Michael Werner, Dario Cotardo, Ludger Lohaus



Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für hochfeste Vergussmörtel in Offshore-Anwendungen

Für die Bemessung von Grout-Verbindungen in Offshore-Anwendungen (Windenergieanlagen und Plattformen) werden die baustofflichen Zusammenhänge überwiegend auf Grundlage von DIN EN 1992 abgeleitet, die für die Bemessung und Konstruktion von Hoch- und Ingenieurbauten aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton gilt. Im vorliegenden Beitrag wird die Anwendung des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit f_{cd} für moderne, hochleistungsfähige Grouts diskutiert. Zunächst wird vorgestellt, wie sich der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} im Detail zusammensetzt und wie im normativen Sicherheitskonzept Streuungen in den Annahmen sowie Unsicherheiten bei deren Ermittlung berücksichtigt werden. Auf Grundlage von Druckfestigkeitswerten aus realitätsnahen und Offshore-typischen Verfüllversuchen wurden Variationskoeffizienten abgeleitet, die zur Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_{G} verwendet wurden. Die Anwendbarkeit des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit fcd unter Berücksichtigung des hergeleiteten Teilsicherheitsbeiwerts für Grout $\gamma_{\rm G}$ wurde anschließend überprüft und dem Bemessungswert der DIN EN 1992 gegenübergestellt.

Stichworte Grout-Verbindungen; Grout; Offshore-Anwendungen; Prüfverfahren; Bemessungsansätze; Teilsicherheitsbeiwert

Development of a partial safety factor for high strength grouts in offshore applications

During the design of grouted connections in offshore applications (wind turbines and platforms), the fundamental material interrelationships are derived primarily on the basis of DIN EN 1992 which is applicable to the design and construction of building of concrete, reinforced concrete and pre-stressed concrete. In the paper at hand the application of the design value for the compressive strength of concrete f_{cd} to modern, high performance grouts is discussed. Firstly, the components of the design value for the compressive strength of concrete f_{cd} are presented in detail and it is then discussed how in the safety concept within the standards variances are considered in the underlying assumptions and uncertainties are taken into account during their determination. Coefficients of variation were determined based on values of compressive strength from realistic and offshore-typical grouting experiments, which were applied during the determination of the partial safety factor for grout $\gamma_{\rm G}$. The applicability of the design value of the compressive strength of concrete f_{cd} under consideration of the derived partial safety factor for grout $\gamma_{\rm G}$ was subsequently tested and compared to the design value of DIN EN 1992.

Keywords grouted-connections; grout; offshore plants; test procedure; design approaches; partial safety factor

1 Einleitung

Grout-Verbindungen stellen für die Installation von Offshore-Anlagen ein nahezu unverzichtbares Bauteil dar, um den in den Meeresboden gerammten Gründungspfahl mit der aufgehenden Unterstruktur zu verbinden (Bild 1). Auch wenn heute bei vielen Offshore-Windenergieanlagen (OWEA) Flanschverbindungen zum Einsatz kommen, werden Grout-Verbindungen auch in Zukunft ihre Bedeutung behalten, insbesondere bei der Installation von Plattformen, wo sie nach wie vor regelmäßig verwendet werden, und bei der Installation von immer größer werdenden Anlagen, wo Flanschverbindungen zunehmend an ihre Grenzen stoßen.

Grout-Verbindungen sind hybride Rohr-in-Rohr-Steckverbindungen, bestehend aus Stahlrohren unterschiedlichen Durchmessers und einem zementgebundenen Baustoff (Bild 2), der in den entstehenden Zwischenraum verfüllt wird. Durch Grout-Verbindungen können die aus dem Rammprozess entstandenen Imperfektionen wie Niveauunterschiede, Exzentrizitäten und Schiefstellungen der Gründungspfähle auf vergleichsweise einfache Weise ausgeglichen werden.

Der in Deutschland üblicherweise verwendete hochfeste Vergussmörtel – das sog. Grout – sorgt nach seiner Aushärtung für eine kraft- und formschlüssige Verbindung, sodass die einwirkenden Lasten - vor allem aus Wind und Wellen sowie aus dem Eigengewicht der Konstruktion in den Boden abgetragen werden können. Aufgrund der schwierigen bauausführungstechnischen Offshore-Bedingungen werden bei der Installation von Tragstrukturen hohe Anforderungen an die Bauausführung und an die Frischbetoneigenschaften des Grouts gestellt [3]. Ferner erfordern Grout-Verbindungen i. d. R. sehr hohe Druckfestigkeiten [3], die auch unter den schwierigen Installationsbedingungen sicher erreicht werden müssen. Daher werden die zur Verfügung stehenden Bemessungsansätze mit hohen Sicherheiten versehen und insgesamt konservativ ausgerichtet. Dies führt dazu, dass die Leistungsfähigkeit moderner Grouts nicht effektiv ausgenutzt wird. Die hohen Sicherheiten auf der Widerstandsseite der zur Verfügung stehenden Bemessungsansätze kommen vor allem



Bild 1 Schematische Darstellung von Tragstrukturen für Offshore-Windenergieanlagen (von links nach rechts: Monopile, Tripile, Jacket) und Plattformen [1] Supporting structures for offshore wind turbines (from left to right: monopile, tripile, jacket) and transformer platforms [1]



Bild 2 Schematische Darstellung einer Grout-Verbindung mit Schubrippen in Anlehnung an [2] Schematic representation of a grouted joint including shear keys according to [2]

dadurch zustande, dass nahezu keine Kenntnisse über die In-situ-Materialeigenschaften des Grouts in einer verfüllten Grout-Verbindung vorliegen [4].

2 Stand der Normung

Da Grout-Verbindungen zu den nicht geregelten Bauarten zählen, wird für jede Grout-Verbindung in der Ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) notwendig, die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) erteilt wird. Erschwerend kommt hinzu, dass für die Verwendung von Grout keine allgemein bauaufsichtlich anerkannte Verwendbarkeit vorliegt [5] und deshalb für jedes Bauprodukt ein aufwendiger Verwendbarkeitsnachweis geführt werden muss. Ausgehend von der vorliegenden bemessungs- und ausführungstechnischen Situation sowie dem normativ-rechtlichen Sachverhalt hinsichtlich Bauart und Bauprodukt werden im Rahmen des ZiE-Prozesses Gutachten erforderlich, die sich zum großen Teil auf fachnahe bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke stützen, da direkt anwendbare nationale sowie europäische Normen fehlen [6]. Dabei steht für die Bemessung eine ganze Reihe von nationalen Normen aus dem Hochund Ingenieurbau zur Verfügung [7–11]. Vor allem bei der Bemessung von Jackets wird darüber hinaus auf DIN EN ISO 19902 [12] zurückgegriffen, die aus der Ölund Gasindustrie stammt. Zwar hat diese Norm für das Design von Offshore-Strukturen international eine große Bedeutung, allerdings bezieht sie sich nicht direkt auf hochfestes Grout, wie es üblicherweise in Deutschland eingesetzt wird. Daher muss für den jeweiligen Einzelfall geprüft werden, ob eine Übertragbarkeit der in ihr festgelegten Regelungen auf hochfestes Grout möglich und sinnvoll ist [6]. Ferner existieren privatrechtliche Richtlinien (z. B. DNV GL Standards), die Empfehlungen und Hinweise für die Auslegung von Offshore-Tragstrukturen bereitstellen [13] und ebenfalls international sehr verbreitet sind. Gleichwohl sind es privatrechtliche Regelungen, die kein anerkanntes Normungsverfahren durchlaufen haben und daher keine behördliche oder gar bauaufsichtliche Anerkennung genießen. Resultierend aus der unübersichtlichen normativ-rechtlichen Situation muss schlussendlich für jeden Einzelfall geklärt werden, welche Ansätze aus den nationalen und internationalen Normen und Regelwerken sowie privatrechtlichen Richtlinien relevant und anwendbar sind und wie diese ggf. durch weitere technische Regelungen und Ausführungshinweise ergänzt werden können [5]. Hierbei sind insbesondere die Standards zu berücksichtigen, die direkt vom BSH erlassen werden [14, 15]. Bei diesen BSH-Standards werden Empfehlungen zur Konstruktion und zur Ausführung bereitgestellt, wobei für die baustofflichen Fragen auf DIN EN 1992 [7] verwiesen wird.

Die Erarbeitung einer geschlossenen Normenreihe für Tragstrukturen von Windenergieanlagen (DIN 18088 [16]) wird in Zukunft dazu führen, dass Genehmigungsprozesse aufgrund der vereinheitlichten Randbedingungen vereinfacht werden können.

3 Bemessungswert der Betondruckfestigkeit von Grout-Verbindungen nach DIN EN 1992

Die Bemessungsansätze für den Tragsicherheitsnachweis von Grout-Verbindungen enthalten zum Teil versteckte Sicherheiten, die vor allem auf der Widerstandsseite (Druckfestigkeit des Grouts) zum Tragen kommen. Am Beispiel des semiprobabilistischen Bemessungsansatzes in DIN EN 1992 [7] wird im Folgenden dargestellt, wie sich der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} im Detail zusammensetzt und aus welchen Beiwerten Sicherheiten im Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} resultieren, die als Tragreserven im Design von Grout-Verbindungen angesehen werden können.

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} ist gemäß Gl. (1) definiert.

$$f_{\rm cd} = \alpha_{\rm cc} \cdot \frac{f_{\rm ck}}{\gamma_{\rm C}} \tag{1}$$

Dabei wird f_{ck} als charakteristische Zylinderdruckfestigkeit bezeichnet und stellt den 5%-Quantilwert aus der Verteilung der Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d dar. α_{cc} stellt den "Beiwert zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung" dar. Der jeweilige landesspezifische Wert $\alpha_{\rm cc}$ liegt zwischen 0,8 und 1,0 und darf national geregelt werden. Für die AWZ gilt der für Deutschland festgelegte Wert von α_{cc} = 0,85, der unterhalb des allgemein im europäischen Ingenieurbau empfohlenen Werts von 1,0 liegt. Bei der Weiterentwicklung des Eurocode 2 wird die Anpassung des Beiwerts α_{cc} aktuell diskutiert. Eine mögliche Anpassung wird allerdings keinen Einfluss auf die Berechnung des Teilsicherheitsbeiwerts $\gamma_{\rm C}$ nehmen.

Für Beton im Grenzzustand der Tragfähigkeit ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{\rm C}$ üblicherweise zu 1,5 und kann nach Gl. (2) berechnet werden. Bei werkmäßiger und ständig überwachter Herstellung (Fertigteilprodukte) darf der Teilsicherheitsbeiwert auf $\gamma_{\rm C} = 1,35$ verringert werden [17].

$$\gamma_{\rm c} = \frac{\gamma_{\rm M}}{0.85} \tag{2}$$

Der Wert 0,85 dient als Koeffizient zur Übertragung der Festigkeitswerte vom Labor auf das Bauteil [18] und führt dazu, dass Festigkeitswerte, die an gesondert hergestellten Probekörpern im Labor ermittelt werden, zusätzlich abgemindert werden. Ob die zusätzliche Abminderung der charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} zur Übertragung der Festigkeitswerte vom Labor auf das Bauteil auch für Anlagen der Offshore-Windenergie und für moderne Grouts gerechtfertigt ist, soll im vorliegenden Beitrag unter Berücksichtigung der hohen Leistungsfähigkeit des Grouts, der intensiven Qualitätssicherung bei der Herstellung und angesichts der zur Anwendung kommenden Überwachung bei der Bauausführung diskutiert werden.

Im Gegensatz zu den Untersuchungen in [18], die an Bauteilen im Hoch- und Ingenieurbau durchgeführt wurden, konnte durch eine Vielzahl realitätsnaher, großmaßstäblich verfüllter Bauteile i.d.R. eine höhere Festigkeit des Grouts gegenüber den an Laborprobekörpern ermittelten Festigkeiten beobachtet werden [19– 23]. Weiterhin werden mit γ_M in Gl. (2) Streuungen der Baustoffeigenschaft selbst sowie geometrische Abweichungen und Unsicherheiten des verwendeten Bemessungsmodells (Modellunsicherheiten) berücksichtigt. An dieser Stelle wird in DIN EN 1992 [7] nicht näher darauf eingegangen, wie sich der Teilsicherheitsbeiwert γ_M im Detail zusammensetzt.

Nach [24] setzt sich der normative Teilsicherheitsbeiwert γ_M folgendermaßen zusammen:

$$\gamma_{\rm M} = \exp\left[\left(\alpha_{\rm L} \cdot \beta - 1,645\right) \cdot V_{\rm Rfc}\right] = 1,26\tag{3}$$

Dabei wird ein Zulässigkeitsindex β von 3,83 unter Berücksichtigung der Sicherheitsklasse 2 [24] für eine Lebensdauer von 50 Jahren nach DIN EN 1990 [25] zugrunde gelegt. Der Wert 1,645 wird für die Anpassung auf den 5%-Quantilwert für eine Normalverteilung angesetzt, $\alpha_{\rm L}$ stellt einen Linearfaktor für die Streuung des Widerstands und $V_{\rm Rfc}$ stellt den resultierenden Variationskoeffizienten der Widerstandsseite nach Gl. (4) gemäß [24] dar und setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$V_{\rm Rfc} = \sqrt{V_{\rm M}^2 + V_{\rm G}^2 + V_{\rm fc}^2}$$
(4)

mit:

- $V_{\rm M}$ Variationskoeffizient für Modellunsicherheiten = 0,05
- $V_{\rm G}$ Variationskoeffizient für geometrische Parameter = 0,05
- $V_{\rm fc}$ Variationskoeffizient der Materialeigenschaften = 0,15

In Bild 3 wird zusammenfassend dargestellt, wie sich der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} gemäß dem semiprobabilistischen Bemessungsansatz in DIN EN 1992 [7] zusammensetzt.

Bemessungswert der Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992



Bild 3 Bemessungswert der Betondruckfestigkeit nach DIN EN 1992 [7] Design value of concrete compressive strength according to DIN EN 1992 [7]

Anhand des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit f_{cd} ist zu erkennen, dass an zahlreichen Stellen Sicherheiten im Bemessungsansatz nach DIN EN 1992 [7] auf der Widerstandsseite und damit Tragreserven im Design von Grout-Verbindungen enthalten sind. Auch in internationalen Normen und privatrechtlichen Richtlinien sind Beiwerte und Abminderungsfaktoren enthalten, die vergleichbare Sicherheiten auf der Widerstandsseite hervorrufen, wobei zusätzlich designrelevante, geometrische Aspekte von Grout-Verbindungen berücksichtigt werden (DIN EN ISO 19902 [12], DNVGL-ST-0126 [13]). Derartige Aspekte werden in DIN EN 1992 [7] nicht berücksichtigt, da der Widerstand einzig über die Materialeigenschaften abgebildet wird. Die Bemessungsansätze aus DIN EN ISO 19902 [12] basieren aus den späten 1970er- und 80er-Jahren, wobei im Rahmen der seinerzeit durchgeführten Versuche kein hochfestes Grout untersucht wurde [26]. Die umfangreichen empirischen Versuchsserien werden in [27, 28] beschrieben.

4 Realitätsnahe und Offshore-typische Verfüllversuche zur Anpassung von Variationskoeffizienten zur Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_G

Im Forschungsprojekt "Überwiegend axial wechselbeanspruchte Grout-Verbindungen in Tragstrukturen von OWEA (GROWup)", das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert (BMWi, Ref.-Nr. 0325290) und gemeinsam vom Institut für Baustoffe und vom Institut für Stahlbau der Leibniz Universität Hannover durchgeführt wurde, wurde die nachfolgend näher beschriebene großskalige Prüfeinrichtung für realitätsnahe Verfüllversuche entwickelt. Im Folgenden wird die Prüfeinrichtung als Großversuchsstand und die Verfüllversuche als Großversuche bezeichnet. Der in Bild 4 dargestellte Großversuchsstand bildet die Übergreifungslänge einer Grout-Verbindung von aufgelösten Tragstrukturen nahezu im Realmaßstab ab. Die Breite des Großversuchsstands ist im Gegensatz zum Umfang solcher Grout-Verbindungen um den Faktor 2 kleiner [2]. Die geometrische Vereinfachung einer zylindrischen Verbindung auf ein rechteckiges Teilsegment kam bereits in [29] zur Anwendung.

Der Großversuchsstand besteht aus einer transparenten Rahmentragschalung (Höhe = 3,75 m, Breite = 3,3 m) und einem Kipprahmen, um das Wandbauteil zur Beprobung in die Horizontale legen zu können (Bild 4b). Zum Anmischen und Fördern des Grouts wurde Offshore-typische Misch- und Fördertechnik verwendet und umfangreiche Messtechnik innerhalb und außerhalb der Prüfschalung appliziert. Das Spaltmaß kann variabel eingestellt werden und wurde im Rahmen der Großversuche auf 10 cm eingestellt, um typische Randbedingungen für das fließende Grout zu schaffen. Das gesamte Schalungssystem wurde wasserdicht konzipiert, um auch unter Wasser liegende Grout-Verbindungen simulieren zu können. Zur Abbildung der Schubverzahnung (Schubrippen) wurden auf der Innenseite der rückwärtig liegenden Schalung Halbrundprofile aus Holz mit einem Durchmesser von 1 cm appliziert. Die Schubrippen wiesen einen Abstand von 20 cm zueinander auf (entspricht den geometrischen Grenzwerten nach DIN EN ISO 19902 [12]). Der Einfüllstutzen mit einem Durchmesser von 2" lag mittig auf der Rückseite der Schalung in einem Abstand von 10 cm von der Unterseite. Für weitere Informationen wird auf die Quellen [2, 23] verwiesen.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden fünf verschiedene hochfeste Grouts verwendet. Im Forschungsprojekt wurden elf Großversuche durchgeführt, die die Datenbasis für die Auswertung in Abschn. 5 darstellen. Es wurden Großversuche durchgeführt, die sowohl planmäßige als



Bild 4 Kippbarer Großversuchsstand zur Durchführung von Großversuchen [2, 30]: a) für den Großversuch vorbereiteter Großversuchsstand, b) zur Beprobung abgelegter Großversuchsstand

Mock-up testfacility including a tilting device [2, 30]: a) mock-up testfacility prepared for large-scale test, b) mock-up testfacility set up for sampling

auch unplanmäßige Verfüllversuche, sog. Störfallsimulationen, abbildeten. Als planmäßiger Verfüllversuch wird die kontinuierliche Verfüllung des Großversuchsstands mit zwei Zwangsmischern verstanden. Als Simulation eines Störfalls wurde die Verfüllung verlangsamt mit nur einem Zwangsmischer durchgeführt. Dadurch verdoppelte sich die Verfülldauer auf ca. 4 h im Gegensatz zu den planmäßig durchgeführten Verfüllversuchen. In der Praxis hängt die Verfülldauer stark vom Volumen der Grout-Verbindung ab. Üblicherweise wird eine ausreichende Konsistenzhaltung über 300 min gefordert [2]. Derart lange Verfülldauern treten in der Praxis ohne besondere Vorkommnisse i.d.R. nur selten auf.

Der Großversuchsstand wurde für jeden Großversuch zuvor mit Wasser befüllt, um unter Wasser liegende Grout-Verbindungen zu simulieren. Anders als in der Praxis vorgeschrieben, wurde der Verfüllprozess nicht durch einen Grout-Überlauf abgeschlossen, sodass Entmischungsphänomene des Grouts durch Beprobung der gesamten Verfüllhöhe erfasst werden konnten. Bei der Installation von Offshore-Tragstrukturen ist der erfolgreiche Verfüllprozess allerdings durch ein gewisses Maß an Grout-Überlauf sicherzustellen und bei der Überwachung der Bauausführung nachweislich zu dokumentieren [5].

Nach der Erhärtung des Grouts wurde der Kipprahmen in die Horizontale geführt und es wurden über die gesamte Fläche der erhärteten Prüfwand Probekörper entnommen (Bild 4b). Bei den Probekörpern handelte es sich um Bohrkerne mit einem Durchmesser von 100 mm. Die Prüffläche der Bohrkerne wurde für die Druckfestigkeitsprüfung geschliffen und anschließend bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Die Druckfestigkeit wurde nach 7 d ermittelt und der Referenzdruckfestigkeit von unter Laborbedingungen hergestellten, 7 d alten Probekörpern gegenübergestellt. Die Referenzdruckfestigkeit ergab sich aus dem Mittelwert der ermittelten Festigkeitswerte dreier Würfel mit einer Kantenlänge von 75 mm. Am Beispiel





eines Grouts ist exemplarisch die relative Druckfestigkeitsverteilung in Bild 5 dargestellt. An den Stellen, an denen die Zahlenwerte eingetragen sind, lag jeweils die Entnahmestelle einer Probe.

Es ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den unter Laborbedingungen hergestellten Proben (Referenzdruckfestigkeit von 117 N/mm²) im Bauteil auch ohne Grout-Überlauf ausnahmslos höhere Druckfestigkeiten erreicht wurden.

Ein anderes Beispiel zeigt die relative Druckfestigkeitsverteilung eines zweiten Materials (Bild 6). Es ist zu er-





Scheduled mock-up test: example 1 – relative compressive strength distribution of 7-d-old drilled cores from mock-up test compared to laboratory samples [2]

kennen, dass im Bauteil zum Teil geringere Druckfestigkeiten (≤ 100% bezogen auf die Referenzdruckfestigkeit des Grouts von 130 N/mm²) vorliegen, was einerseits auf Entmischungsprozesse des Grouts und andererseits auf Ablagerungen der für diesen Versuch verwendeten normalfesten Vorlaufmischung zurückgeführt werden konnte. Bei den anderen Großversuchen mit planmäßiger Verfüllung wurde eine spezielle hochfeste Vorlaufmischung der Materialhersteller verwendet, sodass die Bereiche mit geringerer Druckfestigkeit begrenzter waren.

Die Feststellung geringerer Druckfestigkeiten bezieht sich insgesamt nur auf wenige lokal eingegrenzte Bereiche, die durch einen Grout-Überlauf hätten reduziert werden können. Auch die Druckfestigkeitsverteilung der Störfallsimulation zeigt bereichsweise vergleichbar hohe Druckfestigkeiten (Referenzdruckfestigkeit von 118 N/mm²), mit wenigen lokal eingegrenzten Bereichen minderfester Grouts (Bild 7).

5 Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für Grout $\gamma_{\rm G}$ auf Grundlage von versuchsbasierten Variationskoeffizienten

Aufbauend auf den exemplarisch in Abschn. 4 vorgestellten Versuchsergebnissen wurde der resultierende Variationskoeffizient des Widerstands $V_{\rm R}$ berechnet. Dazu wurde aufbauend auf dem Variationskoeffizienten $V_{\rm Rfc}$ nach Gl. (4) (gemäß DIN EN 1992 [7]) der Term um einen Variationskoeffizienten V_{η} zur Übertragung von Labor- auf Bauteilbedingungen erweitert und damit der Variationskoeffizient der Widerstandsseite $V_{\rm R}$ nach [31] und nach [2] wie folgt berechnet:





Non-scheduled mock-up test – relative compressive strength distribution of 7-d-old drilled cores from mock-up test compared to laboratory samples [2]

$$V_{\rm R} = \sqrt{V_{\rm m}^2 + V_{\rm St}^2 + V_{\rm a}^2 + V_{\rm \eta}^2}$$
(5)

mit:

- $V_{\rm m}$ Variationskoeffizient der Materialeigenschaften = 0,15
- V_{St} Variationskoeffizient für Modellunsicherheiten = 0,05
- V_a Variationskoeffizient für geometrische Parameter = 0,05
- V_{η} Variationskoeffizienten zur Übertragung von Laborauf Bauteilbedingungen = 0,23 [2]

Zur Ermittlung des Variationskoeffizienten der Widerstandsseite nach Gl. (5) werden im Folgenden der Variationskoeffizient für das Material $V_{\rm m}$ und der Variationskoeffizient V_{η} zum Übertrag von Labor- auf Bauteilbedingungen aus Versuchsergebnissen abgeleitet und daraus der Teilsicherheitsbeiwert für das Grout $\gamma_{\rm G}$ errechnet.

Als Datenbasis dienen die relativen Druckfestigkeiten der Prüfkörper aus den Großversuchen, um den Variationskoeffizienten des Widerstands $V_{\rm R}$ zu bestimmen. Die Datenbasis für die Druckfestigkeit besteht aus insgesamt 167 Werten und beinhaltet auch Proben mit bereichsweise eingeschlossener Vorlaufmischung oder entmischtem Grout sowie Proben aus Randbereichen. Analog zum Variationskoeffizienten V_{η} (Gl. (5)) wird ein Variationskoeffizient zur Übertragung von Labor- auf Großversuchsbedingungen $V_{\eta, \rm GV}$ berechnet. Allgemein formuliert ergibt sich der Variationskoeffizient V_i aus dem Quotienten der Standardabweichung s_i und dem Mittelwert \bar{x}_i des jeweiligen Merkmals der Stichprobe (Gl. (6)).

$$V_{i} = \frac{S_{i}}{\overline{x}_{i}} \tag{6}$$

Aufgrund der Vielzahl der Versuchsergebnisse (167 Einzelwerte) wird der für die Ermittlung des Teilsicherheitsbeiwerts vorgesehene Variationskoeffizient der Grundgesamtheit mit der Standardabweichung der Versuchsdaten gleichgesetzt. Aus der Datenbasis ergibt sich für die Relation der Druckfestigkeit zwischen Großversuch und Laborreferenzprüfung eine Standardabweichung $s_{\rm GV}$ von 0,184 und ein Mittelwert $\bar{x}_{\rm GV}$ von 1,099, d.h., im Großversuch wurde im Mittel eine um 9,9% höhere Druckfestigkeit festgestellt als im Labor, wobei die Einzelwerte mit einer Standardabweichung von 18,4% streuten. Dadurch ergibt sich der Variationskoeffizient $V_{\eta, \rm GV}$ zu:

$$V_{\eta, \,\text{GV}} = \frac{s_{\text{GV}}}{\overline{x}_{\text{GV}}} = \frac{0.184}{1,099} = 0.167 \tag{7}$$

Für die Herleitung des Variationskoeffizienten $V_{\eta, \text{GV}}$ wurden relative Druckfestigkeiten herangezogen, um die Materialien, die sich in ihrer Druckfestigkeit unterscheiden, untereinander vergleichen zu können. Durch dieses Vorgehen konnte der Einfluss des Verfüllvorgangs auf die Materialdegradation erfasst und als Variationskoeffizient ausgedrückt werden.

Hingegen wurden für die Bestimmung des Variationskoeffizienten der Grout-Eigenschaften $V_{\rm G}$ absolute Druckfestigkeiten verwendet, weil die reinen materialbedingten Schwankungen unter Laborbedingungen ohne zusätzliche Störeinflüsse betrachtet wurden.

Der Variationskoeffizient der Grout-Eigenschaften $V_{\rm G}$ wurde analog anhand von 269 gesondert im Labor hergestellten Probekörpern bestimmt. Nach Gl. (8) ergibt sich $V_{\rm G}$ zu:

$$V_{\rm G} = \frac{s_{\rm G}}{\bar{x}_{\rm G}} = \frac{11,82 \text{ N/mm}^2}{126,91 \text{ N/mm}^2} = 0,09$$
(8)

Unter Berücksichtigung der beiden Variationskoeffizienten $V_{\eta, \text{GV}}$ und V_{G} ergibt sich ein Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand γ_{M} unter Verwendung von Gln. (3), (5) zu:

$$\gamma_{\rm M} = \exp\left[\left(\alpha_{\rm L} \cdot \beta - 1,645\right) \cdot \sqrt{V_{\rm G}^2 + V_{\rm St}^2 + V_{\rm a}^2 + V_{\eta,\rm GV}^2}\right]$$
(9)

$$\gamma_M = \exp\left[\left(0, 8 \cdot 3, 83 - 1, 645\right) \cdot \sqrt{0,09^2 + 0,05^2 + 0,05^2 + 0,167^2}\right] = 1,333 \approx 1,33$$

Unter Berücksichtigung von Gl. (9) ergibt sich der Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_G zu:

$$\gamma_{\rm G} = \frac{\gamma_{\rm M}}{0.85} = 1,33 \tag{10}$$

Der Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_G wird mit dem Teilsicherheitsbeiwert der Baustoffeigenschaft γ_M gleichgesetzt. Zur Übertragung von Labor- auf Bauteilbedingungen wurde der Variationskoeffizient V_{η} durch den Variationskoeffizienten $V_{n,GV}$ ersetzt. Unter der Voraussetzung, dass die durchgeführten Verfüllversuche realitätsnahe Randbedingungen abbilden, kann durch den Variationskoeffizienten $V_{\eta, GV}$ der Übertrag auf das Bauteil direkt stattfinden. Aus diesem Grund wird auf eine zusätzliche Abminderung des Teilsicherheitsbeiwerts der Baustoffeigenschaft γ_M analog zu Gl. (2) durch den (im Stahlbetonbau üblichen) Faktor von 0,85 verzichtet (Gl. (10)). Somit wird zur Übertragung von Labor- auf Bauteilbedingungen an dieser Stelle ausschließlich der Variationskoeffizient $V_{n,GV}$ berücksichtigt und ersetzt damit den Faktor von 0,85. Der hier hergeleitete Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_{G} deckt sich näherungsweise mit dem Teilsicherheitsbeiwert für Fertigteilprodukte ($\gamma_{\rm C} = 1,35$ bei werkmäßiger und ständig überwachter Herstellung [17]). Dies ist dadurch begründet, dass Verarbeitungsfehler (z.B. unsachgemäße Verdichtung), wie sie im Hochund Ingenieurbau durch einen Faktor von $\gamma_{\rm C}$ = 1,5 berücksichtigt werden, durch die besonderen Grout-Eigenschaften (selbstverdichtend) nicht auftreten. Darüber hinaus ist bei der Installation von Offshore-Tragstrukturen der erfolgreiche Verfüllprozess durch ein gewisses Maß an Grout-Überlauf sicherzustellen, sodass durch den Kontakt mit Meerwasser möglicherweise entmischtes und damit minderfestes Grout nicht in der Grout-Verbindung verbleibt. Auch diese Maßnahme sorgt mit dafür, dass die Druckfestigkeiten im Bauwerk nicht geringer sind als bei den Laborprobekörpern.

In Bild 8 wird zusammenfassend dargestellt, wie der Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_G auf Grundlage von versuchsbasierten Variationskoeffizienten hergeleitet wurde.

Anhand der absoluten Druckfestigkeiten der planmäßig durchgeführten Verfüllversuche und des Störfalls im Großversuchsstand wurde die Anwendbarkeit des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit f_{cd} unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_{G} überprüft.

Bild 9 zeigt die ermittelten Bauteildruckfestigkeiten $f_{G,Bauteil}$ in Abhängigkeit von der im Labor ermittelten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} . Vergleichend sind die untere Grenze des Prognoseintervalls und die Bemessungswerte der Betondruckfestigkeit f_{cd} nach DIN EN 1992 [7] für die Festigkeitsklasse C100/115 unter Berücksichtigung von $\gamma_M = 1,5$ und für Festigkeiten $\geq C100/115$ entsprechend des 5%-Quantilwerts f_{cd} unter Berücksichtigung des nach Gl. (10) hergeleiteten Teilsicherheitsbeiwerts für Grout $\gamma_G = 1,33$ dargestellt.

Die in Bild 9 mit Dreiecken dargestellten Werte stehen für Versuchsergebnisse mit planmäßiger Verfüllung. Die Kreuze stellen die Versuchsergebnisse der Störfallsimulation dar. Es ist zu erkennen, dass sämtliche im Versuch ermittelten Druckfestigkeiten deutlich oberhalb



Bild 8 Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_6 auf Grundlage von versuchsbasierten Variationskoeffizienten Derivation of a partial factor for grout γ_6 based on test-based coefficients of variation



Bild 9 Ermittelte Bauteildruckfestigkeiten f_{G,Bauteil} in Abhängigkeit von der im Labor ermittelten charakteristischen Zylinderdruckfestigkeit f_{ck} in Anlehnung an [2]

Compressive strength determined in mock-up tests f_{G,Bauteil} depending on the characteristic cylindrical compressive strength f_{ck} determined in lab according to [2]

von f_{cd} (\geq C100/115, γ_G) liegen. Die Untergrenze des Prognosebereichs befindet sich oberhalb, in einem deutlichen Abstand (\geq 45 MPa) zu f_{cd} (\geq 100/115, γ_G). Unterhalb des Prognoseintervalls liegen drei Messwerte, die allerdings mind. 25 MPa oberhalb des Bemessungsvorschlags liegen. Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} (\geq 100/115, γ_G), der sich unter Berücksichtigung des nach Gl. (10) hergeleiteten Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_G ergibt, konnte statistisch auf Grundlage der vorliegenden Versuchsergebnisse abgesichert werden. Unter der Annahme, dass die Verfüllversuche einen Offshore-typischen Verfüllvorgang realistisch abbilden, ist der Vorschlag zum Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_G im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit $\gamma_G = 1,33$ noch immer mit ausreichenden Sicherheiten für die Druckfestigkeit versehen. Selbst in den Störfallsimulationen, in denen besonders kritische Randbedingungen nachgestellt wurden und kein Grout-Überlauf durchgeführt wurde, lagen die Bauteilfestigkeiten über den Bemessungswerten. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass die zum Einsatz kommenden hochleistungsfähigen Grouts gutmütig auf ungünstige Randbedingungen reagieren und auch unter den schwierigen Installationsbedingungen sicher funktionieren. Der in der Praxis durchzuführende Grout-Überlauf führt dazu, dass entmischtes und damit minderfestes Grout nicht in der Grout-Verbindung verbleibt, wodurch Sicherheitsrisiken zusätzlich minimiert werden.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass mit dem in Abschn. 4 beschriebenen Großversuchsstand zwar Offshore-nahe Randbedingungen und der Einfluss eines wassergefüllten Ringspalts simuliert werden können, allerdings konnten der Einfluss von Relativbewegungen zwischen Pfahl und Hülse in der frühen Phase der Erhärtung des Grouts (Early-Age-Movement) und der Einfluss von Umgebungstemperaturen nicht betrachtet werden. Hinsichtlich des Einflusses von niedrigen Umgebungstemperaturen konnte in [22, 23] kein negativer Einfluss auf die In-situ-Grout-Eigenschaften beobachtet werden. Der Einfluss des Early-Age-Movement auf die In-situ-Grout-Eigenschaften wird aktuell im vom BMWi geförderten Forschungsprojekt "Quantifizierung der Einflüsse aus Early-Age-Movement auf das Tragverhalten von Grout-Verbindungen zur Optimierung von Design und Installation von Windenergieanlagen und Plattformen" (GREAM) quantifiziert [1, 32, 33].

6 Zusammenfassung und Ausblick

Grout-Verbindungen sind für die Installation von Offshore-Tragstrukturen essenziell, um die aufgehende Tragstruktur mit den Gründungspfählen zu verbinden. Durch das in den Ringspalt der Grout-Verbindung eingebrachte Grout entsteht nach der Erhärtung eine kraft- und formschlüssige Verbindung. Für Grout-Verbindungen ist in Deutschland eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) notwendig, da sowohl Bauart als auch Bauprodukt normativ nicht explizit geregelt sind. Für das im Rahmen des ZiE-Prozesses jeweils erforderliche Gutachten wird auf fachnahe bauaufsichtlich eingeführte Regelwerke zurückgegriffen. Das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrografie (BSH) verweist für die Bemessung des Bauprodukts auf den Bemessungsansatz in DIN EN 1992, der aus dem Hoch- und Ingenieurbau stammt. Dort wird zur Berechnung des Bemessungswerts der einaxialen Betondruckfestigkeit f_{cd} die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons nach 28 d f_{ck} durch den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{\rm C}$ abgemindert. In diesem Beitrag wurde beschrieben, wie sich der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit f_{cd} zusammensetzt und an welchen Stellen im Bemessungsansatz Sicherheiten auf der Widerstandsseite enthalten sind, um den schwierigen Offshore-Ausführungsbedingungen zu begegnen. In diesem Beitrag wurde darüber hinaus vorgestellt, an welchen Stellen des Bemessungsansatzes Möglichkeiten zur Anpassung vorliegen, um die hohe Leistungsfähigkeit heutiger Grouts besser ausnutzen zu können. Darauf aufbauend wurde ein Ansatz zur Berechnung eines Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_{G} vorgestellt. Der beschriebene Ansatz beruht auf Variationskoeffizienten, die anhand von Druckfestigkeitswerten aus realitätsnahen und Offshore-typischen Verfüllversuchen abgeleitet wurden.

Zuletzt wurde die Anwendbarkeit des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit f_{cd} unter Berücksichtigung des Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_G überprüft und den Bemessungswerten von DIN EN 1992 gegenübergestellt. Es hat sich gezeigt, dass der Vorschlag des Teilsicherheitsbeiwerts für Grout γ_G mit einem Wert von 1,33 noch immer mit ausreichend hohen Sicherheiten für die Bemessung der Widerstandsseite behaftet ist. Die hohe Leistungsfähigkeit moderner Grouts kann mit dem hier vorgestellten Teilsicherheitsbeiwert für Grout γ_G besser ausgenutzt werden, was den Bau von Offshore-Tragstrukturen mit Grout-Verbindungen wirtschaftlicher gestalten kann.

Literatur

- Cotardo, D.; Haist, M.; Lohaus, L. (2019) Zum Einfluss des Early-age Movement auf die Rheologie von Offshore-Vergussmörteln in: Proc 60th DAfStb-Forschungskolloquium. Leibniz Universität Hannover, Institut für Baustoffe und Institut für Massivbau. Hannover, 28./29. Okt. 2019.
- [2] Werner, M. (2017) Realitätsnahe Materialeigenschaften von hochfesten Feinkornbetonen im Grouted Joints [Dissertation]. Universität Hannover, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, H. 15. ISBN: 978-3-936634-18-1, https://doi. org/10.15488/3064
- [3] Anders, S. (2007) Betontechnologische Einflüsse auf das Tragverhalten von Grouted Joints [Dissertation]. Universität Hannover, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, H. 6. ISBN: 978-3-936634-05-1
- [4] Dallyn, P.; El-Hamalawi, A.; Palmeri, A.; Knight, R. (2015) Experimental testing of grouted connections for offshore substructures: A critical review in: Structures, no. 3, pp. 90–108.
- [5] Lohaus, L.; Schaumann, P.; Bechtel, A.; Griese, R.; Lindschulte, N. (2013) Zustimmung im Einzelfall für Grout-

Verbindungen in Tragstrukturen für die Offshore-Windenergie in: Bautechnik 90, H. 7, S. 402–409.

- Werner, M.; Lohaus, L. (2014) Ausführungstechnische Einflüsse auf Aspekte der Tragsicherheit von Grouted Joints in: Bautechnik 91, H. 8, S. 554–560. https://doi.org/10.1002/ bate.201400045
- [7] DIN EN 1992 (2011) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Berlin: Beuth Verlag.
- [8] DIN EN 206-01 (2014) Beton Festlegung, Eigenschaften, Herstellung Konformität. Berlin: Beuth Verlag.
- [9] DIN 1045-2 (2008) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Berlin: Beuth Verlag.
- [10] DIN 1045-3 (2012) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung. Berlin: Beuth Verlag.
- [11] DAfStb-Richtlinie (2011) Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. – DAfStb.
- [12] DIN EN ISO 19902 (2014) Erdöl- und Erdgasindustrie Gegründete Stahlplattformen. Berlin: Beuth Verlag.

- [13] DNV GL standard: DNVGL-ST-0126 (2018) Support structures for wind turbines.
- [14] BSH-Standard (2007) Konstruktive Ausführung von Offshore-Windenergieanlagen. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock. Dez. 2007.
- [15] BSH-Merkblatt (2011) Verfahrenshinweise für die Zustimmung im Einzelfall (ZIE) beim BSH – Groutverbindungen.
 Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg und Rostock.
- [16] DIN 18088 (2019) *Tragstrukturen für Windenergieanlagen und Plattformen*. Berlin: Beuth Verlag.
- [17] DIN 1045-1 (2008) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Berlin: Beuth Verlag.
- [18] Barlett M. F.; Macgregor, J. G. (1996) Statistical analysis of compressive strength of concrete in structures in: ACI Materials Journal 93-M18, pp. 158–168.
- [19] Lohaus, L.; Werner, M.; Cotardo, D. (2014) Experimental Test Procedures to Simulate the In Situ Assembly of Grouted Joints in: Proc Int Wind Engineering Conf. IWEC, Hannover, 3./4. Sept. 2014. pp. 172–179.
- [20] Werner, M.; Lohaus, L.; Cotardo, D. (2015) Novel Test Facilities for Grouted Connections in: Proc 12th German Wind Energy Conf. DEWEK, Bremen, 19./20. Mai 2015.
- [21] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Werner, M. (2016) Practical Performance of High-strength Offshore Grout in Laboratory and Large-scale Execution Tests in: Proc 4th Int Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials. HiPerMet 2016, Kassel, 9. –11. März 2016. pp. 83–84. ISBN: 978-3-7376-0094-1
- [22] Cotardo, D.; Lohaus, L.; Werner, M. (2017) Practical Performance of OPC-grout for Offshore Wind Turbines in Large-scale Execution Tests in: Proc 27th Int Offshore and Polar Engineering Conference. ISOPE, San Francisco, 25. –30. Juni 2017.
- [23] Schaumann, P.; Henneberg, J.; Raba, A.; Lohaus, L.; Cotardo, D. (2018) Überwiegend axial wechselbeanspruchte Grout-Verbindungen in Tragstrukturen von Offshore-Windenergieanlagen, GROWup. Schlussbericht.

Autoren

Dr.-Ing. Michael Werner (Korrespondenzautor) michael.werner-2@rub.de 45355 Essen

Dipl.-Ing. Dario Cotardo d.cotardo@baustoff.uni-hannover.de Leibniz Universität Hannover Institut für Baustoffe – Baustoffwissenschaften Appelstraße 9A 30167 Hannover

Prof. Dr.-Ing. Ludger Lohaus lohaus@baustoff.uni-hannover.de Leibniz Universität Hannover Institut für Baustoffe – Baustoffe, Beton Appelstraße 9A 30167 Hannover

- [24] König, G.; Ahner, C. (2000) Sicherheits- und Nachweiskonzept der nichtlinearen Berechnung im Stahl- und Spannbetonbau in: Wörner, J.-D. [Hrsg.] Sicherheit und Risiko im Bauwesen – Grundlagen und praktische Anwendungen. Darmstädter Statik-Seminar, Vol. 20.
- [25] DIN EN 1990 (2010) Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth Verlag.
- [26] Lotsberg, I. (2013) Structural mechanics for design of grouted connections in monopile turbine structures in: Marine Structures 32, pp. 113–135.
- [27] Krahl, W.; Karsan, D. I. (19985) Axial Strength of Grouted Pile-to-Sleeve Connections in: Journal of Structural Engineering 111, no. 4, pp. 889–905.
- [28] Tebbett, I. E.; Billington, C. J. (1985) Recent Developments in the Design of Grouted Connections in: Proceedings of the 17th Annual OTC, number OTC 4890. Offshore Technology Conference, Houston, 6.–9. Mai 1985.
- [29] Lotsberg, I.; Serednicki, A.; Bertnes, H.; Lervik, A. (2012) Design of grouted connections for monopile offshore structures – Results from two Joint Industry Projects in: Stahlbau 81, H. 9, S. 695–704.
- [30] Scholle, N.; Weicken, H.; Werner, M. (2014) Windenergieforschung am Institut für Baustoffe in: Festschrift Ludger Lohaus zur Vollendung des sechzigsten Lebensjahres. Universität Hannover, Berichte aus dem Institut für Baustoffe, H. 12. S. 31–40. ISBN: 978-3-936634-13-6
- [31] Hansen, M. (2004) Zur Auswirkung von Überwachungsmaßnahmen auf die Zuverlässigkeit von Betonbauteilen [Dissertation]. Universität Hannover.
- [32] Cotardo, D.; Haist, M.; Lohaus, L.; Begemann, C. (2019) Rotatorische und oszillatorische Scherversuche zur Ermittlung steifigkeitsrelevanter Kenngrößen von Offshore-Vergussmörteln unter dem Einfluss des Early-age Movement in: Proc 28th Conf and Laboratory Workshops. Regensburg.
- [33] Cotardo, D.; Haist, M.; Lohaus, L. (2019) Early-age Movement in Grouted Joints for Offshore Applications – Determination of the Development of Grout-stiffness in: Proc 29th Int Offshore and Polar Eng Conf. ISOPE, Honolulu, Hawaii, 16.–21. Juni 2019.

Zitieren Sie diesen Beitrag

Werner, M.; Cotardo, D.; Lohaus, L. (2020) *Herleitung eines Teilsicherheitsbeiwerts für hochfeste Vergussmörtel in Offshore-Anwendungen.* Bautechnik 97, H. 5, S. 350–359. https://doi.org/10.1002/bate.201900087

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 7. Oktober 2019; angenommen: 5. März 2020.