

# Ermüdungsverhalten von kleinskaligen Grout-Verbindungen unter Wasser

Peter Schaumann<sup>1</sup> und Alexander Raba<sup>1</sup>

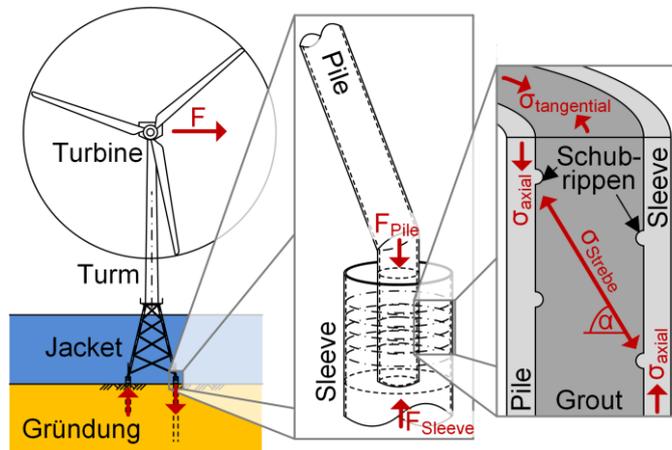
<sup>1</sup> Institut für Stahlbau, Appelstr. 9A, Leibniz Universität Hannover, Deutschland  
E-Mail: stahlbau@stahl.uni-hannover.de

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Grout-Verbindung ist ein typisches Strukturdetail bei Offshore Windenergieanlagen. Zwei Stahlrohre mit unterschiedlichem Durchmesser werden ineinander gesteckt und über mechanische Verbindungsmittel und hochfesten Vergussbeton (Grout) miteinander verbunden. Diese Verbindung befindet sich bei aufgelösten Gründungsstrukturen üblicherweise unter Wasser. Bisher ist ein möglicher Wassereinfluss auf das Ermüdungsverhalten der Verbindung in Versuchen nicht berücksichtigt worden. Die im Artikel beschriebenen Untersuchungen holen dies nach und zeigen an kleinskaligen Versuchskörper einen deutlichen Wassereinfluss. Dieser führt zu einer Reduktion der Lebensdauer bei Ermüdungsbeanspruchung. Neben den bereits bekannten Schadensmechanismen im Grout, kommt es durch das Wasser zu weiteren Phänomenen, die im Artikel näher dargestellt werden.

## 1 Einleitung

Die in der Offshore Windenergie eingesetzten aufgelösten Gründungsstrukturen, wie etwa das in Abbildung 1 dargestellte Jacket, werden üblicherweise über Grout-Verbindungen an ihre Pfahlgründungen angeschlossen. Die Verbindung befindet sich dabei etwa auf Höhe des Meeresbodens und somit dauerhaft unter Wasser. Es besteht keine Abdichtung der Verbindung gegen das anstehende Wasser.



**Abbildung 1: Typische Offshore Windenergieanlage, Details zur strukturellen Ausbildung der Grout-Verbindung und Kraftfluss in der Verbindung**

Die derzeit zur Bemessung der Grout-Verbindung verfügbaren Konzepte [DIN EN ISO 19902, 2014], [DNV-OS-J101, 2014] basieren auf unter trockenen Umgebungsbedingungen durchgeführten Untersuchungen zum Trag- und Ermüdungsverhalten (siehe [Billington & Tebbet, 1980],

[Harwood et al., 1996]). Untersuchungen an Materialproben etwa von [Nygaard et al., 1992], [Sorensen, 2011] oder [Hümme, 2015] sowie an Stahlbetonproben etwa von [Waagaard, 1986] zeigten einen deutlichen Einfluss des Wassers in Form einer reduzierten Lebensdauer bei Ermüdungsbeanspruchung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „GROWup – Überwiegend axial wechselbeanspruchte Grout-Verbindungen in Tragstrukturen von OWEA“ wurde daher ein Versuchsprogramm zur Untersuchung des Wassereinflusses auf das Ermüdungsverhalten von Grout-Verbindungen entwickelt. Im Folgenden werden dieses Versuchsprogramm und die gewonnen Erkenntnisse vorgestellt.

## 2 Grout-Verbindung

### 2.1 Tragverhalten

Die Grout-Verbindung besteht aus einem kleineren Stahlrohr (Pin) und einem größeren Stahlrohr (Pile). Durch Einführen des Pins in den Pile entsteht ein Hohlraum, der mit Grout-Material gefüllt wird. Um eine definierte Verzahnung zwischen Stahloberfläche und Grout sicherzustellen, werden auf den Stahloberflächen Schweißwülste (Schubrippen) zur Profilierung aufgebracht.

Aufgrund des Tragverhaltens der Gründungsstruktur, werden die aus Wind und Wellen resultierenden Wechselbeanspruchungen vorwiegend als axiale Kräftepaare über die Grout-Verbindungen in die Bodenpfähle eingeleitet. In der Verbindung selbst findet der Kraftübertrag zwischen Pin und Pile über das Grout-Segment statt. Zwischen gegenüberliegenden Schubrippen stellt sich ein Bereich konzentrierter Druckspannungen ( $\sigma_{\text{Strebe}}$ ) ein, der in Analogie zum Fachwerk als Druckstrebe bezeichnet wird (siehe [Lampert et al., 1986]). Die sich aus dem Durchmesserprung der Stahlrohre ergebende Druckstrebenneigung  $\alpha$  führt neben axialen Spannungen ( $\sigma_{\text{axial}}$ ) in den Rohren zu radial wirkendem Druck, der durch die Umschnürungswirkung der Rohre lokal kurzgeschlossen wird ( $\sigma_{\text{tangential}}$ ).

### 2.2 Schädigungsmechanismen

Die beschriebene Beanspruchung kann verschiedene Schädigungen sowohl im Stahl, als auch im Grout hervorrufen. Im Folgenden werden die Schädigungsmechanismen für den Grout näher

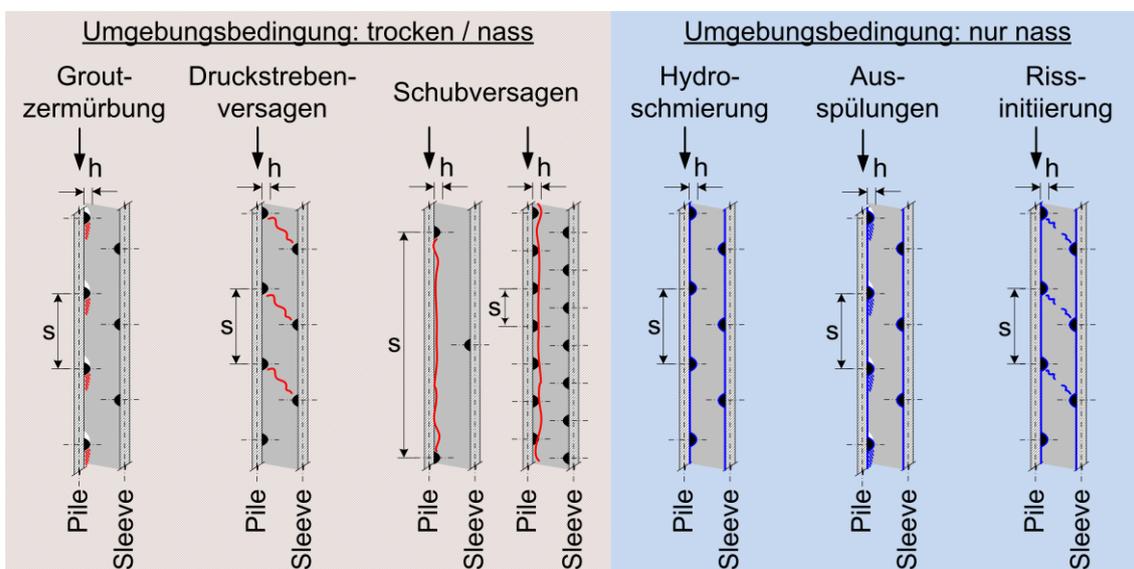


Abbildung 2: Schädigungsmechanismen im Füllmaterial der Grout-Verbindung

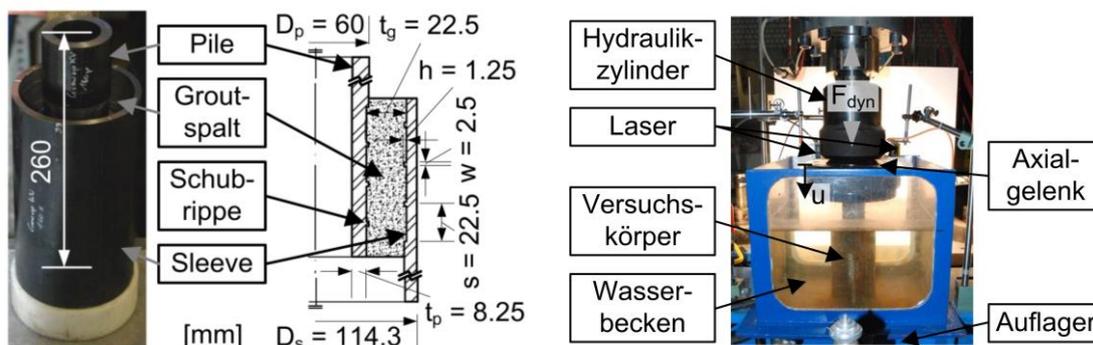
dargestellt. Im Bereich der Schubrippen führt die konzentrierte Lasteinleitung in den Grout zu einer lokalen Druckschädigung des Grout-Materials (siehe [Krahl & Karsan, 1985] und Abbildung 2). Das zermürbte Material wird vom umgebenden Grout an Ort und Stelle gehalten und kann so weiter am Lastabtrag beteiligt werden. Die Materialstauchung entlang der Druckstreben, führt zu Querdehnungen, die zur Überschreitung der Zugfestigkeit des Grout-materials führen können. In der Folge entstehen Risse entlang der Druckstreben (siehe [Billington & Lewis, 1978] und Abbildung 2). Je nach Anordnung der Schubrippen, kann es außerdem zu einem Abscheren des Grout-Materials oder des Stahls kommen (siehe Abbildung 2).

### 3 Kleinskalige Versuche

#### 3.1 Versuchsaufbau

Zur Nachbildung des Beanspruchungszustandes im Grout-Material wurde ein kleinskaliger Versuchskörper entwickelt (siehe [Schaumann & Wilke, 2006] und Abbildung 3, links). Hierfür wurden relativ gedrungene Stahlrohre gewählt, um ein Versagen der Stahlteile auszuschließen. Aus den Stahlrohroberflächen wurden rechteckige Schubrippen herausgedreht. Als Füllmaterialien wurden zwei handelsübliche Grouts mit geringer Festigkeit (Mat. 1,  $f_{cu} = 90 \text{ N/mm}^2$ ) und höherer Festigkeit (Mat. 2,  $f_{cu} = 140 \text{ N/mm}^2$ ), gewählt.

Die Versuchskörper wurden unter einem Hydraulikzylinder axial auf Druck beansprucht. Während der Versuche wurden die aufgebrachte Belastung  $F$ , sowie die relative Stauchung  $u$  der Versuchskörper aufgezeichnet (siehe Abbildung 3, rechts). Aus diesen Messdaten konnte dann die Anzahl der aufgebrachten Lastwechsel  $N$  bestimmt werden.



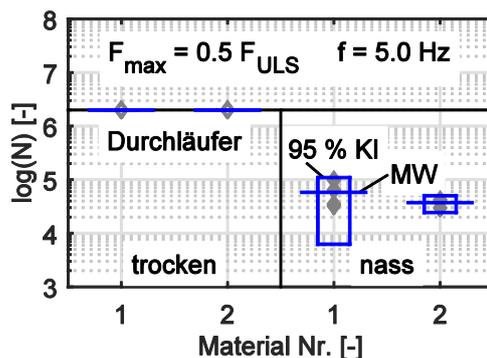
**Abbildung 3: Kleinskalige Versuchskörpergeometrie (links) und Unterwasserversuchsstand für Ermüdungsversuche (rechts)**

Nach Herstellung der Versuchskörper wurde zunächst die maximale Tragfähigkeit  $F_{ULS}$  in einem quasi-statischen Versuch bestimmt. Diese diente anschließend als Bezugsgröße für die maximale Druckbeanspruchung  $F_{max}$  in den Ermüdungsversuchen. Die minimale Beanspruchung  $F_{min}$  wurde aus regelungstechnischen Gründen zu einem Zwanzigstel von  $F_{max}$  gewählt. Das Belastungsniveau wurde während eines Ermüdungsversuches konstant gehalten, ebenso die Belastungsfrequenz. Mit Hilfe eines Wasserbeckens (siehe Abbildung 3) konnten trockene und nasse Umgebungsbedingungen hergestellt werden.

#### 3.2 Wassereinfluss

In Abbildung 4 sind die in den Versuchen erzielten ertragbaren Lastwechsel  $N$  dargestellt. Es wird unterschieden zwischen den beiden Füllmaterialien sowie den Umgebungsbedingungen trocken und nass. Die Belastungsbedingungen sind vergleichbar. Außer den Versuchsergebnissen sind die jeweiligen Mittelwerte (MW) und die 95 % Konfidenzintervalle (KI) dargestellt.

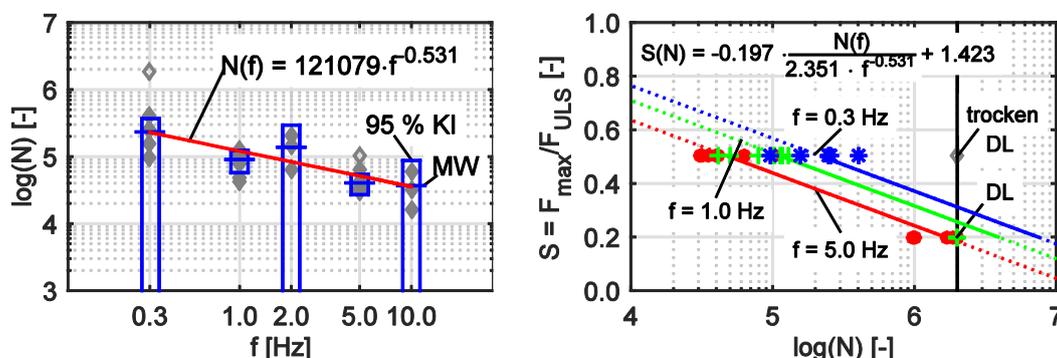
Unter trockenen Umgebungsbedingungen erreichten alle Versuchskörper das Abbruchkriterium von  $N = 2$  Mio. Lastwechseln. Unter nassen Umgebungsbedingungen versagten die Versuchskörper im Mittel nach  $N = 50.000$  Lastwechseln. Die Lebensdauer reduzierte sich also auf rund ein Vierzigstel. Für das gewählte Beanspruchungsniveau von  $F_{\max} = 0.5 F_{\text{ULS}}$  stellten bereits [Schaumann et al., 2010] kein Degradationsverhalten für Versuche unter trockenen Umgebungsbedingungen fest. [Schaumann et al., 2014] konnten diese Eigenschaft anhand des statischen Tragverhaltens erläutern. Die gezeigten Ergebnisse sprechen also für das Einführen zusätzlicher Schädigungsmechanismen bei Ermüdungsbeanspruchung unter Wasser.



**Abbildung 4: Anzahl ertragbarer Lastwechsel bei unterschiedlicher Umgebungsbedingung**

### 3.3 Frequenzeinfluss

Reale Grout-Verbindungen werden üblicherweise maßgebend im Bereich von  $f = 0.3$  Hz beansprucht. Um eine Übertragbarkeit der bei  $f = 5.0$  Hz erzielten Versuchsergebnisse in diesen Bereich zu ermöglichen, wurde eine Versuchsserie zum Frequenzeinfluss unter nassen Umgebungsbedingungen gefahren. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 links dargestellt.



**Abbildung 5: Belastungsfrequenzabhängige Lebensdauer bei kleinskaligen Ermüdungsversuchen unter Wasser (links) und daraus abgeleitete S-N-Kurve (rechts)**

Es zeigt sich mit Reduktion der Belastungsfrequenz eine Erhöhung der ertragbaren Lastwechsel. Auf Basis dieser Ergebnisse haben [Schaumann & Raba, 2015] eine frequenzabhängige Ermüdungskurve für die kleinskaligen Versuchskörper definiert (siehe Abbildung 5, rechts). Bemerkenswert ist, dass die Untersuchungen von [Waagaard, 1986] und [Soerensen, 2011] für Versuchskörper ohne umschnürende Stahlteile gegensätzliche Ergebnisse zeigten. Der Schädigungsprozess wird also durch das strukturelle Zusammenwirken von Grout und Stahl beeinflusst.

### 3.4 Schädigungsmechanismen unter Wasser

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.2 beschriebenen Schädigungsmechanismen konnten bei den Ermüdungsversuchen unter Wasser weitere Prozesse beobachtet werden (siehe Abbildung 2). Zunächst kommt es unter Belastung zu einem Öffnen der Kontaktfuge zwischen Stahl und Grout. Wasser kann in die Fuge eindringen und reduziert durch eine Art Hydroschmierung die Reibung zwischen Stahl und Grout. Die Wechselbeanspruchung führt zusätzlich zu einer Pumpwirkung, die in der Folge das durch Grout-Zermürbung gelöste Material ausspült. Darüber hinaus führen Porenwasserüberdrücke zu einer lokalen Grout-Schädigung, die zur Initiierung von Rissen führt.

Die Risse entlang der Druckstreben entstehen somit auf geringeren Lastniveaus als unter trockenen Umgebungsbedingungen.

#### 4 Danksagung

Die vorgestellten Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts „GROWup“ durchgeführt. Die Autoren danken dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMW, FKZ: 0325290) für die Förderung des Projektes und den Mitgliedern des Beraterkreises (DNV GL, Senvion SE, Siemens Wind Power, Wilke & Schiele Consulting GmbH und Bilfinger Marine & Offshore Systems GmbH) für ihre fachliche Unterstützung. Darüber hinaus danken die Autoren den Materialherstellern Densit und BASF. Abschließender Dank gilt dem Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover für die hervorragende projektinterne Zusammenarbeit.

#### 5 Literatur

- Billington, Colin J. & Lewis, H. G. (1978). The Strength of Large Diameter Grouted Connections in *Proceedings of the OTC*. Houston, USA, S. 291–301.
- Billington, Colin J. & Tebbet, Ian E. (1980). The Basis for New Design Formulae for Grouted Jacket to Pile Connections in *Proceedings of the OTC*. Houston, USA, S. 449–458.
- Det Norske Veritas (2014). *DNV-OS-J101, Design of Offshore Wind Turbine Structures*.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014). *DIN EN ISO 19902, Erdöl- und Erdgasindustrie – Gegründete Stahlplattformen*.
- Harwood, Robert G., u.a. (1996). Grouted Pile to Sleeves Connections: Design Provisions for the New ISO Standard for Offshore Structures in *Proceedings of the 15th OMAE*. Florence, Italy.
- Hümme, Julian (2015). Fatigue behaviour of high-strength grouting concrete tested under water in *Proceedings of the fib Symposium on Concrete - Innovation and Design*. Copenhagen, Sweden.
- Krahl, Nat W. & Karsan, Demir I. (1985). Axial Strength of Grouted Pile - to - Sleeve Connections. *Journal of Structural Engineering* 1114, S. 889–905.
- Lampert, William B., Jirsa, James O. & Yura, Joseph A. (1986). *Grouted Pile-to-Sleeve Connection Tests: PMFSEL Report No. 86-7*. Austin, USA.
- Nygaard, Kjell, u.a. (1992). *High Strength Concrete, SP3 - Fatigue: Report 3.1: The Influence of Moisture Conditions on the Fatigue Strength of Concrete*. Trondheim, Norway.
- Schaumann, Peter, Bechtel, Anne & Lochte-Holtgreven, Stephan (2010). Fatigue Performance of Grouted Joints for Offshore Wind Energy Converters in Deeper Waters in *Proceedings of the 20th ISOPE*. Beijing, China, S. 672–679.
- Schaumann, Peter & Raba, Alexander (2015). Influence Of The Loading Frequency On The Fatigue Performance Of Submerged Small - Scale Grouted Joints in *Proceedings of the 12th DEWEK*. Bremen, Germany.
- Schaumann, Peter, Raba, Alexander & Bechtel, Anne (2014). Effects of Attrition Due to Water in Cyclically Loaded Grouted Joints in *Proceedings of the 33rd OMAE*. San Francisco, USA.
- Schaumann, Peter & Wilke, Fabian (2006). Fatigue Assessment of Support Structures of Offshore Wind Energy Conversion Systems, in Schaumann, Peter & Peinke, Joachim (Hg.) in *Annual Report 2005*. Hannover, Germany, S. 36–39.
- Soerensen, Eigil V. (2011). Fatigue Life of High Performance Grout in Dry and Wet Environment for Wind Turbine Grouted Connections in *Proceedings of the EWEA Offshore*. Amsterdam, Netherlands.
- Waagaard, Knut (1986). Experimental Investigation on the Fatigue Strength of Offshore Concrete Structures in *9th Annual Energy Technology Conference*. New Orleans, USA, S. 73–81.