

Ermüdungsverhalten von Betonstahl im Langzeitfestigkeitsbereich, bei Variation der Prüfmethodik sowie unter kombinierter Einwirkung von Korrosion

Wissenschaftlicher Kurzbericht Nr. 75 (2024)

Autoren: Stefan Rappl; Kai Osterminski

Arbeitsgruppe 3: Stahl und Korrosion

1 Einleitung

Auf Bauwerke wie z.B. Windenergieanlagen (WEA) wirken neben statischen Lasten ebenfalls dynamische Beanspruchungen ein. Über die Nutzungsdauer ist dabei mit rund 10^9 Lastwechseln (LW) infolge einer Windbeanspruchung zu rechnen. Aufgrund von Zeit- und Kostengründen werden in Laboruntersuchungen Ermüdungsversuche i.d.R. nach 2 Mio. LW abgebrochen. Dementsprechend liegen im Langzeitfestigkeitsbereich nur wenige Erkenntnisse vor. Um Prüfeinflüsse gering zu halten, werden in den Prüfnormen Vorgaben zur Prüfmethodik gegeben [1]. Erreichen im Meerwasser gelöste Chloride die Bewehrung, ist z.B. bei Offshore-WEA mit einer zusätzlichen Korrosionseinwirkung zu rechnen.

2 Theoretischer Hintergrund

Langzeitfestigkeitsbereich

Die Wöhlerlinie definiert die Grenze ab der mit einem Materialversagen zu rechnen ist. Im Zeitfestigkeitsbereich ist bei doppeltlogarithmischer Darstellung der beiden Achsen ein linearer Zusammenhang erkennbar. Der Begriff der „Dauerfestigkeit“ gilt aus heutiger Sicht für Betonstähle jedoch als überholt. Vielmehr ist in diesem Bereich mit einer weiteren Abnahme der Wöhlerlinie, jedoch mit geringerer Steigung zu rechnen. Letztere wurde überwiegend aus bestehenden Daten extrapoliert und nur auf Grundlage weniger Daten abgesichert.

Prüfmethodik

In Abhängigkeit der Prüfvorschrift werden unterschiedliche Spannungen als Fixpunkte angesetzt. Physikalisch betrachtet, werden bei fixierter Oberspannung die Probekörper um die Schwingweite entlastet, während sie bei einer Fixierung der Unterspannung die Belastung ansteigt. Die physikalische Arbeit je Lastwechsel errechnet sich bei einer sinusförmigen Belastung zu:

$$W_{LW} = \frac{S_0 \cdot L_0}{E} \left(\sigma_m^2 + \frac{\sigma_a^2}{2} \right)$$

Werden die Konstanten Querschnittsfläche (S_0), freie Probenlänge (L_0) und Elastizitätsmodul E nicht betrachtet, ist zu erkennen, dass die zu leistende Arbeit lediglich vom Quadrat der Mittelspannung σ_m und dem halben Quadrat der Spannungsamplitude σ_a abhängt.

Kombinierte Einwirkung

Wirken auf metallische Werkstoffe neben dynamischen Schwingbeanspruchungen gleichzeitig korrosive Medien ein, sinkt die ertragbare Lastwechselzahl im Vergleich zu Schwingbelastungen an Luft [2]. Mit abnehmender Frequenz und zunehmender Aggressivität nimmt dieser Effekt deutlich zu.

3 Prüfstrategie

Langzeitfestigkeitsbereich

Insgesamt wurden 82 Betonstähle aus zehn verschiedenen Werken mit Durchmessern von 10 und 16 mm getestet. Die Schwingweiten wurden mit 135/150/175 N/mm² vergleichsweise gering gewählt, um entsprechend hohe Lastwechselzahlen zu erreichen.

Prüfmethodik

Für die Untersuchung dieser Fragestellung wurden insgesamt 67 Betonstabstähle bei unterschiedlich fixierten Ober-, Mittel- und Unterspannung getestet (Abbildung 1).

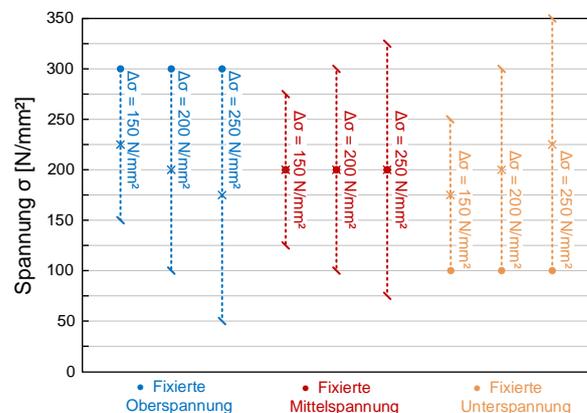


Abbildung 1: Durchgeführte Versuche "Prüfmethodik"

Kombinierte Einwirkung

Hierfür wurden 50 Betonstabstähle ohne und 19 mit gleichzeitiger Korrosionseinwirkung (1,5 M-% NaCl) unter einer Wechselbelastung bei einer Mittelspannung von 0 N/mm² getestet. Der Probekörperaufbau ist Abbildung 2 zu entnehmen.

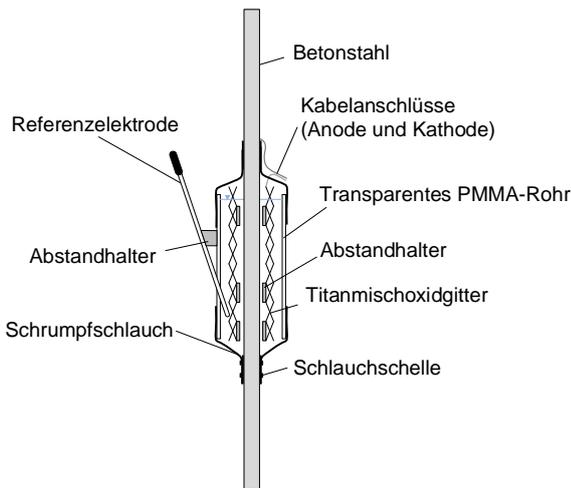


Abbildung 2: Schematischer Versuchsaufbau Korrosionsprobekörper

4 Ergebnisse

Langzeitfestigkeitsbereich

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Langzeitfestigkeitsbereich sind in Abbildung 3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass nach 10 Mio. LW kein gültiger Bruch mehr auftrat und dass Durchläuferergebnisse bis zu 10⁸ LW festgestellt werden konnten. Ein vorzeitiges Versagen konnte in erster Linie auf unplanmäßige Kerben aus dem Richtprozess des Ringmaterials zurückgeführt werden. Mit zunehmender Schwingweite stieg sowohl die Häufigkeit an gültigen als auch an Einspannbrüchen.

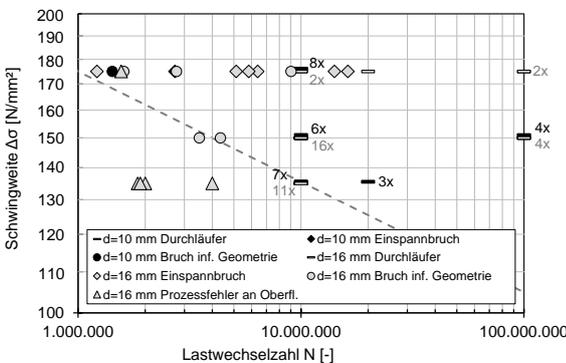


Abbildung 3: DSV-Ergebnisse im Langzeitfestigkeitsbereich

Prüfmethodik

Die Abnahme der Durchläuferhäufigkeit von fixierter Ober- (85%), Mittel- (80%) zu Unterspannung (60%) bei einer Schwingweite von 150 N/mm² steht im Widerspruch zu den theoretischen Überlegungen zur physikalisch geleisteten Arbeit. In diesen Untersuchungen zeigte sich außerdem, dass für den untersuchten Betonstahl anscheinend eine Sensitivität zur variablen Komponente der physikalischen Arbeit besteht, welche aus der Schwingweite allein abgeleitet werden kann.

Kombinierte Einwirkung

Durch eine gleichzeitige Korrosionseinwirkung konnte eine Abminderung der Wechselschwingfestigkeit von 140,8 N/mm² auf rund 42,9 N/mm² beobachtet werden. Bei Betrachtung der Betonstähle konnten an den Querrippenfüßen zahlreiche Anrisse detektiert werden (Abbildung 4).

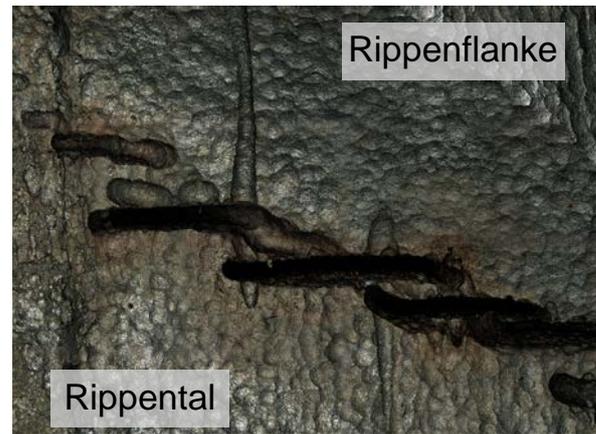


Abbildung 4: Anrisse am Rippenfuß

5 Zusammenfassung

Im Langzeitfestigkeitsbereich konnte eine große Reserve des Betonstahlmaterials festgestellt werden, sofern unplanmäßige Kerben der Oberfläche ausgeschlossen werden können. Anhand der Versuchsergebnisse konnte ein Widerspruch zur gesamten physikalisch geleisteten Arbeit beobachtet werden. Ein maßgebender Einflussfaktor wird daher der variablen Komponente (Schwingweite) zugeordnet. Infolge einer kombinierten Einwirkung aus Korrosion und Ermüdung konnte eine ca. 70%ige Abnahme der Wechselschwingfestigkeit beobachtet werden.

6 Literatur

- [1] DIN 488-1:2009-08: Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung. Beuth Verlag, 2009
- [2] Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. Bauverlag, 1995