

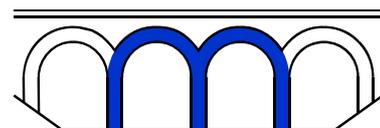
Forschungsbericht

Nr. 0514

Bemessungsmodell für die Ermüdungsbeanspruchung
bei schwingungsanfälligen turmartigen Bauwerken
aus Stahlbeton und Spannbeton

DIBt – ZP 52-5-3.85-1103/04

*Zusammenfassung und
Wertung für die praktische Anwendung*



Institut für Massivbau
Leibniz Universität Hannover
Appelstraße 9A
30167 Hannover

1. Zusammenfassung

1.1 Ausgangssituation

Einhergehend mit der Entwicklung von immer leistungsfähigeren Windenergieanlagen sowie durch die Errichtung von Offshore-Windparks erhöhen sich die Beanspruchungen auf die gesamte Tragkonstruktion einer Anlage. Für die Dimensionierung der einzelnen Bauteilabmessungen sind neben den Maximalbeanspruchungen oftmals die Ermüdungsbeanspruchungen infolge häufig wiederholender Einwirkungen entscheidend.

Die in den Vorschriften für Windenergieanlagen angegebenen Ermüdungsnachweise für Beton basieren auf einer vereinfachten, linearen Akkumulationshypothese nach Palmgren und Miner. Diese berücksichtigt jedoch nicht das ausgeprägt nichtlineare Materialverhalten von Beton unter Ermüdungsbeanspruchung sowie den Einfluss unterschiedlicher Belastungsreihenfolgen auf die resultierende Ermüdungsfestigkeit. Ebenfalls bleiben die Auswirkungen infolge mehraxialer Beanspruchungszustände unbeachtet. Die Anwendung der linearen Akkumulationshypothese kann daher, wie Versuche in der Literatur belegen, zu unsicheren oder aber auch zu unwirtschaftlichen Betonkonstruktionen für Windenergieanlagen führen.

1.2 Erweiterung eines Schädigungsmodells für Beton unter mehrstufiger und mehraxialer Ermüdungsbeanspruchung

1.2.1 Mehrstufige Ermüdungsbeanspruchung

In der vorliegenden Arbeit wird deshalb ein in der Literatur dokumentiertes nicht-lineares Ermüdungsmodell für Beton unter einaxialer Beanspruchung mit konstanter Amplitude für die Anwendung bei mehrstufiger und mehraxialer Ermüdungsbeanspruchung erweitert. Das Modell für den Ermüdungsprozess basiert auf einer energetischen Betrachtungsweise. Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie wird der Schädigungszustand im Beton mit Hilfe der im Ermüdungsprozess dissipierten Energie aus einem Materialgesetz unter monotoner Beanspruchung bestimmt.

Die für mehrstufige, einaxiale Druckschwellbeanspruchungen erweiterte energetische Schädigungshypothese führt bei Belastungsgeschichten mit aufsteigender

Amplitude zu einem früheren rechnerischen Versagen als die lineare Akkumulationshypothese. Die Anwendung der Palmgren-Miner-Regel (P-M-H) führt bei derartigen Belastungsreihenfolgen somit zu einer Überschätzung der Ermüdungslebensdauer und demzufolge zu unsicheren Berechnungsergebnissen. Bei Belastungsgeschichten mit fallender Amplitude tritt hingegen das Ermüdungsversagen nach der energetischen Schädigungshypothese später ein, und die Palmgren-Miner-Regel führt zu unwirtschaftlichen Berechnungsergebnissen.

In Bild 1.1 sind nach der linearen Akkumulationshypothese berechneten Schädigungswerte D^{P-M} für eine zweistufige Ermüdungslastgeschichte mit aufsteigender und fallender Amplitude aufgeführt. Die Schädigungswerte D^{P-M} sind für den Zeitpunkt berechnet, bei dem nach energetischem Schädigungsmodell das Versagen im Wöhlerversuch eintritt, $L^{fat} = 1$, und die Bruchschwingspielzahl N_F der zweistufigen Ermüdungslastgeschichte erreicht wird.

Aufsteigende Amplitudenwechsel führen demnach zu Schädigungswerten nach Palmgren-Miner von $D^{P-M}(L^{fat} = 1) \leq 1$. Dies bedeutet, dass bei dem energetischen Modellansatz das Ermüdungsversagen bereits erreicht wird, während bei linearer Akkumulation noch Schwingspielzahlen aufgenommen werden könnten. Bei aufsteigender Belastungsreihenfolge überschätzt die Palmgren-Miner-Hypothese die Ermüdungslebensdauer und führt im Vergleich zum energetischen Modell zu unsicheren Berechnungsergebnissen. Bei fallender Amplitude treten hingegen nur Schädigungswerte auf, für die $D^{P-M}(L^{fat} = 1) \geq 1$ gilt. Die Palmgren-Miner-Hypothese unterschätzt in diesem Fall die Ermüdungslebensdauer und führt somit zu konservativen Berechnungsergebnissen.

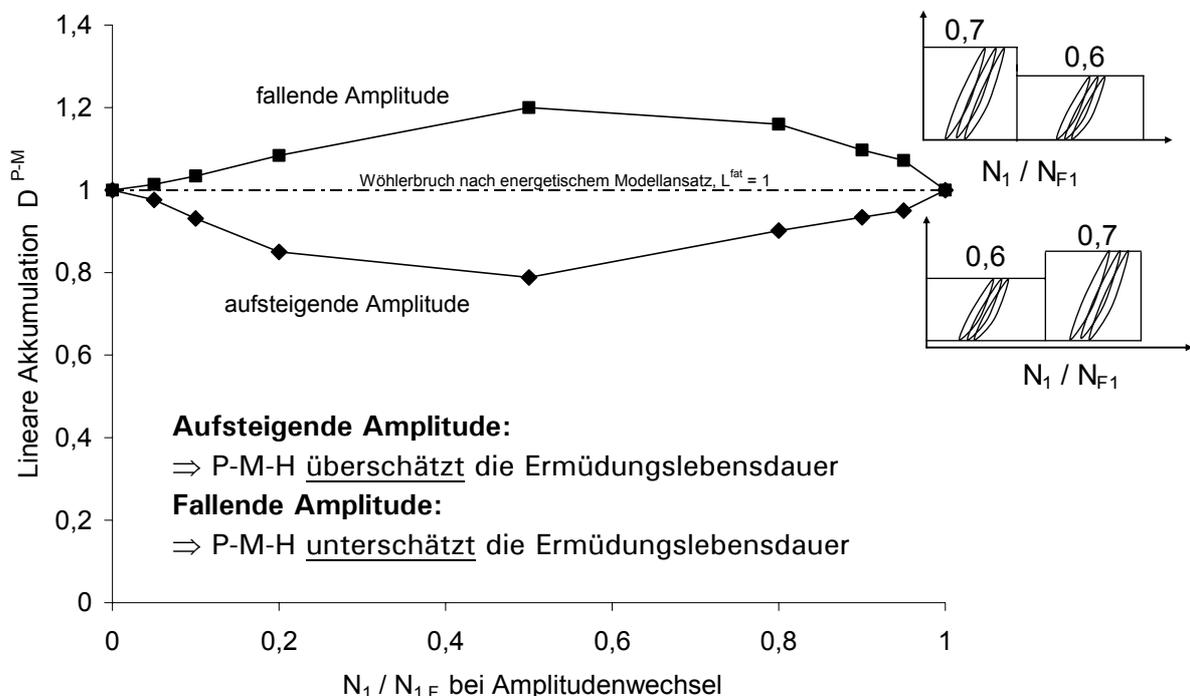


Bild 1.1: Vergleich der Berechnungsergebnisse zwischen energetischem Schädigungsmodell und der linearen Akkumulationshypothese für eine zweistufige Ermüdungslastgeschichte mit fallender und aufsteigender Amplitude

1.2.2 Validierung des mehrstufigen Schädigungsmodells

Zur Validierung des erweiterten Modellansatzes wurden experimentelle Untersuchungen an Betonzylindern unter ein- und überwiegend zweistufigen Ermüdungslastgeschichten durchgeführt. Es kann eine gute Übereinstimmung zwischen den Versuchsergebnissen und dem erweiterten, mehrstufigen Ermüdungsmodell festgestellt werden.

1.3 Mehraxiale Ermüdungsbeanspruchung

1.3.1 Bruchschwingspielzahlen

Um auch Auswirkungen infolge mehraxialer Ermüdungsbeanspruchungen auf den Schädigungsprozess im Beton erfassen zu können, wurden ferner die Parameter des energetischen Ermüdungsmodells für die Erweiterung auf mehraxiale Beanspruchungszustände mit Druckschwellversagen in Hauptbeanspruchungsrichtung hergeleitet. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Ermittlung der Bruchschwingspielzahlen für mehraxiale Ermüdungsbeanspruchungen. Zu diesem Zweck wurden Schädigungsvariablen für das Fünfparametermodell nach Willam-Warneke eingeführt, mit denen die Tragfähigkeitskurven auf den Hauptmeridianen in die von den Bruchschwingspielzahlen abhängigen Ermüdungskurven transformiert wurden.

Für den ebenen Spannungszustand können die Bruchschwingspielzahlen direkt aus den Berechnungen der Bruchumhüllenden für unterschiedliche Schwingspielzahlen ermittelt werden. Die berechneten, zweiaxialen Versagenskurven sind exemplarisch für eine bezogene Unterspannung von $S_{cd,min} = 0$ in Bild 1.2 aufgeführt. Bis $\log N = 6$ ist ein isotropes Schädigungsverhalten erkennbar. Die Festigkeitsabnahme bei zunehmender Schwingspielzahl ist unter einaxialer und zweiaxialer Ermüdungsbeanspruchung gleich groß. Anschließend tritt für größere Schwingspielzahlen eine stärkere Festigkeitsabnahme bei zweiaxialer Druckschwellbeanspruchung ($\alpha = 1$) auf als bei einaxialer Druckschwellbeanspruchung. Das ist auf die unterschiedlichen Verläufe der Schädigungsvariablen im hochzyklischen Bereich zurückzuführen, dass bis ca. $\log N = 8$ die zweiaxiale Ermüdungsfestigkeit unter Druckschwellbeanspruchung größer ist als die einaxiale Ermüdungsfestigkeit. Für $\log N = 10$ trifft dies nicht mehr zu. Die Versagenskurve für $\log N = 12$ erfüllt gerade noch die Konvexitätsbedingung des verwendeten Versagensmodells von Willam-Warneke.

Weiterhin ist in Bild 1.2 ersichtlich, dass bereits eine geringfügig vorhandene Querzugbeanspruchung zu einer signifikanten Festigkeitsabnahme unter Ermüdungsbeanspruchung führt. Versagenskurven für andere Unterspannungen sind im Anhang des Berichts zusammengestellt. Das Vorgehen zur Bestimmung von

mehraxialen Versagenskurven wurde an in der Literatur dokumentierten Versuchen verifiziert.

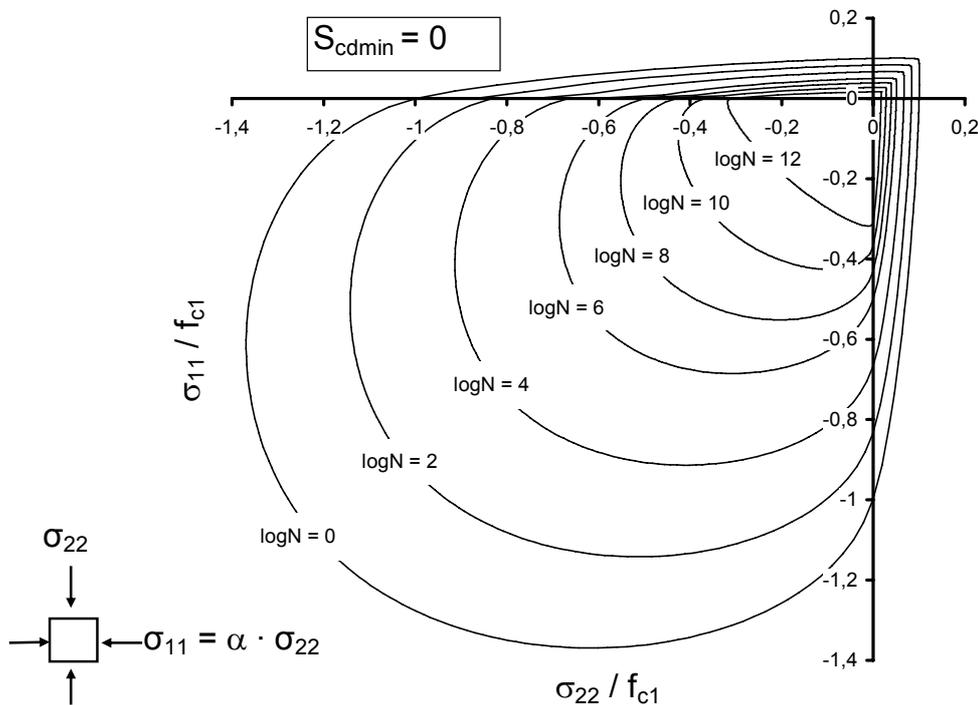


Bild 1.2: Versagenskurven für den ebenen Spannungszustand

1.3.2 Schädigungsverläufe

Die Schädigungsentwicklungen wurden vorwiegend für rotationssymmetrische und zweiachiale Ermüdungsbeanspruchungen jeweils mit Querdruck oder mit geringem Querzug berechnet.

Die Ergebnisse der Schädigungsuntersuchungen für konstante Oberspannungen bei unterschiedlichen Querbeanspruchungen sind in Bild 1.3 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass die Beanspruchungsverhältnisse $\alpha = 0,2$ und $\alpha = 0,5$ zu den größten Ermüdungsschädigungen beim Erreichen des Wöhlerversagens führen. Vorhandene Querzugbeanspruchungen führen hingegen bei $\alpha = -0,05$ und $\alpha = -0,1$ zu einer deutlich geringeren Ermüdungsschädigung bzw. Steifigkeitsdegradation. Daraus folgt, dass in Betonkonstruktionen unter zweiachialer Ermüdungsbeanspruchung die Möglichkeit zur Spannungumlagerung im Ermüdungsprozess durch Querdruck erhöht und durch Querzug verringert wird.

Der Einfluss des Beanspruchungsverhältnisses auf die resultierende Ermüdungsfestigkeit wird durch die in Tabelle 1.1 angegebenen Bruchschwingspielzahlen für deutlich. Die Ermüdungsfestigkeiten werden für die in Bild 1.3 untersuchten zweiachialen Ermüdungsbeanspruchungen berechnet. Die Bruchschwingspielzahlen sind gegenüber dem einaxialen Fall je nach Beanspruchungsverhältnis erheblich größer oder signifikant niedriger. Besonders deutlich wird, dass bereits eine

geringe Querkzugbeanspruchung die resultierende Bruchschwingspielzahl erheblich reduziert.

Tabelle 1.1: Bruchschwingspielzahlen für die in Bild 1.3 aufgeführten Schädigungs-verläufe

α [-]	-0,05	0	0,2	0,5	1,0
N_F	678	63.242	6.622.165	15.885.468	618.017
$N_F(\alpha)/N_F(\alpha=0)$	0,01	1,0	104,7	251,2	9,8

$\sigma_{22,max} = 0,6 \cdot f_{c1}$; $\sigma_{22,min} = 0$
 $N_F =$ Bruchschwingspielzahl in Abhängigkeit des Beanspruchungsverhältnisses α

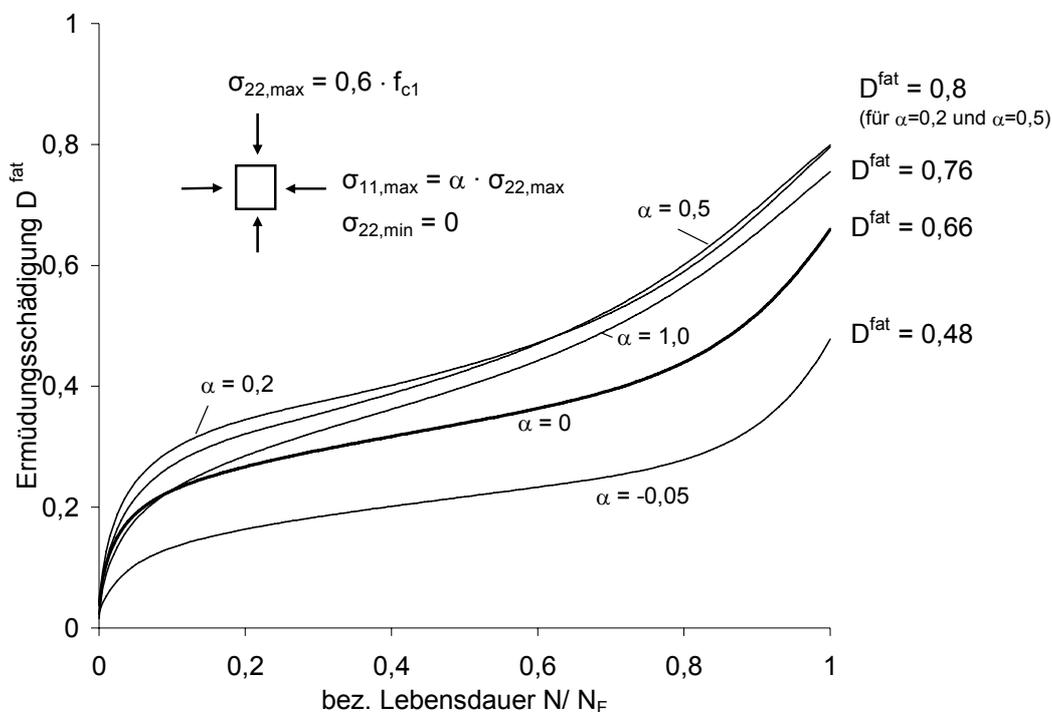


Bild 1.3: Vergleich der Schädigungsentwicklungen für $\sigma_{22,max} = 0,6 \cdot f_{c1}$ und Variation der Querkbeanspruchung α , dargestellt für $-0,05 \leq \alpha \leq 1,0$.

1.3.3 Vereinfachter Bemessungsvorschlag bei mehraxialer Ermüdungsbeanspruchung

Zur vereinfachten Berücksichtigung des Einflusses aus mehraxialen Beanspruchungszuständen werden Modifikationsfaktoren für die einaxiale Ermüdungsfestigkeit abgeleitet. Diese Modifikationsfaktoren können aus aufgestellten Diagrammen entnommen werden und direkt in die Bestimmungsgleichungen zur Berechnung der Bruchschwingspielzahlen nach DIN 1045-1 oder der DIBt Richtlinie für Windenergieanlagen eingesetzt werden. Die Bestimmungsgleichungen sind in Gl. (1.1) und Gl. (1.2) mit dem Modifikationsfaktor $\lambda_{c2}(N,\alpha)$ bei zweiaxialer Beanspruchung und dem Modifikationsfaktor $\lambda_{c3}(N,r)$ bei Druckmeridianbeanspruchung aufgeführt.

$$S_{cd,min} = \gamma_{sd} \cdot \lambda_{c2 \text{ bzw. } c3}(N, r \text{ bzw. } \alpha) \cdot \sigma_{c,min} \cdot \eta_c / f_{cd,fat} \tag{1.1}$$

$$S_{cd,max} = \gamma_{sd} \cdot \lambda_{c2 \text{ bzw. } c3}(N, r \text{ bzw. } \alpha) \cdot \sigma_{c,max} \cdot \eta_c / f_{cd,fat} \tag{1.2}$$

Beispielhaft zeigt Bild 1.4 den Verlauf des Modifikationsfaktors $\lambda_{c2}(N,\alpha)$ bei zwei-axiale Ermüdungsbeanspruchung für die bezogene Unterspannung $S_{22,cd,min} = 0$.

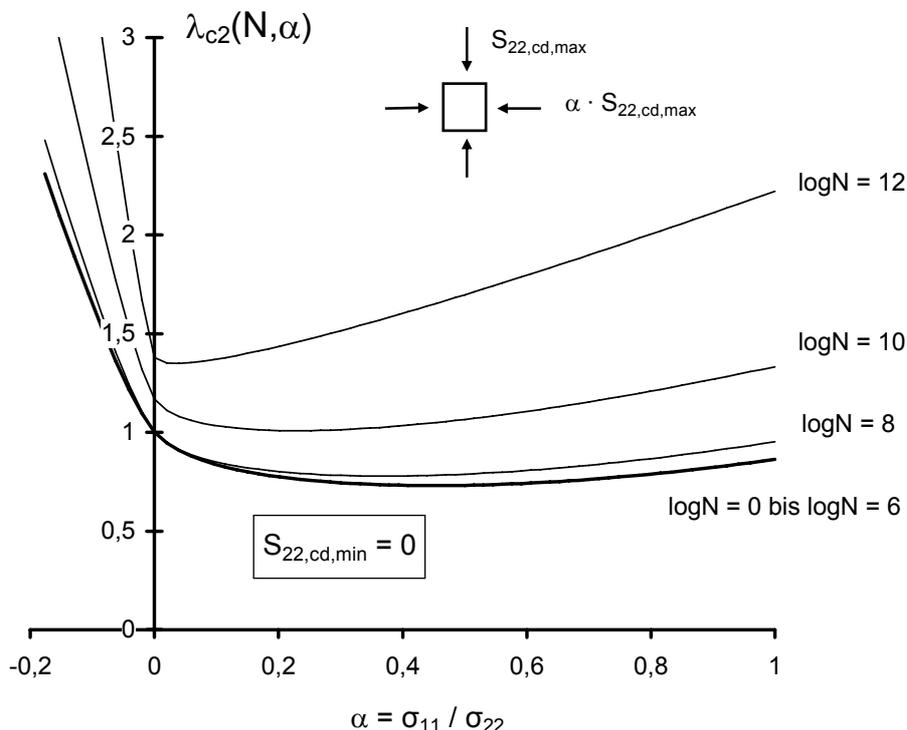


Bild 1.4: : Modifikationsfaktor $\lambda_{c2}(N, \alpha)$ bei zweiaxialer Ermüdungsbeanspruchung für die bezogene Unterspannung $S_{22,cd,min} = 0$.

1.4 Numerische Schädigungsanalysen am Spannbetonschaft einer Windenergieanlage

Der zur Berechnung von mehrstufigen und mehraxialen Ermüdungsbeanspruchungen erstellte Schädigungsalgorithmus wurde als User-Subroutine an das im Finite-Elemente-Programm ABAQUS® zur Verfügung stehende elasto-plastische Betonmodell adaptiert. Hierdurch konnten numerische Schädigungsanalysen an einem Spannbetonschaft für eine Windenergieanlage und an dem vorhandenen Lasteinleitungsbereich des Stahladapters durchgeführt werden. Hierfür wurden Betriebslastkollektive des Anlagenherstellers verwendet, die für eine Anlagenlebensdauer von 20 Jahren aufgestellt worden waren.

Die numerischen Untersuchungen im Grenzzustand der Ermüdung ergaben, dass die durch Ermüdungsschädigungen hervorgerufenen Spannungsumlagerungen im Querschnitt die resultierende Schädigungsentwicklung gegenüber Schädigungsberechnungen ohne Spannungsumlagerungen signifikant verringern. Weiterhin wurde festgestellt, dass der Einfluss der Belastungsreihenfolge auf die resultierende Ermüdungsfestigkeit durch die Spannungsumlagerungen im Querschnitt näherungsweise wieder aufgehoben wird. Die untersuchten gegenläufigen Belastungsreihenfolgen führten am Ende der numerischen Berechnungen nahezu auf den gleichen Schädigungswert. Die Untersuchungen ergaben zudem eine Ausnutzung der Ermüdungslebensdauer von ca. 30%. Grundsätzlich erscheint eine Abminderung der Schaftwanddicken an Spannbetontürmen durch solche numerischen Schädigungsanalysen möglich, sofern der Ermüdungsnachweis maßgebend für die Querschnittsdimensionierung ist.

Zur Abschätzung der tatsächlich zu erwartenden Schädigungsentwicklung im Spannbetonschaft wurden auch Schädigungsanalysen unter Gebrauchslastniveau durchgeführt. Diese ergaben keine rechnerischen Schädigungswerte am Ende der berechneten Belastungsgeschichten.

Im Lasteinleitungsbereich des Stahlrohrturmes führt die vereinfachte Schädigungsberechnung zum Ermüdungsversagen. In der Kontaktfuge zwischen Spannbetonschaft und Stahladapter wurde ein progressiver Schädigungsfortschritt festgestellt. Dagegen ergibt sich aus der realitätsnäheren Schädigungsberechnung unter zweiachsender Ermüdungsbeanspruchung kein Ermüdungsversagen. In den Bereichen, in denen durch die Umlenkkräfte aus den Spanngliedern Querkzugspannungen auftreten, wird ebenfalls kein Ermüdungsversagen in Hauptbeanspruchungsrichtung festgestellt.

1.5 In-situ-Messung am Spannbetonschaft einer Windenergieanlage

Zur Bewertung der aus der numerischen Schädigungsanalyse gewonnenen Erkenntnisse unter realen Bauwerksbedingungen wurden in-situ-Messungen an einem Spannbetonschaft für eine 5 MW-Anlage durchgeführt. Die Messungen wurden an der Stelle mit den höchsten berechneten Betondruckspannungen sowie im Lasteinleitungsbereich des Stahladapters durchgeführt. Der Messzeitraum betrug ca. 21 Monate. Die Bauwerksmessungen begannen kurz nach der Anlageninstallation.

Die Auswertung der Bauwerksmessungen ergab, dass die bislang aufgetretenen Beanspruchungen zu keinen messbaren Schädigungen bzw. Steifigkeitsreduktionen geführt haben. Insgesamt sind die Messergebnisse sowohl unter kurzzeitiger Beanspruchung als auch unter Langzeiteinflüssen rechnerisch nachvollziehbar und plausibel. Die Bauwerksmessungen bestätigten somit prinzipiell die Ergebnisse der numerischen Schädigungsuntersuchungen.

2. Wertung für die praktische Anwendung

Durch die numerische Umsetzung des hier entwickelten Schädigungsansatzes für mehrstufige Ermüdungsbeanspruchungen kann die Spannungsumlagerung in Spannbetontürme für Windenergieanlagen während des Ermüdungsprozesses erfasst wird. Dies kann zu einer Reduzierung der Schaftwanddicken führen. Insbesondere bei Serienfertigungen ist hierdurch eine wirtschaftliche Optimierung zu erwarten.

Für die praktische Anwendung sind besonders die rechnerisch ermittelten Bruchschwingenspielzahlen für mehraxiale Ermüdungsbeanspruchungen sowie der daraus abgeleitete, vereinfachte Bemessungsvorschlag auf Basis der gültigen Vorschriften von hoher Bedeutung. Hierdurch ist es nun möglich, den Einfluss von mehraxialen Beanspruchungszuständen auf die Ermüdungslbensdauer des Betons innerhalb einer statischen Bemessung praxisgerecht zu berücksichtigen. Solche mehraxialen Beanspruchungszustände treten zahlreich in Betonkonstruktionen für Windenergieanlagen auf, wie z.B. bei Hybriddtürmen am Übergang zwischen Stahl- und Spannbetonschaft, bei Spanngliedverankerungen, bei Lasteinleitungen aus einem Stahlrohturm in ein Betonfundament oder bei großvolumigen Schalentragerwerken für Offshore-Gründungskörper.