

# Ausführungstechnische Einflüsse auf Aspekte der Tragsicherheit von Grouted Joints

Grouted Joints sind Rohr-in-Rohr-Steckverbindungen, die typischerweise beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen verwendet werden. Sie verbinden beispielsweise die geramnten Gründungspfähle mit dem aufgehenden Teil der Unterstruktur bei allen bislang in Deutschland verwendeten Bauarten vom Monopile bis zum Jacket. Der Ringspalt zwischen den Rohren unterschiedlichen Durchmessers, der zum Ausgleich von Exzentrizitäten und Schiefstellungen aus dem Rammprozess erforderlich ist, wird auf hoher See mit einem hochfesten Feinkornbeton (Grout) verfüllt, um eine kraft- und formschlüssige Verbindung herzustellen.

In diesem Fachaufsatz wird auf den Stand der Normung, auf die ausführungsbedingten Besonderheiten und den Verfüllvorgang selbst eingegangen. Aufgezeigt werden die Anforderungen an die Materialeigenschaften zur Sicherstellung eines störungsfreien Verfüllvorgangs. Weiterhin wird der Ausführungsprozess analysiert, um mögliche Fehlerfaktoren ausfindig zu machen. Es werden zwei Ansätze zur experimentellen Simulation von Verfüllvorgängen im Labor- und im Großmaßstab vorgestellt. Daraus können Erkenntnisse bezgl. der Fließwege des Materials im Ringspalt hergeleitet werden. Weiterhin werden Ergebnisse zur Materialdruckfestigkeit, die aus Proben aus solchen Verfüllversuchen gewonnen wurden, diskutiert.

**Keywords** Grouted Joint; Grout-Material; Offshore-Windenergieanlagen; Prüfverfahren; Bauausführung, offshore; In-situ-Materialkennwerte

## Influences of in situ production of grouted joints on aspects of structural safety

Grouted joints represent tube-in-tube connections which are typically used for the construction of offshore wind turbines. These connections connect, for example, the driven pile to the topside of the substructure of all constructions used in Germany up to now, from monopiles to jacket substructures. The gap between the tubes of different sizes is later filled with a high-performance grout to secure a force- and form-fitting connection. These connections compensate the tolerances caused by the pile-driving process.

This scientific paper shows the regulations used for grouted joints and the special characteristics of the filling process itself. The requirements of the material behavior of grout to secure an undisturbed filling process are also shown. Furthermore, the erection process and possible failures during this process are analyzed. Two approaches for the experimental simulation of the filling process are shown in laboratory scale and in real scale. Hence, new results considering the flow behaviour of grout materials in the gap of grouted joints can be derived. Finally, results of these filling tests considering the compressive strength are shown and discussed.

**Keywords** grouted joint; grout material; offshore wind turbines; mock-up tests; offshore grouting procedure; in situ material properties

## 1 Einleitung

Grouted Joints sind Rohr-in-Rohr-Steckverbindungen, die typischerweise beim Bau von Offshore-Windenergieanlagen verwendet werden. Sie verbinden beispielsweise die geramnten Gründungspfähle mit dem aufgehenden Teil der Unterstruktur bei allen bislang in Deutschland verwendeten Bauarten vom Monopile bis zum Jacket. Bild 1 zeigt einen Teil einer Tragstruktur in Jacket-Bauweise, bei der die Stahlhülsen am Fuß gut zu erkennen sind. Der Ringspalt zwischen den Rohren unterschiedlichen Durchmessers, der zum Ausgleich von Exzentrizitäten und Schiefstellungen aus dem Rammprozess erforderlich ist, wird auf hoher See üblicherweise mit einem hochfesten Feinkornbeton (Grout) verfüllt, um eine kraft- und formschlüssige Verbindung herzustellen. Oft liegt diese Ver-

bindung unter Wasser oder in der Wasserwechselzone, wodurch die Anforderungen an die Bauausführung zusätzlich verschärft werden. Hier ist es wichtig, die sicherheitsrelevanten Einflussfaktoren aus dem Herstellungsprozess zu analysieren und zu bewerten (s. Abschn. 3.3).

## 2 Stand der Normung

Grouted Joints gehören in Deutschland nicht zu den geregelten Bauarten. Ebenso wenig liegt für die verwendeten Baumaterialien für diesen Anwendungsfall eine allgemein bauaufsichtlich anerkannte Verwendbarkeit vor. Somit ist eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für jede Grouted-Joint-Verbindung erforderlich.

In Ermangelung direkt anwendbarer deutscher oder europäischer Normen werden im Rahmen der für den ZiE-Prozess erforderlichen Gutachten häufig fachnahe bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke wie DIN EN 1992 [1], DIN EN 206 [2] in Verbindung mit DIN1045-2 [3] und

\*) Corresponding author: m.werner@baustoff.uni-hannover.de  
Submitted for review: 16 June 2014  
Revised: 02 July 2014  
Accepted for publication: 03 July 2014



**Bild 1** Jacket-Tragstruktur mit Stahlhülsen für die Grouted Joints  
Part of a supporting structure build as a jacket including the sleeves  
of the grouted joints

DIN1045-3 [4] oder die „DAfStb-Vergussbetonrichtlinie“ [5] herangezogen. Darüber hinaus werden auch internationale Normen für die Bemessung verwendet, wie beispielsweise die DIN EN ISO 19902 [6], z. B. bei der Bemessung von jacketartigen Tragstrukturen. Diese aus der Öl- und Gasindustrie stammende Norm hat international eine große Bedeutung für die Auslegung von Offshore-Konstruktionen. Da sie in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt ist, kann sie für Offshore-Windenergieanlagen nicht direkt angewendet werden. Außerdem fokussiert diese Norm nicht auf hochfeste Grout-Materialien, sondern vielmehr auf sogenannte OPC-Grouts (OPC = Ordinary Portland Cement). Wird beim Design von Grout-Verbindungen in Deutschland dennoch auf sie zurückgegriffen, ist u. a. zu berücksichtigen, dass der Anwendungsbereich der Norm auf Druckfestigkeiten des Grout-Materials bis  $80 \text{ N/mm}^2$  begrenzt ist. Die hierzulande verwendeten hochfesten Grout-Materialien weisen in der Regel eine Druckfestigkeit von mehr als  $120 \text{ N/mm}^2$  auf. Somit kann die vorhandene höhere Materialfestigkeit ggf. nicht voll beim Tragsicherheitsnachweis angesetzt werden. Hieraus können sich zusätzliche Tragreserven ergeben, die möglicherweise bei einer abschließenden Sicherheitsbewertung von Grout-Verbindungen als eine Art „versteckte“ Sicherheit in einer Zuverlässigkeitsanalyse berücksichtigt werden könnten. Generell muss also für den jeweiligen Einzelfall überprüft werden, ob eine Übertragbarkeit der DIN EN ISO 19902 auf hochfeste Grout-

Materialien bezüglich ihrer Steifigkeit, Reibungsbeiwerte und Schwindverformungen möglich und sinnvoll ist. Insbesondere kann das autogene Schwinden diskutiert werden, das auch bei Verbindungen unter Wasser entsteht und tendenziell mit steigender Druckfestigkeit des Grout-Materials größer wird. Das autogene Schwinden kann sich u. a. auf die Reißneigung des Grout-Körpers, die Steifigkeit der Verbindung und den Kontakt des Grout-Materials zum äußeren Stahlrohr auswirken.

Weiterhin wird in Deutschland im Rahmen des Designs von Grout-Verbindungen manchmal auch auf die norwegische Norm NORSOK N-004 [7] zurückgegriffen. Als Besonderheit wird hierin für bestimmte Randbedingungen eine zusätzliche Bewehrung innerhalb der Grout-Verbindung gefordert. Unter ungünstigen Umständen kann eine solche Bewehrung erhebliche Auswirkungen auf das Fließverhalten des Grout-Materials im Spalt haben und sollte daher in einer Risikobewertung der Verarbeitungseinflüsse besonders berücksichtigt werden.

Private Organisationen wie der Zertifizierer Det Norsk Veritas (DNV) oder der Germanische Lloyd (GL) (jetzt Zusammengeschlossen zu DNV-GL) sprechen zu Grout-Verbindungen ebenfalls Empfehlungen in Form privatrechtlicher Richtlinien aus [8 bis 11].

Letztlich ist im Einzelfall zu überprüfen, ob die in den angeführten Normen oder in den privatrechtlichen Richtlinien enthaltenen Ansätze für das jeweilige Projekt relevant sind.

Des Weiteren haben beim DIN gerade deutsche Normungsaktivitäten zur Bautechnik von Windenergieanlagen begonnen, die auch die Grouted Joints beinhalten.

Derzeit wird für die Windparks, die in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) liegen, die ZiE vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie erteilt. Der Ablauf des Genehmigungsverfahrens ist z. B. ausführlich in [12] beschrieben. Um dieses Verfahren zu vereinfachen, hat das BSH Empfehlungen zur Konstruktion und Ausführung in [13, 14] zusammengestellt.

### 3 Ausführungstechnische Einflüsse auf die Materialeigenschaften

Wie in [15] erläutert, werden bislang in der ingenieurtechnischen Gesamttragstrukturmodellierung Grouted Joints in aller Regel vereinfachend als Stahlrohre mit dem Durchmesser der Ramppfähle angenommen und biegesteif an die Unterkonstruktion angeschlossen. Selbst in speziellen Berechnungsverfahren für Grout-Verbindungen werden häufig vereinfachende Material-Modellannahmen, z. B. nach DRUCKER-PRAGER, zugrunde gelegt. Nur wenige neue wissenschaftliche Abhandlungen bilden hier mit erweiterten Materialmodellen das Tragverhalten des Grout-Materials genauer ab [16]. In realen Tragstrukturen hingegen können Grout-Verbin-

dungen (s. Bild 1) sehr wohl einen Einfluss auf die Steifigkeit und das Tragverhalten der Struktur haben, da Rissbildungen nicht nur infolge Belastung, sondern allein schon infolge autogenen Schwindens auftreten können. Weiterhin können systemspezifische und ausführungsbedingte Fehlstellen im Grout-Material mit daraus resultierenden Festigkeitseinbußen nicht a priori ausgeschlossen werden. Hieraus können negative Auswirkungen auf die Tragsicherheit und Dauerhaftigkeit von Grouted Joints entstehen.

Die Eigenschaften der Grout-Materialien sind zwar gut in Laborversuchen dokumentiert, jedoch sind in der Literatur bislang keine entsprechenden Materialkennwerte von im realen Bauteil eingebrachtem Grout-Material in Offshore-Windenergieanlagen veröffentlicht. Selbst Proben, die aus realitätsnahen sogenannten „Mock-Up-Tests“ gewonnen wurden, können die rauen Offshore- und Unterwasserbedingungen nicht vollumfänglich abbilden. Die Unsicherheiten, die sich bezüglich der ausführungsbedingten Einflüsse auf die Materialeigenschaften ergeben, haben auch Zertifizierer von Offshore-Windenergieanlagen, wie der Germanische Lloyd, erkannt. Wie in Abschn. 2 angesprochen, wird in der kürzlich veröffentlichten Technical Note [11] ein Abminderungsfaktor  $\gamma_{\text{Offshore}} = 1,1$  für die Druckfestigkeit des Grout-Materials eingeführt. Dieser Faktor kann durch experimentelle Nachweise angepasst werden – wie, wird jedoch nicht näher spezifiziert. Hier besteht also noch Forschungsbedarf hinsichtlich Prüfverfahren und Risikobewertungen bezüglich des Verfüllvorgangs. Weiterhin besteht Bedarf, Grout-Verbindungen bewerten zu können, bei denen es im Laufe des Verfüllvorgangs zu Unregelmäßigkeiten gekommen ist. Bei der Ausführung derzeitiger Offshore-Windparks hat sich gezeigt, dass es durchaus zu Störfällen während des Verfüllvorgangs kommen kann. Insbesondere sind des Öfteren Undichtigkeiten der Abschlussdichtung (groutseal) aufgetreten, sodass die Verfüllung in zahlreichen Fällen in zwei Abschnitten mit deutlichen Bauzeitverzögerungen realisiert werden musste. Ob solche Störfälle maßgebende Auswirkungen auf das Tragverhalten und die Dauerhaftigkeit der Grout-Verbindung haben, ist in einem nächsten Schritt zu überprüfen.

### 3.1 Anforderungen an Grout-Materialien

Da die Ausführung der Grout-Arbeiten vor Ort auf hoher See und, je nach Art der Konstruktion, über Wasser, in der Wasserwechselzone oder unter Wasser erfolgt, wirken zahlreiche unterschiedliche Einflüsse auf das Material ein (siehe [17]). Aufgrund der Abmessungen von Offshore-Windenergie-Anlagen muss das Grout-Material zudem teilweise mehr als 100 m weit gefördert werden, um den Ringspalt zu befüllen. Hierdurch sind hohe Anforderungen an die Fließfähigkeit und Mischungsstabilität des Materials zu erfüllen. Um ganzjährig Windparks bauen zu können, muss das Grout-Material in einem Temperaturbereich von etwa 1 bis 5 °C bzw. ca. 30 °C über mehrere Stunden pumpfähig, fließfähig und verarbeitbar sein und

es sollte, nachdem der Ringspalt gefüllt ist, möglichst schnell erhärten, um der permanenten Wind- und Wellenbelastung widerstehen zu können [18]. Das Hochleistungsmaterial erfordert eine relativ lange, unbedingt einzuhaltende Mischzeit, um alle Feinstoffe ausreichend aufzuschließen und homogenisieren zu können, welches die Anforderungen an die Verarbeitung und Qualitätssicherung offshore weiter erhöht.

### 3.2 Misch- und Verfüllprozess

Das Grout-Material wird aus einer vorgefertigten Trockenmörtelmischung auf einem Errichterschiff oder einer Jack-Up-Barge mit Trinkwasser angemischt. Nach dem Mischvorgang wird das Grout-Material in eine Pumpeinheit geleitet und über flexible Schlauchleitungen und starre Förderleitungen bis zur Unterkante der Grout-Verbindung gefördert. Hier gelangt es in einen Verteilerkanal, um über mehrere Auslässe den Ringspalt zwischen den beiden Rohren gleichmäßig zu füllen. Nach unten hin wird das Material durch eine Abschlussdichtung gehalten.

Der Verfüllvorgang ist aufgrund seiner Komplexität, der Offshore-Umgebungsbedingungen und der Exposition der Verbindung nur schwer zu überwachen. Bei Verbindungen unter Wasser ist eine Überwachung des Füllgrades im Ringspalt teilweise unter Verwendung eines Remotely Operated Vehicle (ROV) möglich, wie es z. B. in der Öl- und Gasindustrie praktiziert wird [19]. Dennoch ist die Überwachung aufwändig und kompliziert. Um die hohen Anforderungen an die Frischbetoneigenschaften gewährleisten zu können, ist u. a. aufgrund von Produktionsschwankungen bei den verwendeten Zementen auf eine Identitätsprüfung der jeweiligen Material-Charge vor der Verwendung zu achten. All dies muss durch eine Eigen- und Fremdüberwachung der Bauausführung in Anlehnung an DIN 1045-3 [4] durchgeführt werden.

### 3.3 Fehleranalyse

Zur Minimierung von Fehlermöglichkeiten während des Verfüllvorgangs ist eine Fehleranalyse des Systems Grouted Joint schon in der Planungsphase sinnvoll. Hierbei sollten projektspezifische Einflüsse auf den Ausführungsprozess betrachtet werden. Dies sind z. B. die Wahl des Grout-Materials, die Geometrie und Position der Grout-Verbindung und die Herstellungsbedingungen, wie z. B. die geplante Jahreszeit, die Misch- und Pumptechnik sowie die Art des verwendeten Schiffs. Hierauf aufbauend können Grouted Joints bezüglich Fehlerrisiken während des Verfüllvorgangs betrachtet werden. Hierbei können u. a. die Lage der Verbindung, die Übergreifungslänge, die Breite des Ringspalts und die Geometrie der Förderleitungen relevant sein. Unplanmäßige Systemzustände und Fehlerzustände und deren Auswirkungen auf den sich ausbildenden Grout-Körper im Ringspalt und dessen Materialeigenschaften sollten analysiert und in eine Risikobewertung einbezogen werden. Hier werden

Ereignisse wie der Ausfall von Misch- und Pumpequipment, Schäden an der Abschlussdichtung und Verstopfen der Förderleitung betrachtet. Als weiterer Aspekt, der negative Auswirkungen auf den Grout-Körper haben könnte, sind Relativbewegungen zwischen den ineinandergesteckten Rohren zu nennen [20].

Durch eine Fehleranalyse des Systems und des Ausführungsprozesses können bereits in der Planungsphase Maßnahmen zur Fehlervermeidung getroffen und der Ausführungsprozess und die Konstruktion dementsprechend angepasst werden (siehe [21]). Nachträgliche Änderungen können nur mit hohem finanziellem Aufwand durchgeführt werden.

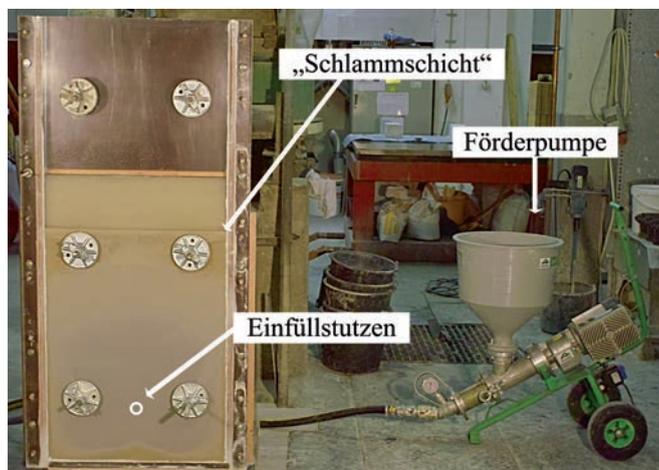
### 3.4 In-situ-Kennwerte von Grout-Material

Zur Beschreibung der Zustände im verfüllten Ringspalt sowie zur Bewertung möglicher Störfälle während des Verfüllvorgangs ist es erforderlich, Baustoffkennwerte von verfülltem Grout-Material zu erhalten. Hierzu ist eine Erfassung möglicher Unsicherheiten bei der Bauausführung nötig. Folgend wird ein Ansatz zur experimentellen Simulation von Verfüllvorgängen im Labormaßstab und auf großskaliger Ebene vorgestellt.

#### 3.4.1 Experimentelle Simulation von Grout-Verfüllungen im Labor

Zur Entwicklung eines geeigneten Versuchsstands wurden ausführungsbedingte Einflüsse auf das Grout-Material betrachtet und praktische Erfahrungen bei der Ausführung von Grouted Joints auf hoher See ausgewertet (siehe [17]). Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde ein Laborprüfstand zur experimentellen Simulation des Ausführungsprozesses entwickelt. Der Prüfstand besteht aus einer 1,5 m hohen, 0,6 m breiten Prüfschalung mit einer transparenten Frontseite zur visuellen Begutachtung. Über einen Einfüllstutzen wird die mit Wasser gefüllte Prüfschalung mit einer Förderpumpe vom unteren Ende über einen Förderschlauch befüllt. Zur Schmierung der Rohrwandung wird zunächst eine Vorlaufmischung (lubrication mix) eingefüllt. Auf einen in der Praxis üblichen „overflow“ wird bei diesen Versuchen verzichtet, um die Eigenschaftsverteilung des Verfüllmaterials vollständig erfassen zu können. Nach zwei Tagen Erhärtungszeit wird der hergestellte Grout-Körper ausgeschalt. Zur Bestimmung von Materialeigenschaften werden prismatische Probekörper mit den Dimensionen 4 cm × 4 cm × 16 cm aus verschiedenen Zonen des Grout-Körpers herausgetrennt (Bild 3). Als Bezugsgröße zu daran ermittelten Druckfestigkeiten wurden Probekörper mit den gleichen Abmessungen aus derselben Materialcharge im Labor hergestellt und nach sieben Tagen geprüft.

In Bild 2 ist ein solcher Verfüllvorgang dargestellt. Das ansteigende Grout-Material ist in der wassergefüllten Schalung durch die transparente Frontseite zu erkennen.



**Bild 2** Laborprüfstand für Verfüllversuche – hier ist bereits eine deutliche Zonierung im Grout-Material zu erkennen  
Laboratory testing facility for filling tests – a zoning of the grout material is clearly shown in this stage

Bisherige Versuche zeigten, dass das Grout-Material beim Verlassen des Förderschlauchs und somit beim Eintreten ins Wasser starken Turbulenzen ausgesetzt wird. Hierdurch wird das Grout-Material mit Wasser vermischt und es bildet sich eine „Schlammschicht“ mit geringer Festigkeit auf der Oberseite des Grout-Körpers aus.

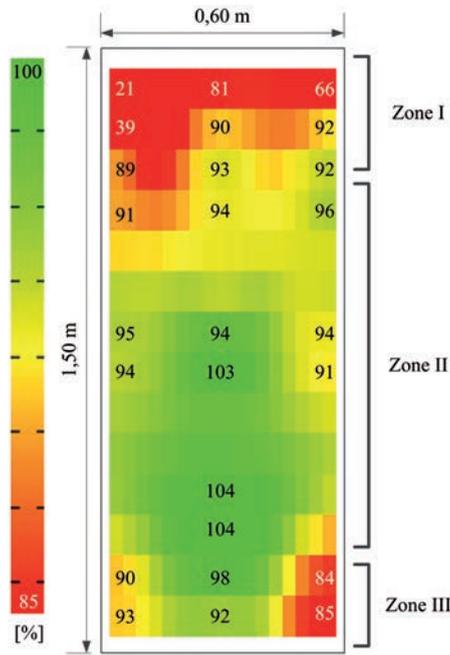
Zusätzlich zeigten erste Ergebnisse aus solchen Versuchen Druckfestigkeitseinbußen im oberen, aber auch im unteren Bereich des Grout-Körpers [21].

In Bild 3 sind die Ergebnisse eines Versuchs mit vollständig mit Wasser gefüllter Prüfschalung dargestellt. Die prozentuale Druckfestigkeitsverteilung ist auf einen sieben-Tage-Referenzwert von  $f_{c,ref} = 108 \text{ N/mm}^2$  bezogen.

Der entstandene Probekörper lässt sich grob in drei Zonen einteilen. Im oberen Bereich (Zone I) lagert sich vermehrt eine Mischung aus Grout-Material, Vorlaufmischung und Wasser ab. Hier stellen sich partiell Druckfestigkeitsreduktionen bis etwa 80 % ein. Ein zweiter Bereich (Zone II) befindet sich im mittleren Teil und lässt sich durch eine hohe Druckfestigkeit charakterisieren, die teilweise über der Referenzprobekörper liegt. Ein dritter Bereich (Zone III) befindet sich am Fuß des Grout-Körpers. Hier lagert sich, insbesondere in den Randbereichen, in geringem Maße vermisches Material ab, was jedoch nur zu vergleichsweise geringen Reduktionen der Druckfestigkeit von bis zu 16 % geführt hat.

#### 3.4.2 Großprüfstand für Verfüllversuche

Auf Grundlage der Ergebnisse und der beobachteten Phänomene der Verfüllversuche im Projekt „Probabilistic Safety Assessment of Offshore Wind Turbines (PSA)“ (MWK, Support Code GZZM2547) wurde im Forschungsprojekt „Überwiegend axial wechselbeanspruchte Grout-Verbindungen in Tragstrukturen von OWEA



**Bild 3** Bezogene Druckfestigkeiten einer im Laborprüfstand hergestellten Versuchswand  
Compressive strength in percent of a test wall produced in the laboratory testing facility



**Bild 4** Kippbarer Großprüfstand für Verfüllversuche [22]  
Large scale testing facility for filling tests with tilting device

(GROWup)“ (BMW, Ref. No. 0325290) eine großskalige Prüfeinrichtung für Verfüllversuche entwickelt. Dieser Großprüfstand ist in Bild 4 dargestellt.

Der Großprüfstand besteht aus einer transparenten Rahmentragschalung, einem Kipprahmen, um den Probekörper zur Beprobung in die Horizontale legen zu können, einer Misch- und Verfülleinheit und umfangreicher Messtechnik innerhalb und außerhalb der Prüfschalung.

Versuche mit planmäßigem Verfüllvorgang unterschiedlicher Grout-Materialien zeigten, dass sich innerhalb der wassergefüllten Großprüfschalung jeweils nahezu identische Fließwege ausbilden.

Exemplarisch ist eine thermografische Aufnahme des Verfüllvorgangs in Bild 5 dargestellt. Zu diesem Zeitpunkt (ca. 160 Minuten nach Versuchsbeginn) war der Verfüllvorgang beinahe abgeschlossen. In diesem Versuch wurde die wassergefüllte Großprüfschalung durch eine flexible, 26 m lange zwei-Zoll-Förderleitung verfüllt.

Durch den Misch- und Pumpvorgang wird zusätzliche Scherenergie in das Grout-Material eingebracht. Somit ist das Material wärmer als die Umgebung und das Wasser in der Schalung. Beim Eintritt in die Schalung kühlt das Grout-Material ab. In Bild 5 kann das bereits abkühlende Material in den seitlichen Randbereichen erkannt werden (grün und gelb), das frisch eingebrachte Material ist hier nach der farbigen Temperaturskala in Rot dargestellt. Die Werte aus der thermografischen Aufnahme wurden mit Temperatursensoren in der Schalung verglichen.

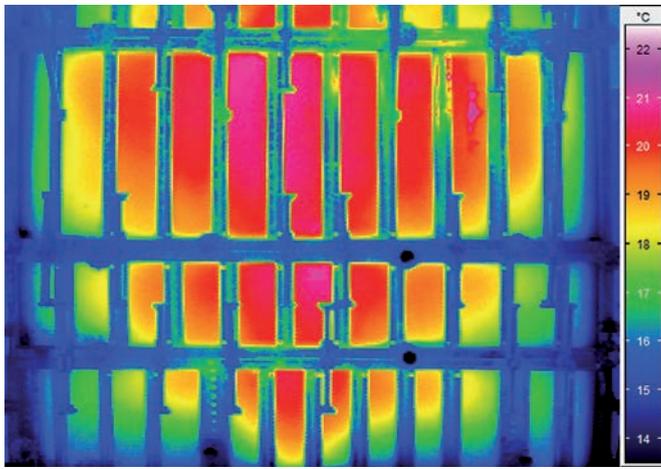
### 3.4.3 Diskussion und Bewertung

Der entwickelte Versuchsaufbau zur Simulation von Grout-Verfüllungen im Labor ist zur Betrachtung von Phänomenen, die sich bei der Grout-Verfüllung im Ringspalt ergeben, gut geeignet. Das Beispiel zeigte eine deutlich inhomogene Verteilung der Druckfestigkeit im Grout-Körper, obwohl die Sackware in parallel durchgeführten Laborprüfungen eine sehr gleichmäßige Qualität aufwies. Die Ausbildung verschiedener Zonen im Grout-Körper zeigt weiterhin, dass es sich hierbei um systematische und nicht um zufällige Abweichungen der Druckfestigkeit handelt. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass bei diesem Versuch quasi ideale Bedingungen vorherrschten, die die rauen Offshore-Bedingungen noch nicht vollständig simulieren, sodass weitere systematische Einflüsse zu berücksichtigen sind (siehe [17]).

Verfüllversuche im Großprüfstand zeigen, wie sich übliche Grout-Materialien während eines planmäßigen Verfüllvorgangs verhalten. Vom Einfüllstutzen aus bilden sich während des Verfüllvorgangs enge trichterförmige Fließwege nach oben hin aus. Das eingebrachte Material lagert sich an den Seiten des Fließwegs ab und frisches Grout-Material fließt innerhalb des „Trichters“ während des gesamten Verfüllvorgangs nach oben.

## 4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der im Labor simulierten Verfüllvorgänge haben gezeigt, dass derzeit angesetzte pauschale Abminderungen der Druckfestigkeit von Grout-Materialien nach



**Bild 5** Thermografieaufnahme während eines Verfüllvorgangs im Großprüfstand  
Thermography scan during a filling test in the large-scale testing facility

[11] nur bedingt geeignet erscheinen, weil sie nicht für alle Bereiche der Grout-Verbindung zutreffend sind. Vielmehr sollte bei der Bemessung der Grout-Verbindung über eine Einteilung in mehrere Zonen mit unterschiedlicher Druckfestigkeit des Grout-Materials nachgedacht werden. Alternativ können die Bereiche mit minder tragfähigem Material (Zonen I und III) in der Bemessung der Verbindung unberücksichtigt bleiben, um sicherzustellen, dass nur Bereiche mit Material, das mindestens der Festlegung entspricht, in die Bemessung mit einfließen. Zunächst ist es sinnvoll, wie in [21] und nun auch in der GL-Richtlinie empfohlen, das minder tragfähige Grout-Material durch einen „Überlauf“ aus der Verbindung zu entfernen. Diese Vorgehensweise ist zwar inzwischen in der Ausführungspraxis bei dem Bau von Offshore-Windenergieanlagen und schon lange in der Öl- und Gasindustrie [19] etabliert, wenn jedoch eine gravierende Störung, wie Maschinenausfall oder „Stopfer“ in der Leitung, während der Vergoutung eintritt, kann dieses minderfeste Material nicht mehr oder zumindest nicht sicher aus dem Grout-Spalt entfernt werden. Daher ist es empfehlenswert, die Möglichkeit einer „kalten Fuge“ mit verbleibendem minderfesten Material in der Bemessung zu berücksichtigen.

## Literatur

- [1] DIN EN 1992: *Eurocode2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [2] DIN EN 206: *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung Konformität*. Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [3] DIN 1045-2: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth Verlag, 2008.
- [4] DIN 1045-3: *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [5] DAFStb-Richtlinie: *Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DafStb, 2011.
- [6] DIN EN ISO 19902: *Erdöl- und Erdgasindustrie – Geplante Stahlplattformen*. Berlin: Beuth Verlag, 2014.
- [7] NORSOK standard N-004: *Design of steel structures Annex K*. Lysaker (Norwegen): Standards Norway, 2012.
- [8] DET NORSKE VERITAS (DNV): *Offshore Standard DNV-OS-J101 – Design for Offshore Wind Turbine Structures*. Høvik (Norwegen), 2010.
- [9] DET NORSKE VERITAS (DNV): *Offshore Standard DNV-OS-C502 – Offshore Concrete Structures*. Høvik (Norwegen), 2010.
- [10] Germanischer Lloyd: *Rules and Guidelines – Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines*. Hamburg, 2012.

Bisherige Versuche im Großprüfstand zeigten, dass sich bei einem planmäßig durchgeführten Verfüllversuch trichterförmige Fließwege des frisch eingebrachten Grout-Materials nach oben einstellen. Somit ist immer frisch eingebrachtes und ausreichend fließfähiges Material innerhalb des „Trichters“ in Bewegung. Aufgrund dieser Erkenntnis ist zu diskutieren, ob das Grout-Material über die gesamte geplante Verfüllzeit hoch fließfähig sein muss. Sollte das Grout-Material die Fließfähigkeit nicht über die gesamte geplante Verfüllzeit aufrecht erhalten können, bieten sich hier die Versuche im Großprüfstand oder Versuche im 1:1-Maßstab zur Überprüfung der Ausführbarkeit und zur Abschätzung der Ausführungsrisiken an.

Weitere Einflüsse wie autogene Schwindverformungen der Grout-Materialien (siehe [23]) oder Bewegungen der Groutverbindungen während der Erhärtungsphase des Grout-Materials [20] müssen ebenfalls in die Überlegungen zur Tragsicherheit einbezogen werden, um möglichst realistische Eingangsparameter für numerische Berechnungsverfahren, wie z. B. in [16], bereitstellen zu können und die hybride Verbindung Grouted Joint weiter in Richtung Tragsicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren.

Darüber hinaus ist in weiteren Untersuchungen geplant, die spezifischen Randbedingungen für reine Zementleim-Grouts zu analysieren. Solche sogenannten OPC-Grouts, die aus der Öl- und Gasindustrie bekannt sind und im Ausland häufig verwendet werden, erfordern hinsichtlich ihrer Tragsicherheit wesentlich weitergehende Überlegungen, auf die im Rahmen dieses Beitrags nicht näher eingegangen werden konnte.

Die Untersuchungen innerhalb des Verbundforschungsvorhabens „Probabilistische Sicherheitsbewertung von Offshore-Windenergieanlagen“ werden mit Landesmitteln des Niedersächsischen Vorabs gefördert. Im Rahmen dieses Projekts (siehe [24]) beschäftigen sich weitere Teilprojekte mit der zuverlässigkeitstheoretischen Analyse von OWEA-Tragstrukturen [15] und mit der Auswertung von Messdaten zu Umweltparametern [25].

- [11] Germanischer Lloyd: *GL Technical Note – Certification of Grouted Connections for Offshore Wind Turbines*. Hamburg, 2013.
- [12] LOHAUS, L.; SCHAUMANN, P.; BECHTEL, A.; GRIESE, R.; LINDSCHULTE, N.: *Zustimmung im Einzelfall für Grout-Verbindungen in Tragsrukturen für die Offshore-Windenergie*. Bautechnik 90 (2013), Heft 7, S. 402–409.
- [13] BSH-Standard: *Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, Dezember 2007.
- [14] BSH-Merkblatt: *Verfahrenshinweise für die Zustimmung im Einzelfall (ZIE) beim BSH – Groutverbindungen*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock, 2011.
- [15] KELMA, S.; SCHMOOR, K. A.; GORETZKA, J.; HANSEN, M.: *Sicherheitsaspekte der Tragstruktur von Offshore-Windenergieanlagen*. Bautechnik 91 (2014), Heft 8, S. 543–553.
- [16] LOCHTE-HOLTGREVEN, S.: *Zur Trag- und Ermüdungsfestigkeit biegebeanspruchter Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen*. Dissertation, Institut für Stahlbau, Leibniz Universität Hannover, 2013.
- [17] LOHAUS, L.; WERNER, M.: *Probabilistic aspects of Offshore Wind Turbines: Influence of in situ assembly of Grouted Joints*. In: Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems (Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering), Leiden (Niederlande), 2013, S. 2209–2213.
- [18] LOHAUS, L.; LINDSCHULTE, N.; SCHOLLE, N.; WERNER, M.: *Betontechnik für Grouted Joints – Baustoffliche und bauausführungstechnische Anforderungen*. Stahlbau 81 (2012), Heft 9, S. 689–694.
- [19] WELHAM, T. R.; GILFRIN, J. A.: *Installation of Grouted Pile-Sleeve Connections: A-state-of-the-Art Review*. 25th Annual OTC, Houston (USA), 1993.
- [20] LOHAUS, L.; COTARDO, D.; WERNER, M.: *A test system to simulate the influence of early age cycling on the properties of grout materials*. Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, Busan (Korea), 2014, S. 234–239.
- [21] WERNER, M.: *Grouted Joints in Offshore-Windenergieanlagen – Materialverhalten hochfester Vergussmörtel bei unplanmäßigen Ereignissen während des Verfüllvorgangs*. Tagungsband zur 1. DAfStb Jahrestagung 2013, Bochum, 2013, S. 347–354.
- [22] SCHOLLE, N.; WEICKEN, H.; WERNER, M.: *Windenergieforschung am Institut für Baustoffe*. In: Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres (Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Heft 12), Hannover, 2014, S. 31–40.
- [23] WEICKEN, H.: *Einfluss von Umgebungstemperaturen auf die autogenen Schwindverformungen von Vergussmörteln in Offshore Anwendungen*. Tagungsband zur 1. DAfStb Jahrestagung 2013, Bochum, 2013, S. 159–164.
- [24] HANSEN, M.; SCHMIDT, B.: *Sicherheit von Offshore-Windenergieanlagen*. Bautechnik 91 (2014), Heft 8, S. 525–532.
- [25] SCHMIDT, B.; ERNST, B.; WILMS, M.; HILDEBRANDT, A.; HANSEN, M.: *Messdatenbasierte Empfehlungen von Wind- und Wellenparametern für die Auslegung von Offshore-Windenergieanlagen*. Bautechnik 91 (2014), Heft 8, S. 533–542.

**Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus  
Dipl.-Ing. Michael Werner  
Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe  
Appelstr. 9A  
30167 Hannover  
institut@baustoff.uni-hannover.de  
m.werner@baustoff.uni-hannover.de