

Einfluss des Early-Age-Movement auf die Eigenschaften von Grout-Materialien

Dario Cotardo, Prof. Michael Haist, Prof. Ludger Lohaus

Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG:

Der Einfluss des sog. Early-Age-Movement (EAM) – d. h. der durch Wind und Wellengang bedingten zyklischen Relativverschiebung zweier durch Hochleistungsbeton (sog. Grout-Material) zu verbindenden Stahlbauteile von Offshore-Windenergieanlagen – auf die rheologischen Eigenschaften des Grout-Materials ist bislang nur unzureichend erforscht. Ein aktueller Ansatz, der eine Kombination aus rotatorischen und oszillatorischen Scherversuchen darstellt, wurde im Rahmen dieses Beitrages verwendet, um den Einfluss des EAM auf die Rheologie von Grout-Materialien quantitativ zu erfassen. Weiterhin wird der Einfluss aus dem EAM auf die Druckfestigkeit des erhärteten Grout-Materials beschrieben. Es konnte festgestellt werden, dass mit geringerem Wassergehalt ein beschleunigter Anstieg der rheologischen Eigenschaften eintritt. Dies wird auf den geringeren Partikelabstand in der Suspension des Grout-Materials mit geringerem Wassergehalt zurückgeführt. Darüber hinaus tritt mit größerem Oszillationswinkel eine beschleunigte Zunahme der rheologischen Eigenschaften ein, was auf Agglomerations- und Entlüftungsprozesse zurückzuführen ist. Letzteres erhöht die Druckfestigkeit des erhärteten Grout-Materials.

Keywords: Grouted Joints für Offshore-Tragstrukturen, Grout-Material, Early-Age-Movement, Rheologie;

ABSTRACT:

The influence of the phenomenon Early-Age-Movement (EAM) on the rheological properties of grout is vastly unexplored so far. A new approach, which represents a combination of rotational and oscillatory shear tests, was used in order to investigate the influence of EAM on the rheology of grout. Furthermore, the influence of EAM on the compressive strength of hardening grouts was investigated. It could be shown that the lower the water content of the grout, the more accelerated an increase in rheological properties is. This was ascribed to the reduced interparticle distance with reduced water content. In addition, a greater oscillation angle leads to an accelerated increase in rheological properties, which is concluded to result by extrinsic agglomeration processes superimposed by a deaeration of the grout. The last effect results in a greater compressive strength of the hardened grout.

Keywords: Grouted Joints for Offshore Plants, Grout Material, Early-Age-Movement, Rheology;

1 EINLEITUNG

Grouted-Joint-Verbindungen sind für die Installation von Offshore-Tragstrukturen (Windenergieanlagen und Plattformen) eine nahezu unverzichtbare Methode, um den in den Meeresboden gerammten Gründungspfahl mit der stählernen Unterstruktur der Windenergieanlage zu verbinden. Grouted-Joint-Verbindungen stellen eine hybride Rohr-in-Rohr-Steckverbindung dar. Der zwischen den Stahlrohren (Pfahl und Hülse) unterschiedlichen Durchmessers entstehende Ringspalt, wird mit einem zementgebundenen Baustoff, dem sogenannten Grout-Material, verfüllt (Bild 1). Nach der Erhärtung des Grout-Materials liegt eine kraft- und formschlüssige Verbindung vor, sodass die einwirkenden Lasten – vor allem die aus dem Eigengewicht der Konstruktion – in den Meeresboden abgetragen werden können.

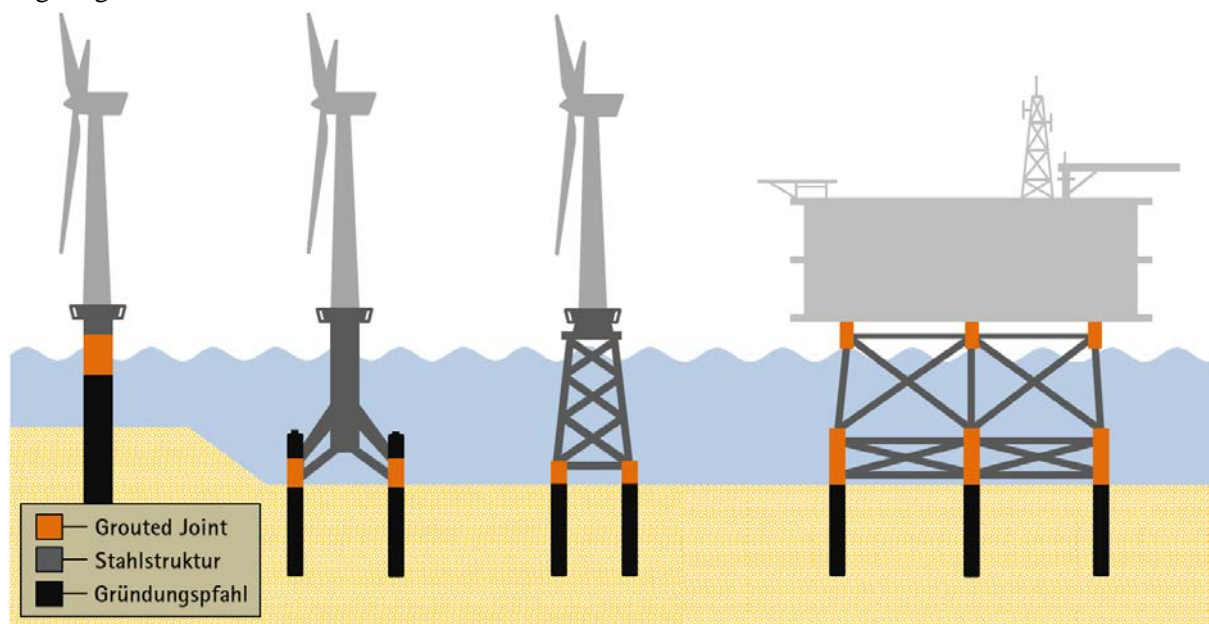


Bild 1: Schematische Darstellung von Tragstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen (von links nach rechts: Monopile, Tripile, Jacket) und Plattformen

Beginnend mit der Installationsphase, in der das Grout-Material über viele Stunden im flüssigen Zustand vorliegt, ist es welleninduzierten Relativverschiebungen zwischen dem Gründungspfahl und der Hülse ausgesetzt. Sofern keine aufwendigen und kostspieligen konstruktiven Gegenmaßnahmen getroffen werden, kann das als Early-Age-Movement (EAM) bezeichnete Phänomen (Bild 2) bereits bei geringen Wellenhöhen, also bei vergleichsweise häufig vorkommenden Wetterbedingungen, auftreten.

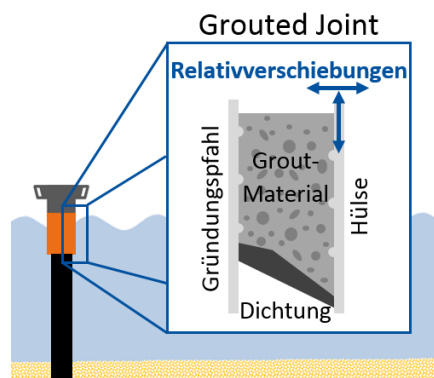


Bild 2: Schematische Darstellung des Early-Age-Movement in Grouted Joints während der Installationsphase

Der Einfluss des EAM auf die in-situ Eigenschaften des Grout-Materials ist bislang nur unzureichend erforscht (Cotardo et al. 2019a, Cotardo et al. 2019b), was dazu führt, dass in aktuellen Normen dem Phänomen EAM restriktiv begegnet wird (DNVGL 2018, DIN EN ISO 2014), was eine Einschränkung der Wirtschaftlichkeit der Bauweise darstellt.

2 STAND DER FORSCHUNG

Die den Normen zugrunde gelegten Erkenntnisse zum Einfluss des EAM auf das Tragverhalten von Grouted-Joints gehen auf experimentelle Untersuchungen zurück, die in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführt wurden (Billington et al. 1980, Tebbett et al. 1985, Ingebrigtsen et al. 1990). Es konnte ein schädigender Einfluss während der Erhärtung zyklisch belasteter Grout-Materialien auf die Tragfähigkeit kleinskaliger Grouted-Joint-Verbindungen beobachtet werden (Lotsberg 2013).

Die aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse sind allerdings nur bedingt auf heutige Offshore-Tragstrukturen übertragbar, da im Gegensatz zum heutigen Design in den damaligen Untersuchungen geringere Spaltmaße und Grout-Materialien mit geringer Leistungsfähigkeit betrachtet wurden. Ungeachtet dessen beschränken aktuelle Normen die maximale Relativverschiebung zwischen den Stahlkomponenten des Grouted Joint (Gründungspfahl und Hülse) während der ersten 24 Stunden auf 1 mm. Der Nachweis in der Bemessung soll den Normen gemäß für unvergossene Grouted-Joint-Verbindungen geführt werden. Allerdings wird nicht näher darauf eingegangen, wie ein solcher Nachweis konkret zu führen ist. Weiterhin wird vorgeschrieben, dass bei Überschreitung des Grenzwertes entsprechende Gegenmaßnahmen zu treffen sind, die die maximale Relativverschiebung auf 1 mm beschränken. Der in der Norm auf das EAM eingehende Abschnitt endet mit dem Hinweis, dass das EAM noch immer Gegenstand der Forschung ist (DNVGL 2018).

Aktuelle Untersuchungsergebnisse zum Einfluss des EAM zeigen, dass zyklische Bewegungen im frischen Zustand des Grout-Materials das Eigenschaftsbild infolge von Entmischungsercheinungen beeinflussen können (Lohaus et al. 2014a, Lohaus et al. 2014b, Lohaus et al. 2015a, Lohaus et al. 2015b). Permanente zyklische Bewegungen des frischen Grout-Materials können zu einer Verflüssigung führen, infolge dessen die Sedimentation granularer Zuschlagstoffe und Entlüftungsvorgänge zu Inhomogenitäten führen, was sich in den mechanischen Eigenschaften des erhärteten Grout-Materials bemerkbar macht. Für die in (Lohaus et al. 2015a) und (Lohaus et al. 2015b) durchgeführten Untersuchungen wurden die resultierenden Relativverschiebungen (basierend auf Seegangsszenarien der deutschen Nordsee, FINO 1) einer Monopile-Unterstruktur durch numerische Simulationen berechnet und experimentell nachgestellt. Es hat sich gezeigt, dass bereits bei geringen Wellenhöhen Relativverschiebungen auftreten können, die den in (DNVGL 2018) festgeschriebenen Grenzwert von 1 mm deutlich überschreiten. Jedoch sei darauf hingewiesen, dass die numerischen Analysen bislang stets für nicht vergossene Grouted-Joint-Verbindungen durchgeführt wurden, so wie es in (DNVGL 2018) vorgesehen ist. Schlichtweg fehlen derzeit entsprechende Ansätze, die eine vergossene Grouted-Joint-Verbindung berücksichtigen. Gleichwohl kann davon ausgegangen werden, dass das in den Ringspalt eingebrachte Grout-Material als zeitvarianter Dämpfer die maximal auftretende Relativverschiebung mindert und aus diesem Grund berücksichtigt werden sollte.

Zur Erfassung des hydratationsbedingten Ansteif- und Erstarrungsverhaltens des Grout-Materials, ist es notwendig zeitabhängige Materialkennwerte unter zyklischen Belastungen zu bestimmen. Solche Kennwerte können anschließend als Eingangsgrößen in numerische Berechnungen resultierender Relativverschiebungen integriert werden. Zur Bestimmung von Materialkennwerten, die den frischen Zustand des Grout-Materials charakterisieren, bieten sich rheologische Methoden an.

Wesentliche rheologische Materialkennwerte für Grout-Materialien sind die Fließgrenze τ_0 und die plastische Viskosität μ , die mittels des Bingham-Modells aus rheologischen Messungen abgeleitet werden können.

Üblicherweise werden diese Kenngrößen durch rotationsgesteuerte rheologische Messungen bestimmt. Die resultierende Scherspannung τ wird in Abhängigkeit der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ gemessen und anschließend als Funktion von der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$ aufgetragen. Die resultierenden Fließkurven (Bild 3) können zur Bestimmung der zuvor genannten rheologischen Kennwerte herangezogen werden und ergeben sich nach Gl. 1.

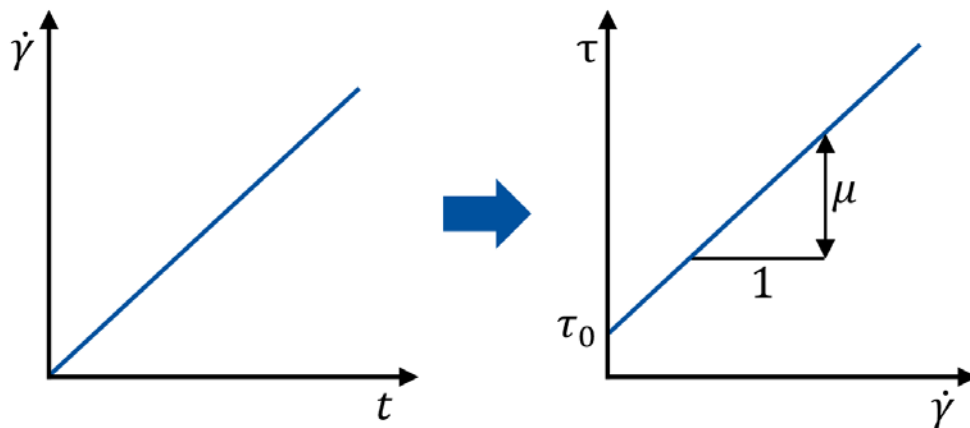


Bild 3: Darstellung einer rotationsgesteuerten rheologischen Messung (links) und die resultierende Fließkurve eines Bingham-Fluid (rechts)

Da Grout-Materialien eine ausgeprägte chemische Reaktivität besitzen, sind die beiden Materialkennwerte eine Funktion des Probenalters und damit von der Zeit t .

$$\tau(\dot{\gamma}, t) = \tau_0(t) + \mu(t) \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Die chemische Reaktivität verändert dabei sowohl die Partikelgrößenverteilung des Grout-Materials als auch das Interaktionsverhalten der suspendierten Partikel. Im Folgenden wird deshalb zwischen chemisch induzierten Strukturänderungen (d. h. hydrationsbedingte strukturelle Veränderungen) und Agglomerations- und Dispersions-induzierten Strukturänderungen unterschieden.

Grundsätzlich kann die Struktur frischer Zementsuspensionen durch Agglomerationszustände der Partikel als eine Funktion von der Scherbeanspruchung beschrieben werden. Agglomerate können durch einen scherbedingten Impulsaustausch (extrinsische Agglomeration) gebildet werden. Dabei muss der Energieeintrag – in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser – ausreichend hoch sein, sodass repulsive Kräfte, die zwischen zwei interagierenden Partikeln herrschen, überwunden werden. Während der Scherbelastung stellt sich ein belastungsspezifischer Gleichgewichtszustand zwischen strukturaufbauenden und strukturabbauenden Prozessen ein (Haist 2010, Kallmann et al. 1932).

Neben rotatorischen Scherversuchen können rheologische Eigenschaften auch mit oszillatorischen Scherversuchen (Bild 4) erfasst werden, bei denen die Probe nur geringen Belastungen für sehr kurze Zeitspannen ausgesetzt wird (Haist 2010). Unter Vorgabe des Oszillationswinkels φ und der Frequenz f wird verformungsgesteuert die Spannungsamplitude τ_A bestimmt. Die Scherverformung (Oszillationswinkel φ) beschreibt dabei eine Sinusfunktion, die in guter Näherung angewandt werden kann, um welleninduzierte Relativverschiebungen zu simulieren.

Eine Kombination aus rotatorischen und oszillatorischen Scherversuchen stellt nach Cotardo et al. (2019) eine geeignete Methode dar, um zeitabhängige Grout-Materialeigenschaften unter dem Einfluss des EAM zu bestimmen.

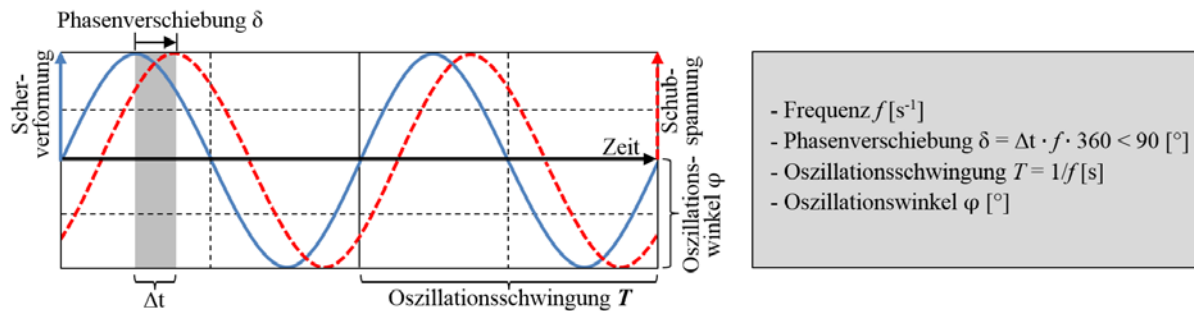


Bild 4: Exemplarische Darstellung eines oszillatorischen Scherversuchs einer zementgebundenen Suspension unter Vorgabe der Scherverformung (Oszillationswinkel φ)

3 ZIELSTELLUNG

Ziel der Untersuchungen war es, unter Anwendung der zuvor genannten Methode, den Einfluss des Oszillationswinkels (Relativverschiebung) auf die Rheologie von Grout-Materialien variierender Fließfähigkeit qualitativ zu erfassen. Darüber hinaus war es das Ziel, die aus dem rheologischen Verhalten resultierenden Auswirkungen auf die Druckfestigkeit des erhärteten Grout-Materials zu beschreiben.

4 MATERIALIEN UND METHODEN

Für die Untersuchungen wurde ein vorkonfektioniertes Grout-Material verwendet. Um den Einfluss des EAM auf die Rheologie des Grout-Materials variierender Fließfähigkeit zu erfassen, wurde das Grout-Material mit verschiedenen Wassergehalten hergestellt. Zur Herstellung der Materialproben wurde das Material mit einem Intensivmischer für eine Zeitdauer von 8 min gemischt. Die Fließfähigkeit der Materialproben wurde mit dem Haegermann-Versuch gemäß DIN EN 1015-3 2007 ermittelt. Das Ausbreitfließmaß wurde auf 150 mm (Materialprobe A), 300 mm (Materialprobe B) und 450 mm (Materialprobe C) eingestellt (siehe Bild 5).

Zur Ermittlung der rheologischen Eigenschaften von Grout-Materialien die unter dem Einfluss des EAM standen, wurden oszillatorische und rotatorische Scherversuche in Kombination angewandt, um einerseits welleninduzierte Relativverschiebungen zu simulieren und um andererseits rheologische Kennwerte des ansteyfenden Grout-Materials zu ermitteln. Die Scherversuche wurden mit einem Rotationsviskosimeter (Viskomat XL; Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH) durchgeführt, das mit einem sogenannten Betonpaddel für Langzeitmessungen bestückt wurde.

Aufgrund des Fehlens einer definierten Scherfläche und Spaltbreite werden bei diesem Gerät relative Kenngrößen bestimmt. Das Drehmoment T (entsprechend der Scherspannung τ) wird gemessen, während die Umdrehungsgeschwindigkeit Ω bzw. der Oszillationswinkel φ (entsprechend der Schergeschwindigkeit $\dot{\gamma}$) des Probengefäßes gesteuert werden. Für jede Probe wurde die Messung 30 Minuten nach Wasserzugabe gestartet. Zur Bestimmung der rheologischen Materialkennwerte wurden zu definierten Zeitpunkten durch ein abwärts gerichtetes Stufenprofil Fließkurven generiert, die genutzt wurden, um das Fließdrehmoment T_0 und die Steigung der Fließkurve $\Delta T/\Delta \Omega$ mit dem Bingham-Modell (Gl. 1) zu bestimmen.

Zur Nachstellung von welleninduzierten Relativverschiebungen folgte jeder rotatorischen Messung eine Oszillationsperiode für eine Dauer von 20 Minuten. Rotations- und Oszillationsperioden alternierten solange, wie die Leistungsfähigkeit des verwendeten Rheometers eine Messung zuließ. Für jede Konsistenz (A, B und C) wurde während der Oszillationsperioden ein Oszillationswinkel $\varphi_{i,1}$ von 10° angewendet. Die Materialprobe B wurde zusätzlich einem Oszillationswinkel $\varphi_{B,2}$ von $1,5^\circ$ ausgesetzt. Darüber hinaus wurde die Materialprobe B während der wiederkehrenden Oszillationsperioden einem Oszillationswinkel $\varphi_{B,3}$ von 0° ausgesetzt, d. h. die Probe war während dieser Messabschnitte in Ruhe, um das „ungestörte“ Materialverhalten zu erfassen. Die Frequenz f wurde für die Messungen zu 0,5 Hz gewählt.

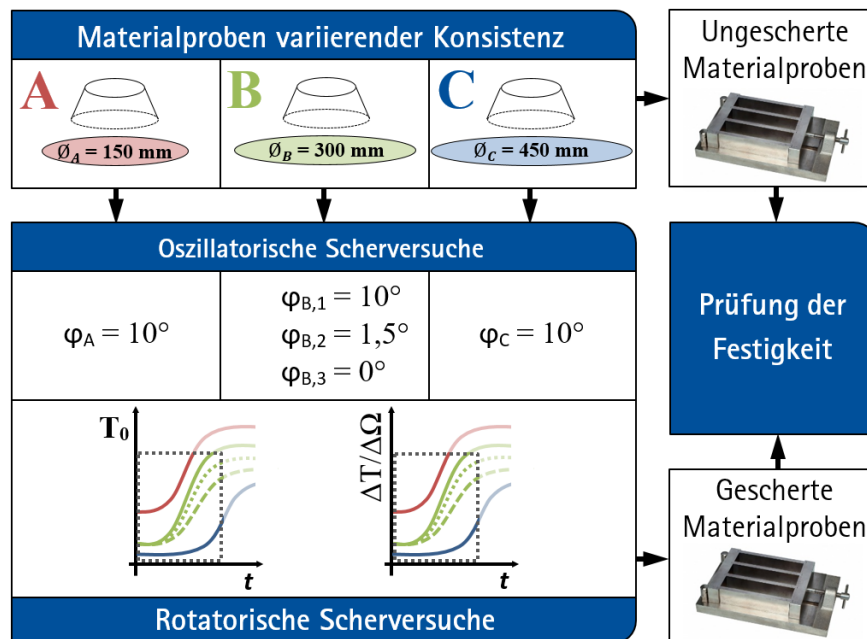


Bild 5: Darstellung des experimentellen Untersuchungsprogramms

Um auch den Einfluss des EAM auf die Druckfestigkeit des erhärteten Grout-Materials zu erfassen, wurden die Materialproben nach der Messung (geschert Proben) verwendet, um Probekörper zur Ermittlung der Druckfestigkeit herzustellen. Zusätzlich wurden Probekörper aus vollkommen ungescherten Material direkt nach dem Mischprozess jeder Materialprobe als Referenz hergestellt. Von jeder Materialprobe (geschert und ungeschert) wurden drei Probekörper mit einer Kantenlänge von $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ hergestellt und nach 7 Tagen gemäß (DIN EN 196-1 2016) geprüft. Die Proben wurden bis zur Prüfung unter Wasser gelagert.

5 VERSUCHSERGEBNISSE UND DISKUSSION

Bild 6 stellt die Ergebnisse der rotationsgesteuerten rheologischen Messungen dar. Dargestellt sind das Fließdrehmoment T_0 und die Steigung der Fließkurven $\Delta T/\Delta \Omega$ im Zeitverlauf.

Zunächst ist zu erkennen, dass sich die Variation im Wassergehalt in den rheologischen Materialkennwerten bemerkbar macht. Je geringer der Wassergehalt, desto größer sind das Fließdrehmoment T_0 und die Steigung der Fließkurven $\Delta T/\Delta \Omega$. Weiterhin weisen sämtliche Kurven, unabhängig vom Wassergehalt und des Oszillationswinkels φ , eine vergleichbare Charakteristik auf, nämlich einen hydratationsbedingt überproportionalen Anstieg der Materialkennwerte.

Wesentlichster Unterschied besteht im Zeitpunkt der messbaren Zunahme der jeweiligen Kennwerte in Abhängigkeit des Wassergehalts und des Oszillationswinkels. Es ist zu beobachten, dass mit geringerer Fließfähigkeit der Materialprobe (geringerer Wassergehalt) eine beschleunigte Zunahme der eigenschaftsbestimmenden rheologischen Kennwerte eintritt. Dies ist dadurch begründet, dass bei einem geringeren Wassergehalt der Materialprobe, der Abstand zwischen den Partikeln in der Suspension des Grout-Materials geringer ist. Infolgedessen können Porenräume durch das Wachstum früher Hydratationsprodukte rascher überbrückt werden. Dadurch wird die Beweglichkeit der Partikel untereinander behindert, wodurch sich der Widerstand des Grout-Materials gegenüber einer von außen einwirkenden Scherung erhöht.

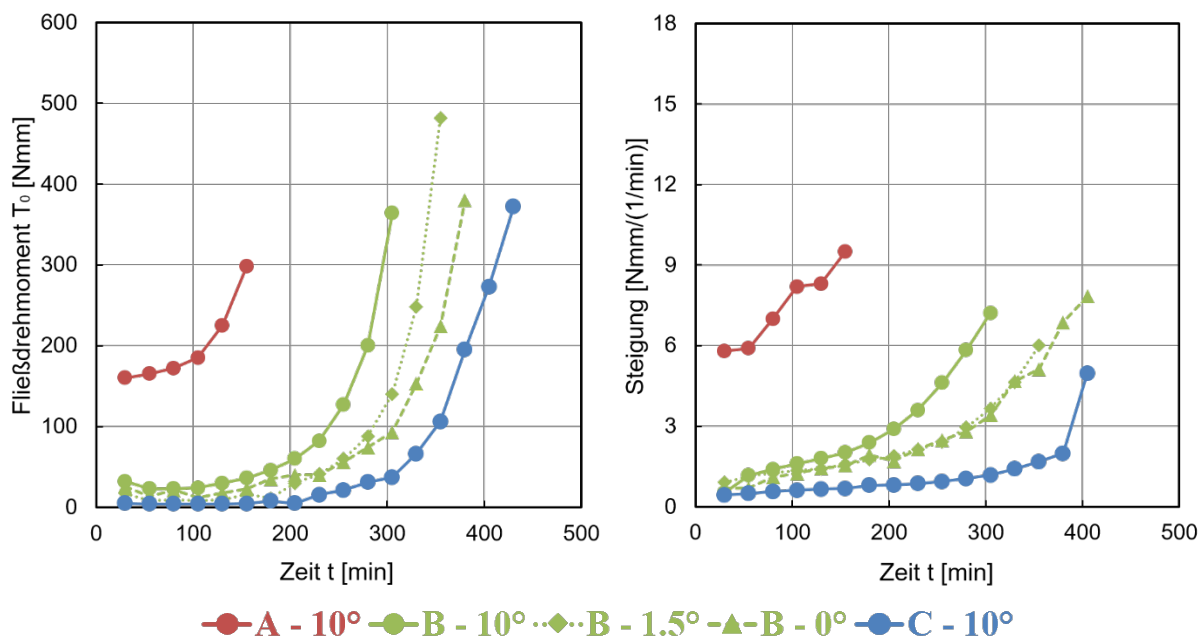


Bild 6: Entwicklung des Fließdrehmoments T_0 (links) und der Steigung der Fließkurven $\Delta T/\Delta\Omega$ (rechts) als Funktion von der Zeit

Weiterhin ist zu beobachten, dass ein größerer Oszillationswinkel φ zu einer beschleunigten Zunahme der rheologischen Eigenschaften führt. Dieses Verhalten kann durch zwei Phänomene erklärt werden. Zum einen werden Agglomerate durch die von außen aufgebrachte Scherung (extrinsische Agglomeration) gebildet. Je größer der Oszillationswinkel φ , desto größer ist der Energieeintrag in das System, was zu einer erhöhten Agglomeration von Partikeln führt. Andererseits führt die Scherbeanspruchung zu einem Entlüftungsprozess (vor allem bei sehr steifen Proben), der jedoch auf die frühe Belastungsphase beschränkt ist. Luftblasen rufen unter Scherung eine schmierende Wirkung im Material hervor. Kommt es zur Entlüftung des Materials, verringert sich die Schmierwirkung und das gemessene Widerstandsmoment erhöht sich. In Anbetracht beider Effekte wird geschlussfolgert, dass insbesondere die durch Oszillation hervorgerufene Agglomeration für den starken Anstieg der rheologischen Materialkennwerte im höheren Probenalter relevant ist. Jedoch spiegelt sich das Phänomen der Entlüftung auch in den Ergebnissen der Druckfestigkeit wider, die im Folgenden diskutiert werden.

Bild 7 zeigt die gemessenen Druckfestigkeiten der ungescherten und der durch Oszillation gescherten Probekörper. Wie zu erwarten ist ein Einfluss des Wassergehalts auf die Druckfestigkeit zu beobachten. Je höher der Wassergehalt, desto geringer ist die Druckfestigkeit des erhärteten Materials.

Die gemessenen Druckfestigkeiten bestätigen darüber hinaus das Phänomen der Entlüftung während der Oszillationsperioden, auch wenn an dieser Stelle kein direkter Beweis, beispielsweise durch die Bestimmung des Luftporengehalts geliefert wird. Es kann beobachtet werden, dass die Proben, die während der Oszillationsperioden kontinuierlich geschert wurden, ausnahmslos eine höhere Druckfestigkeit aufweisen, als die ungescherten Proben. Dies legt die Vermutung nahe, dass kontinuierliche, zyklische Belastungen einen Prozess der Entlüftung des Grout-Materials verursachen, was die Beobachtungen in (Lohaus et al. 2015a) und (Lohaus et al. 2015b) bestätigt. Ferner kann beobachtet werden, dass der Einfluss von zyklischen Bewegungen auf den Entlüftungsprozess umso geringer ist, je höher die Fließfähigkeit des Materials ist.

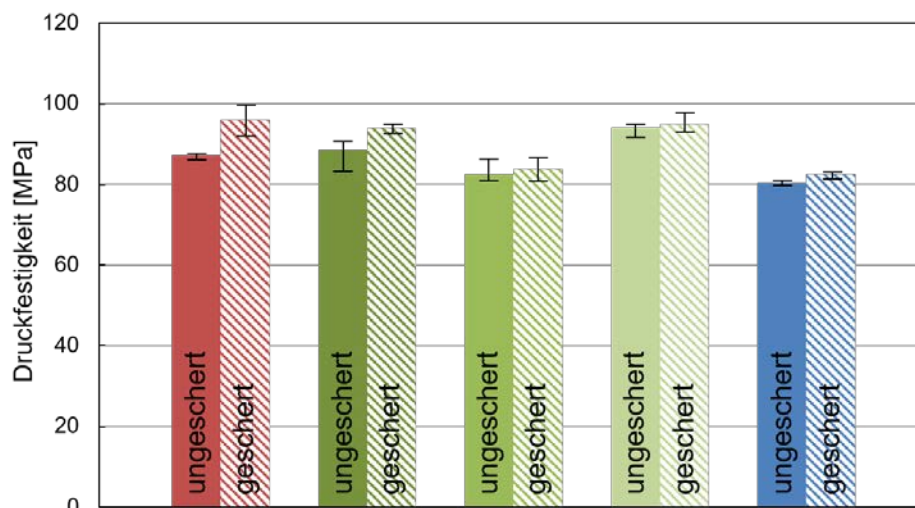


Bild 7: Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der durch Oszillation gescherte und ungescherte Probekörper

6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Einfluss des Early-Age-Movement (EAM) auf die Eigenschaften des Grout-Materials ist bisher nur wenig erforscht. Einschlägige Normen legen fest, dass während der ersten 24 Stunden der Installationsphase die maximale Relativbewegung zwischen den Stahlkomponenten des Grout-Joint auf 1 mm zu begrenzen ist. Diese Forderung kann in der Planungs- und Ausführungsphase zu erheblichen Einschränkungen führen. Der Nachweis für die Berechnung der maximalen Relativverschiebung ist bislang unter Berücksichtigung der zu erwartenden maximalen Wellenhöhen für eine unvergossene Grouted-Joint-Verbindung zu führen. Die dämpfende Wirkung des in den Ringspalt eingebrachten Grout-Materials – insbesondere bei größerer Übergreifungslänge – wird dabei nicht berücksichtigt. Dazu müsste das hydrationsbedingte Eigenschaftsbild des Grout-Materials unter dem Einfluss des EAM erfasst und in den Nachweis integriert werden.

Ziel der hier vorgestellten Untersuchungen war es, den Einfluss des Oszillationswinkels auf die Rheologie von Grout-Materialien variierender Fließfähigkeit quantitativ zu erfassen. Darüber hinaus war es das Ziel, die aus dem rheologischen Verhalten resultierenden Auswirkungen auf die Druckfestigkeit des erhärteten Grout-Materials zu beschreiben.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden durch den Wassergehalt variierende Fließfähigkeiten und zusätzlich variierende Oszillationswinkel φ berücksichtigt. Es konnte festgestellt werden, dass ein geringerer Wassergehalt zu einer beschleunigten Zunahme der rheologischen Materialkennwerte führt, was durch einen geringeren Partikelabstand hervorgerufen wird.

Eine wesentliche Erkenntnis dieser Untersuchung ist darüber hinaus, dass ein größerer Oszillationswinkel φ , eine beschleunigte Zunahme der rheologischen Kennwerte zur Folge hat, was auf extrinsische Agglomerationsprozesse zurückgeführt werden kann. Überlagert wird dieser Effekt durch Entlüftungsprozesse des Grout-Materials (hauptsächlich in der frühen Phase der Belastung). Insbesondere der Entlüftungsprozess führt zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit des ausgehärteten Grout-Materials, was sich besonders bei geringerer Fließfähigkeit des Grout-Materials bemerkbar macht.

Als Empfehlungen für die Praxis kann festgestellt werden, dass mit geringerem Wassergehalt des Grout-Materials (also mit geringerer Fließfähigkeit) Entmischungserscheinungen vorgebeugt werden können, dass die Zunahme widerstandsrelevanter Materialkennwerte beschleunigter abläuft und dass die Druckfestigkeit des ausgehärteten Grout-Materials höher ist. Natürlich muss die Fließfähigkeit des Grout-Materials hoch genug sein, damit es ohne Beeinträchtigungen gepumpt und eingebaut werden kann.

7 AUSBLICK

Weitere Untersuchungen sind geplant, um das Materialverhalten über die hier betrachtete Zeitspanne hinaus zu erfassen, indem die Methodik durch Ultraschallmessungen erweitert wird. Dadurch soll ein umfassendes Eigenschaftsprofil des Grout-Materials vom flüssigen bis zum erhärteten Zustand abgebildet werden. Sämtliche Materialkennwerte sollen anschließend als Eingangsgrößen für numerische Simulationen verwendet werden, um die am Bauwerk maximal zu erwartende Relativverschiebung auf realistische Weise vorherzusagen.

DANKSAGUNG

Die Untersuchungen wurden im Forschungsprojekt GREAM durchgeführt. Das Forschungsprojekt (Förderkennzeichen: 0324257) wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und vom Projektmanagement Jülich (PtJ) koordiniert.

Das Forschungsprojekt wird in Kooperation mit dem Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover durchgeführt. Ein besonderer Dank gilt dem Materialhersteller für die Bereitstellung des verwendeten Grout-Materials.

LITERATUR

Billington, C.J. und Tebbett, I.E. (1980): The Basis for New Design Formulae for Grouted Jacket to Pile Connections, Proc 12th Annual Offshore Technology Conf, Houston, Texas, USA.

Cotardo, D., Haist, M. und Lohaus, L. (2019): Early-age Movement in Grouted Joints for Offshore Applications – Determination of the Development of Grout-stiffness, Proc 29th Int Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Honolulu, Hawaii, USA.

Cotardo, D., Haist, M., Lohaus, L. und Begemann, C. (2019): Rotatorische und oszillatorische Scherversuche zur Ermittlung steifigkeitsrelevanter Kenngrößen von Offshore-Vergussmörteln unter dem Einfluss des Early-age Movement, Proc 28th Conf and Laboratory Workshops, Regensburg, Germany.

DIN EN 196-1:2016-11 (2016): Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength.

DIN EN 1015-3:2007-05 (2017): Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch).

- DIN EN ISO 19902:2014-01 (2014): Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore structures.
- Det Norske Veritas (2018): DNVGL-ST-0126 – Support structures for wind turbines.
- Haist, M. (2010): Zur Rheologie und den physikalischen Wechselwirkungen bei Zementsuspensionen, Karlsruher Reihe Massivbau, Baustofftechnologie, Materialprüfung, 66, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Ingebrigtsen, T., Løset, Ø. und Nielsen, S.G. (1990): Fatigue Safety and Overall Safety of Grouted Pile Sleeve Connections, Proc 22nd Annual Offshore Technology Conf OTC, OTC paper 6344, Houston, Texas, USA.
- Kallmann, H. und Willstaetter M. (1932): Zur Theorie des Aufbaus kolloidaler Systeme, Die Naturwissenschaften, 16(51), S. 952–953.
- Lamport, W.B., Jirsa, J.O. und Yura, J.A. (1986): Grouted Pile-to-Sleeve Connection Tests, Report on a Research Project, PMFSEL Report, 86(7), Department of Civil Engineering, University of Austin in Texas, United States of America.
- Lohaus, L., Cotardo, D. und Werner, M. (2014): The Early Age Cycling and its Influence on the Properties of hardened Grout Material, Proc Int 1st Wind Eng Conf, IWEC, Hanover, Germany.
- Lohaus, L., Cotardo, D. und Werner, M. (2014): A test system to simulate the influence of early age cycling on the properties of grout materials, Proc 24th Int Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Busan, 4, S. 234–239.
- Lohaus, L., Schaumann, P., Cotardo, D., Kelma, S. und Werner, M. (2015): Experimental and Numerical Investigations on Grouted Joints in Monopiles Subjected to Early-age Cycling to Evaluate the Influence of Different Wave Loadings, Proc 25th Int Offshore and Polar Eng Conf, ISOPE, Kona, Hawai'i, USA, 1, S. 268–276.
- Lohaus, L., Cotardo, D., Werner, M., Schaumann, P. und Kelma, S. (2015): Experimental and Numerical Investigations of Grouted Joints in Monopiles Subjected to Early-Age Cycling, Int J Offshore and Polar Eng, JOWE, 2(4), S. 193–201.
- Lotsberg, I. (2013): Structural mechanics for design of grouted connections in monopile turbine structures, Marine Structures, 32, S. 113–135.
- Tebbett, I.E. und Billington, C.J. (1985): Recent Developments in the Design of Grouted Connections, Proceedings of the 17th Annual OTC, number OTC 4890, Offshore Technology Conference.
- Werner, M. (2017): Realitätsnahe Materialeigenschaften von hochfesten Feinkornbetonen im Grouted Joints, Dissertation, Hannover.