kohäsion
$d\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Vektor der Spannungsinkremente
$d\varepsilon$	‰	Vektor der Gesamtverzerrungsincremente
$d\varepsilon_{pl}$	‰	Vektor der plastischen Verzerrungsincremente
$d\lambda$		Lagrange'scher Proportionalitätsfaktor
$f$	Hz	Prüffrequenz
$f_{bu}$	N/mm <sup>2</sup>	Verbundfestigkeit
$f_c$	N/mm <sup>2</sup>	einaxiale Druckfestigkeit von Grout
$f_{cu}$	N/mm <sup>2</sup>	einaxiale Druckfestigkeit des Grouts nach DIN EN ISO 19902
$f_c(I_1, J_2, \theta)$	N/mm <sup>2</sup>	mehraxiale Druckfestigkeit von Grout
$f_c(I_1, J_2, \theta, N, r)$	N/mm <sup>2</sup>	mehraxiale Druckfestigkeit von Grout unter Ermüdungsbeanspruchungen
$f_{c,cube}$	N/mm <sup>2</sup>	Würfeldruckfestigkeit
$f_{c,cyl}$	N/mm <sup>2</sup>	Zylinderdruckfestigkeit
$f_{cc}$	N/mm <sup>2</sup>	zweiachiale Druckfestigkeit

$f_{cd}$	N/mm <sup>2</sup>	Bemessungswert der einaxialen Zylinderdruckfestigkeit von Beton
$f_{ck}$	N/mm <sup>2</sup>	charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit von Beton
$f_{ck0}$	N/mm <sup>2</sup>	Bezugswert der Zylinderdruckfestigkeit (= 10 N/mm <sup>2</sup> )
$f_{cd,fat}$	N/mm <sup>2</sup>	Bemessungswert der Ermüdungsfestigkeit von Grout unter Druck
$f_{cm}$	N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert der einaxialen Grout- bzw. Betondruckfestigkeit
$f_{ct}$	N/mm <sup>2</sup>	einaxiale zentrische Zugfestigkeit von Grout und Beton
$f_{ctm}$	N/mm <sup>2</sup>	Mittelwert der zentrischen Betonzugfestigkeit
$f_{g,sliding}$	N/mm <sup>2</sup>	Axialwiderstand gegen Durchrutschen nach DIN EN ISO 19902
$f_{OL}$	-	Übergreifungsfaktor
$g$	-	plastisches Potential
$g_c$	N/mm <sup>2</sup>	Bruchenergie
$g_{c,el}$	N/mm <sup>2</sup>	elastischer Anteil der Bruchenergie
$g_{c,pl}$	N/mm <sup>2</sup>	plastischer Anteil der Bruchenergie
$f_{slip}$	N/mm <sup>2</sup>	Schlupfspannung
$f_t$	N/mm <sup>2</sup>	Zentrische Zugfestigkeit
$f_{uk}$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit von Stahl
$f_{yk}$	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze von Stahl
$f_{yd}$	N/mm <sup>2</sup>	Bemessungswert der Streckgrenze von Stahl
$h$	mm	Schubrippenhöhe
$k$	N/mm	Steifigkeit
$k_{rel}$	-	relative Steifigkeit
$m$	-	Neigung der Wöhlerlinie
$n$	-	Schubrippenanzahl
$n'$	-	Verfestigungsexponent
$n_i$	Lw	Anzahl der aufgetragenen Lastwechsel
$p$	N/mm <sup>2</sup>	Kontaktflächenpressung
$p_{\bar{u}}$	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
$q(\kappa)$	-	Verfestigungsfunktion nach Grassl et al. (2002)
$q_h(\kappa)$	-	verfestigender Anteil der Verfestigungsfunktion $q(\kappa)$
$q_s(\kappa)$	-	entfestigender Anteil der Verfestigungsfunktion $q(\kappa)$
$r$		Grad der radialen Umschnürung
$s$	mm	Schubrippenabstand
$t$	s	Zeitraum
$t_G$	mm	Dicke der Grout-Schicht
$t_P$	mm	Wanddicke des Pile-Rohres
$t_S$	mm	Wanddicke des Sleeve-Rohres
$u$	mm	Durchbiegung bzw. Verschiebung
$u_{F,Druckstrebe}$	mm	zugehörige Verschiebung bei Druckstrebenbruch
$u_{F,max}$	mm	zugehörige Verschiebung unter axialer Traglast
$u_{HUS}, u_{MTS}$	mm	Weg der Prüfmaschine
$w$	mm	Schubrippenweite
w/b-Wert	-	Wasser-Bindemittel-Wert
w/z-Wert	-	Wasser-Zement-Wert

### Große lateinische Buchstaben

$A_{Grassl}$		Eingangsparameter des plastischen Potentials
$A_{Ot}$		Parameter im Ottosen-Kriterium
$B_{Grassl}$		Eingangsparameter des plastischen Potentials
$B_{Ot}$		Beiwert im Ottosen-Kriterium
$C_1$		Beiwert im Ottosen-Kriterium
$C_{1G}$	-	Beiwert der Verfestigungsfunktion

$C_2$	-	Beiwert im Ottosen-Kriterium
$C_{2G}$	-	Beiwert der Verfestigungsfunktion
$C_{3G}$	-	Beiwert der Verfestigungsfunktion
$C_p$	-	Faktor zur Berücksichtigung der Schalenschlankheit
$D$		Gesamtschädigung
$D^{el}$	-	Elastische Steifigkeitsmatrix
$D^{pl}$	-	Plastische Steifigkeitsmatrix
$D_i$	-	Teilschädigung
$D_p$	mm	Außendurchmesser des Pile-Rohres
$D_s$	mm	Außendurchmesser des Sleeve-Rohres
$E_l$	-	Tangentensteifigkeit bei Eintritt des Vorbruchbereichs
$E_c$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul von Grout
$E_{ci}$	N/mm <sup>2</sup>	Tangentenmodul von Grout
$E_{cl}$	N/mm <sup>2</sup>	Sekantenmodul von Grout
$E_{c,s}$	N/mm <sup>2</sup>	Sekantensteifigkeit im Ermüdungsversuch
$E_s$	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul von Stahl
$F$	kN	Kraft bzw. Prüfkraft
$F_{bu}$	-	Verbundfestigkeitsparameter
$F_{Druckstrebe}$	kN	Traglast bei Druckstrebenbruch
$F_{dyn,o}$	kN	dynamische Oberlast
$F_{dyn,u}$	kN	dynamische Unterlast
$F_{max}$	kN	Axiale Resttragfähigkeit (post-fatigue capacity)
$F_V$	kN	Nennvorspannkraft von Schrauben
$F(I_1, J_2, \theta)$	-	Bruchumhüllende
$F(\sigma)$	-	Fließfunktion
$H(\kappa)$		Plastischer Modul
$I$		Einheitsmatrix
$I_1$	N/mm <sup>2</sup>	Erste Invariante des Spannungstensors
$J$	Joule	Kerbschlagarbeit von Stahl
$J(N)$	-	Verzerrungsevolutionsfunktion
$J_2$	N/mm <sup>2</sup>	Zweite Invariante des Spannungsdeviators
$J_{2f}$		Zweite Invariante des Spannungsdeviators beim Bruch
$K$	-	Verbundsteifigkeitsparameter nach DIN EN ISO 19902
$K'$	-	Verfestigungskoeffizient
$K_{DNV}$	-	Verbundsteifigkeitsparameter nach DNV-OS-J101
$K_{DP}$	-	Beiwert im Drucker-Prager-Kriterium
$L_g$	mm	effektiv vergROUTETE Länge bzw. Übergreifungslänge
$L_{gsk}$	mm	Länge der Grout-Schürze
$M$	MNm	Biegemoment
$M_{Kontakt}$	MNm	Biegemomententragfähigkeit infolge Kontaktflächenpressung
$M_{tot}$	MNm	Biegemomententragfähigkeit
$M_o, M_u$	MNm	Biegemoment an Ober bzw. Unterkante der Grout-Verbindung
$M_{Oberfläche}$	MNm	Biegemomententragfähigkeit infolge Oberflächenungenauigkeit
$M_{Reibung}$	MNm	Biegemomententragfähigkeit infolge Reibung
$M_{Schubrippe}$	MNm	Biegemomententragfähigkeit infolge der Schubrippen
$N$	-	Anzahl der ertragbaren Lastwechsel
$N_F$		Bruchlastwechselzahl
$N_o, N_u$	MN	Normalkraft an Ober- bzw. Unterkante der Grout-Verbindung
$N_{ref}$	Lw	Bezugswertes der Lastwechsel
$R$	-	Belastungs- bzw. Spannungsverhältnis
$R_a$	µm	arithmetischer Mittenrauwert (taktil)

$R_c$	N/mm <sup>2</sup>	Prismendruckfestigkeit
$R_d$	-	Bemessungswert des Materialwiderstands
$R_p$	mm	Außenradius des Pile-Rohres
$R_q$	µm	quadratischer Mittenrauwert (taktil)
$R_{Shk}$	mm	Wurzelausrundung an der Schubrippe
$R_t$	µm	Gesamthöhe des Profils der Rauheit (taktil)
$R_z$	µm	Rautiefe (taktil)
$S_a$	µm	arithmetischer Mittenrauwert (konfokal)
$S_{c,max}$	-	bezogene Oberspannung
$S_{c3,max}$	-	bezogene maximale Hauptdruckspannung
$S_{c,min}$	-	bezogene Unterspannung
$S_{cd,max}$	-	Bemessungswert der Hauptbezugsoberspannung
$S_{cd,min}$	-	Bemessungswert der Hauptbezugsunterspannung
$S_d$		Bemessungswert der Einwirkungen
$S_k$		charakteristischer Wert der Einwirkungen
$S_k$	µm	Kernrautiefe (konfokal)
$S_m$	N/mm <sup>2</sup>	Mittelspannung
$S_o$	N/mm <sup>2</sup>	Oberspannung
$S_q$	µm	quadratischer Mittenrauwert (konfokal)
$S_u$	N/mm <sup>2</sup>	Unterspannung
$S_z$	µm	Rautiefe (konfokal)
$V_o, V_u$	MN	Querkraft an Oberkante bzw. Unterkante der Grout-Verbindung
$Z_{pile}$	kN	Zugkraft im Pile
$Z_{sleeve}$	kN	Zugkraft im Sleeve

### Abkürzungen

DMS	Dehnmessstreifen
FEM	Finite Element Methode
GEH	Gestaltsänderungshypothese
HAC	Hoch-aluminiumhaltige Zemente
LAT	Lowest Astronomical Tide
LVDT	Induktiver Wegaufnehmer (Linear Variable Displacement Transducer)
LS	Laststufe
Lw	Lastwechsel
MSL	Mean Sea Level
MW	Megawatt
OEPI	Offshore-Erdölplattform
Oilwell	Zement aus der Tiefbohrtechnik
OGPI	Offshore-Gasplattform
OPC	Ordinary Portland Zement
OWEA	Offshore-Windenergieanlage
OWP	Offshore-Windpark
REM	Rasterelektronenmikroskop
ROV	Remoted Operated Vehicles
Sa, St	Normreinheitsgrade
VK	Versuchskörper
WEA	Windenergieanlage
WEZ	Wärmeeinflusszone
X-FEM	eXtended Finite Element Methode
ZIE	Zustimmung im Einzelfall