

Ermüdung der Bewehrung ohne und mit Korrosion

Andreas Volkwein

Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Technische Universität München

Tim Weirich

vormals: Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

Christoph Gehlen

Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Technische Universität München

Zusammenfassung

Bei der Beurteilung von Massivbauwerken, die in die Jahre gekommen sind, wird noch oft der Aspekt von Ermüdung durch schwingende Beanspruchung außer Acht gelassen, wenn die Belastung "nicht vorwiegend ruhend" ist bzw. sogar Schwingweiten über 70 MPa auftreten.

Die aktuellen Bemessungsvorschriften machen hierzu eindeutige Angaben. Dabei wird bei Spannstahl generell Null Korrosion vorausgesetzt, bei korrodierendem Betonstahl ist u.U. ein gewisser Freiraum möglich.

Der Einfluss von Korrosion auf das Dauerschwingverhalten von Betonstahl wurde schon vor über 30 Jahren untersucht, allerdings oft durch Dauerschwingversuche an zuvor korrodierten Proben und zudem oft nicht mit der heute üblichen, konstanten Oberspannung. Das Verhalten von modernen Betonstählen unter gleichzeitiger Beanspruchung durch Schwingen und Korrosion wurde deshalb erst kürzlich begonnen, weitergehend zu untersuchen. Bisher zeigte sich dabei, dass die Lebensdauer dadurch weit mehr reduziert werden kann, als es nach den aktuellen Regeln anzusetzen ist.

1 Einführung

Dass das Thema Dauerschwingbeanspruchung bei der Beurteilung älterer Bauwerke oft gar nicht oder nur stiefmütterlich behandelt wird, liegt möglicherweise daran, dass zumindest in Deutschland bei "nicht vorwiegend ruhend" beanspruchten und nicht außergewöhnlichen Bauwerken nur wenige solcher Schadensfälle bekannt geworden sind. Vielleicht liegt das zudem auch daran, dass das Ermüdungsverhalten von Bewehrung in Deutschland schon sehr früh erforscht wurde und seither bei der Produktentwicklung und -überwachung entsprechend berücksichtigt wurde.

Als Beispiel für einen Schadensfall soll hier die Einspann-Bewehrung in einer Schleusen-Kammerwand von 1964 genannt werden [1]. In 2004 wurden dort an einem Betonriss (**Bild 1**) am Betonstahl nach rd. 100'000 Beanspruchungszyklen Dauerschwingbrüche festgestellt. Es war auch leichte Korrosion im Spiel. Außerdem war der Stahl statisch sehr hoch ausgenutzt. Bemerkenswert ist an diesem Fall, dass das Bauwerk als "vorwiegend ruhend" berechnet wurde.

Nach den heutigen Regelungen (DIN EN 1992 [3]) gelten zwar strengere Maßstäbe, für bestehende Bauwerke darf das Thema Ermüdung aber auf keinen Fall übergangen werden.

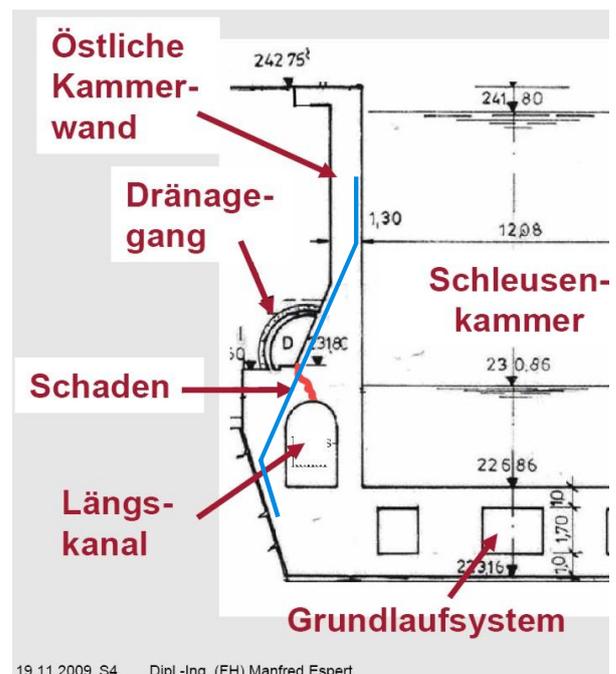


Bild 1: Ermüdungsbrüche am Betonstahl bei der Schleuse Bamberg (Ausschn. aus [2] + Bew.-Lage).

2 Grundlagen zur Wöhler-Linie und zu Normen

In den 1930er Jahren hat man vielerorts erste Dauerschwingversuche an bewehrten Betonbalken durchgeführt, um die Dauerhaftigkeit von "Eisenbeton" belegen zu können. In den 1960er und 1970er Jahren hat man sich dann konkreter mit dem Betonstahl (BSt) und auch Spannstahl (SpSt) befasst.

Beim BSt resultierten daraus dann u.a. die heute bei uns schrägen BSt-Rippen, um dem dominierenden Kerbeinfluss auf das Dauerschwingverhalten besser begegnen zu können. Nach den BSt-Normen DIN 488 von 1972 [4] war die sogenannte "Dauerschwingfestigkeit" des geraden oder gebogenen BSts durch Prüfung in Betonbalken nachzuweisen. Wegen des großen Aufwandes ist man dann aber nach und nach auf die Prüfung einer freien BSt-Probe übergegangen, wobei man zunehmend auch Hochfrequenz-Pulsatoren einsetzte.

Bei SpSt gab es diesbezüglich bereits 1965 eine Richtlinie zur Erstprüfung und Produkt-Überwachung [5].

Seit diesen Regelwerken wird BSt und SpSt bei uns mit einer konstanten Oberspannung σ_0 geprüft, **Bild 2**, oben. Im Laufe der Zeit wurden diese Werte immer wieder leicht variiert, bei SpSt waren anfangs sogar mindestens 2 Werte zu wählen. Z.Zt. gelten für BSt [6] und BSt-Verbindungen [7] 0,6 Re, wenn sowie für SpSt [8] 0,7 R_m, wenn. In anderen Technikbereichen legt man dagegen meist eine oder besser mehrere definierte Mittelspannungen fest oder wählt eine konstante Unterspannung. Es gab und gibt bis in die jüngste Zeit aber auch immer wieder Forschungsarbeiten zum Dauerschwingverhalten von Bewehrung, bei denen eine konstante Mittel- oder Unterspannung vorgegeben wurde (z.B. [9]). Eine Umrechnung der Ergebnisse ist jedoch leider nur möglich, wenn auch dieser Parameter in ausreichendem Umfang variiert wird. Mit $\sigma_0 = \text{konst}$ liegt man generell auf der sichereren Seite.

Vor dem Model Code 1990 bzw. vor der damals neuen Norm DIN 1045-1 von 2001 [10] ging man davon aus, dass unterhalb einer bestimmten Schwingweite $\Delta\sigma$ die Lastzyklen unendlich oft ertragen werden können: "Dauerschwingfestigkeit", vgl. **Bild 2**, mittig.

Mit den neuen Bemessungsansätzen wurde für "nicht vorwiegend ruhend" beanspruchte Bauwerke der Nachweis der Betriebsfestigkeit auf probabilistischer Basis eingeführt, wobei davon ausgegangen wird, dass es keine "Dauerschwingfestigkeit" gibt sondern dass die Wöhler-Linie auch nach $N=2$ Mio. weiter abfällt, wenn auch nur schwach, **Bild 2**, unten.

Die nach den aktuellen Normen zugrunde zu legenden Werte sind in **Tabelle 1** zusammengestellt.

Zur Vereinfachung hat man die Knickpunktlagen einheitlich auf $N^*=1$ Mio. festgelegt.

"Überwiegend ruhend" ohne Zeitbeschränkung gilt unverändert bis $\Delta\sigma = 70$ MPa (und bis $N=100$ Mio.).

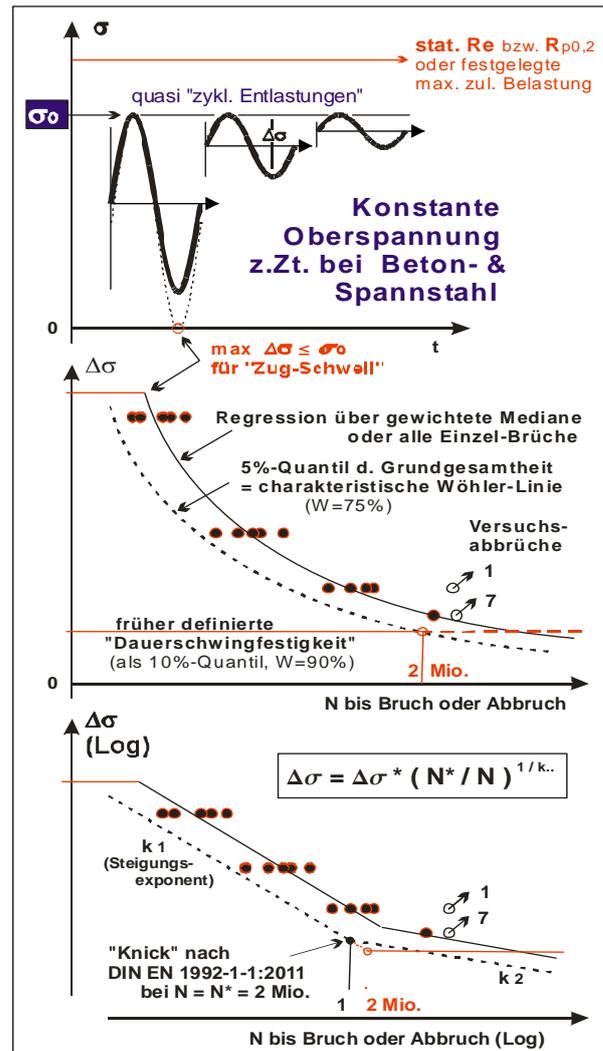


Bild 2: Schema zur Auswertung von Ergebnissen aus Dauerschwingversuchen bis zur Aufstellung einer charakteristischen Wöhler-Linie als Bemessungsgrundlage. Die Schwingweiten der "Bemessungs-Wöhler-Linie" müssen noch durch den Teilsicherheitsbeiwert γ_s , $\text{fat} = 1,15$ geteilt werden.

Tabelle 1: Mindestwerte nach DIN 488-1 [6] und Bemessungswerte nach DIN EN 1992-1 [3]:

DIN EN 1992-1-1: 2011-01 + NA:2011-01 // DIN 488-1:2009			
Betonstahl	ungeschweißt, gerade ¹	geschweißt	
D _n mm	≤ 28	> 28	alle
Umgebung	XC1 (korrosiv) // "Labor"		
N* Mio.	1		
$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ MPa	175	145	85 // 100
k ₁	5 // 4		4
k ₂	9 (9...5) // 9		5
"überw. ruhend"	$\Delta\sigma_{Rsk}(N = \infty) = 70$ MPa		0 @ $N = \infty$
¹) gebogen abzumindern in Abhängigkeit vom Biegerollendurchm.			
Spannstahl (XC1)	sofort. Verb. & Einzellitze in Kunstst.-Rohr	gerade SpGl. & gekrümmte in Kunstst.-Rohr	ger. & gekr. SpGl. in Blechröhr
N* Mio.	1		
$\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ MPa	185 / 120 ²	150 / 95 ²	120 / 75 ²
k ₁	5		3
k ₂	9		7

²) Klasse 1 / Klasse 2; Werte gelten f. eingebauten Zustand

In [10] lagen die Bemessungsvorgaben für BSt z.T. noch etwas höher. Wie anschließend durchgeführte Recherchen bei deutschen Prüfinstituten [12] ergaben, haben einige BSt-Produkte diese Anforderungen nicht ganz erfüllen können bzw. es waren die Streuungen zu groß, so dass man für die in 2008 überarbeitete DIN 1045-1 [11] Anpassungen vornehmen musste. Sie wurden so auch in den nationalen Anhang (NA) der heute zuständigen DIN EN 1992-1 [3] übernommen. Bei der aktuellen Stoffnorm DIN 488 [6] sind die Anforderungen im k1-Bereich mit einer steileren Steigung etwas strenger. Bei geschweißten Produkten (z.B. Maten) hat man die Knickpunktlage belassen, während sie zur Bemessung etwas reduziert wurde.

Wie in [13] erst kürzlich dargelegt wurde, decken die aktuellen Bemessungsvorgaben nun die aus der Literatur bekannt gewordenen Versuchsergebnisse sowie die z.Zt. auf dem Markt befindlichen Produkte recht gut ab. Leider ist aber die Kenntnislücke für Lastzyklenzahlen von $N \gg 2 \text{ Mio.}$ immer noch unbefriedigend, wenn man bedenkt, dass oft genau dies die Praxis darstellt.

Mit den genannten Normen soll zunächst die Aufgabe "Bemessen" abgedeckt werden, d.h. unter Vorgabe von N (gemäß geplanter Lebensdauer) sind die ertragbaren $\Delta\sigma$ nachzuweisen. Variable Einwirkungen können dabei mit der Schadensakkumulations-Regel nach Palmgren (1924) und Miner (1945) auf eine einheitliche Vergleichs-Beanspruchung umgerechnet werden, auch wenn diese Methode oft noch unbefriedigend ist.

Für eine Abschätzung der Restlebensdauer eines alten Bauwerks ist dagegen nach N_{Rest} zu fragen. Für die probabilistische Betrachtungsweise sind daher die Streuungen in beide Richtungen ($N, \Delta\sigma$) zu berücksichtigen, **Bild 4**.

3 Zur Auswertung von Versuchsreihen

Die probabilistische Auswertung von Versuchsergebnissen ist z.T. recht komplex, insbesondere, wenn man die Streuung richtig bewerten will. Deshalb wird hier auf einige wesentliche Schritte eingegangen:

Man ermittelt zunächst für die Median-Linie(n) die Lagewerte und Steigungsexponenten ($N^\circ, \Delta\sigma^\circ, k_1, k_2$) und bestimmt dazu die Standardabweichung(n). Entsprechend der vorliegenden Anzahl von Versuchen wird dann für die 5%-Quantile(n) der Quantilfaktor ermittelt und damit vom Stichprobenergebnis auf die Grundgesamtheit hochgerechnet, was die charakteristische Wöhler-Linie ($N^*, \Delta\sigma^*, k_1, k_2$) ergibt. Aus den Streumaßen sollte zuletzt noch der zugehörige Teilsicherheitsbeiwert berechnet werden bzw. bezüglich der Annahme in [3] überprüft werden.

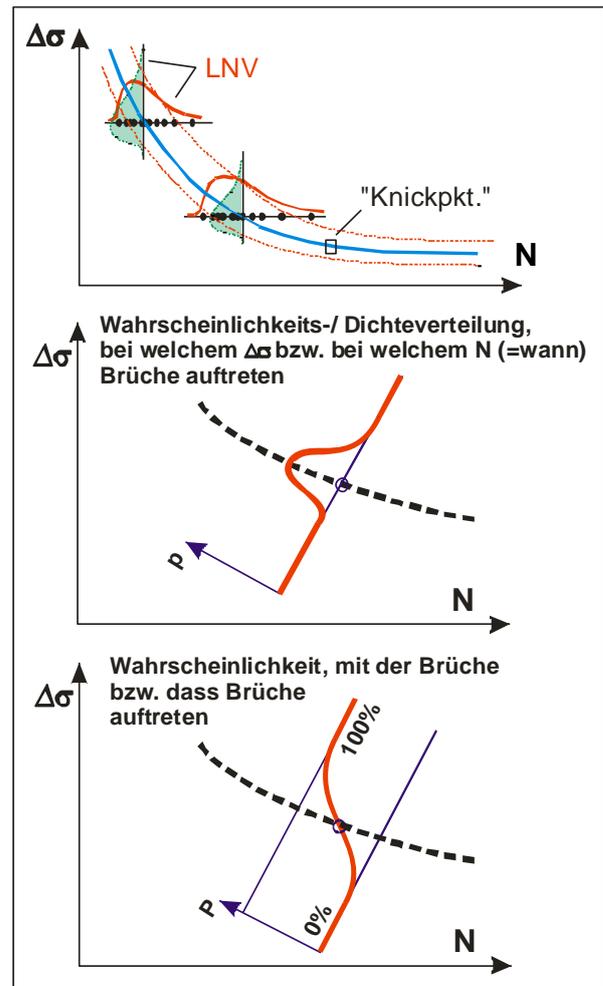


Bild 4: Ansatz für die Streuung der Wöhler-Linie

Bezüglich der Streuung sind mindestens folgende Einflüsse zu bedenken:

- (a) hinsichtlich N :
 - Oberflächen-Profilierung; Kerben; Werkkennzeichen
 - Gefüge-Inhomogenitäten
 - Reibkorrosion (s. Abschn. 4)
 - Korrosion (ohne/ mit Lochfraß; s. Abschn. 4)
 - Temperatur (z.B. Reibungserwärmung)
- (b) hinsichtlich $\Delta\sigma$:
 - Vage dynamische Kalibrierung der Prüfmaschine
 - Prüffrequenz (u.U. auch Einfluss der Massen)
 - Eigenspannungen über den Probenquerschnitt (mit positiver oder negativer Auswirkung auf σ_0 und damit indirekt auf $\Delta\sigma$, s. Abschn. 4)
 - Bezug der Spannungen auf den Nenn- oder Ist-Querschnitt.

Vereinfachend geht man bei der modernen Bemessung davon aus, dass die Streuung als logarithmische Normalverteilung (LNV) betrachtet werden kann. Dabei wird als weitere Vereinfachung meist die 2-parametrische Darstellung angenommen. Die 3-parametrische wäre konsequenter aber auch problematischer. In anderen Technik-Bereichen bedient man sich u.a. auch unterschiedlicher Weibull-Verteilungen.

Für die logarithmierten Werte eine LNV ergibt sich angenehmerweise eine Gauß'sche NV. Deren Mittelwert entspricht dem Median der LNV. Die Standardabweichung der NV ist allerdings schwieriger auf die Streuung einer LNV zu übertragen, insbesondere wegen der hier durchzuführenden Regression (mit Definition eines Streubandes) und der Einbeziehung eines Kurven-Knicks.

Weil nicht nur N eine Zufallsgröße ist sondern auch $\Delta\sigma$ eine sein kann und wegen der Anwendung der Streuung in beide Richtungen, ist an sich ein komplexeres Regressionsverfahren angesagt. Als Vereinfachung und Kompromiss wurde vom Verfasser der Weg gewählt, die im Logarithmischen lineare Regression einmal mit N als streuende Größe und ein zweites Mal entsprechend mit $\Delta\sigma$ durchzuführen und aus beiden Regressions-Geraden die Winkelhalbierende als maßgebende Median-Linie anzusetzen. Je geringer die Streuung ist, desto mehr nähern sich beide Regressionen an. Dieses Vorgehen erscheint auch deshalb sinnvoll, weil meist zu beobachten ist, dass sich im Logarithmischen als Streuband in einem weiten Bereich parallele Linien ergeben ($k_1^* = k_1^\circ$ und $k_2^* = k_2^\circ$). Übertragen auf die Potenzfunktion in **Bild 2**, unten ergibt sich damit ein konstanter Variationskoeffizient über die ganze Wöhler-Linie. Das hat auch den Vorteil, dass über die ganze Wöhler-Linie ein einheitlicher Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{s, \text{fat}}$ zugrunde gelegt werden kann. Mit diesem Beiwert, der sich auf $\Delta\sigma$ bezieht und nach [3] mit 1,15 angenommen werden darf, sollen Unsicherheiten zwischen den geprüften/ überwachten Eigenschaften und den tatsächlichen Eigenschaften im Bauwerk abgedeckt werden. Er geht vom Sicherheitsindex $\beta = 3,8$ (50a), von einem Wichtungsfaktor $\alpha_R = 0,8$ sowie vom 5%-Quantil aus und er impliziert durch den Wert von 1,15, dass der LNV-Variationskoeffizient bezüglich $\Delta\sigma$ rd. 10% nicht überschreitet. Bezüglich N können damit i.d.R. deutlich größere Variationskoeffizienten akzeptiert werden. Das hängt vom Steigungsexponenten ab. Mit z.B. $k_1 = 5$ ergeben sich über 40%.

Für die Regression gilt, dass (a) Versuchsreihen, bei denen auf einzelnen $\Delta\sigma$ -Horizonten jeweils mehrere Proben geprüft werden, zum selben Ergebnis führen wie (b) Versuche, bei denen zu vielen unterschiedlichen $\Delta\sigma$ jeweils nur eine oder wenige Proben geprüft werden. Um dies mit unterschiedlichen Anzahlen je Horizont zu erreichen, muss eine Wichtung vorgenommen werden.

Wenn Versuche ohne Bruch abgebrochen werden, lassen sich diese Diagramm-Punkte nach Schätzformeln

(z.B. nach Rossow) in die Regression einbeziehen. Das ist auch mit der Maximum-Likely-Methode (MLM) möglich, die zudem die Streuung richtiger und meist auch etwas niedriger ermittelt.

Besonders schwierig sind die Bestimmungen von Knickpunktlage und k_2 , wenn man wie in den meisten Fällen zu wenige Brüche nach dem Knick erprüft. Man ist dann u.U. darauf angewiesen, die Annahmen in [3] einzuarbeiten.

Für weitere Details wird hier auf eine noch in Arbeit befindliche Auswertungsrichtlinie verwiesen.

4 Studien zu Einflussparametern

4.1 Allgemein

In der Literatur wurden die Einflüsse auf die Wöhler-Linie von BSt und SpSt schon häufig analysiert, z.B. [13-15]. Als hier berührte Aspekte werden 3 Einflüsse etwas näher betrachtet. Zum Einfluss von Korrosion wird zudem auf eine aktuelle Forschungsarbeit näher eingegangen.

4.2 "Freie Probe" / "Bewehrung im Beton"

Der Frage nach diesem Unterschied wurde schon in einer Reihe von Untersuchungen nachgegangen. Bei SpSt hat sich so gezeigt, dass Reibung dabei zu Reibkorrosion und damit zu einer deutlichen Beeinträchtigung des Dauerschwingverhaltens führen kann [z.B. 15]. Aus diesem Grund wird z.Zt. von der Bauaufsicht gefordert, dass bei SpSt die erprüfte bzw. zu überwachende 5%-Wöhler-Linie mindestens 25% über den Bemessungswerten der **Tabelle 1** liegen muss, wobei vom "sofortigen Verbund" auszugehen ist. Das ist unabhängig von dem zusätzlich noch zu berücksichtigenden Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{s, \text{fat}}$.

Bezüglich BSt sind die Folgerungen aus Untersuchungen oft konträr. Insgesamt scheint aber der Einfluss nur gering zu sein. Die jüngst durchgeführten Untersuchungen an der TU Dortmund [9] ergaben eine marginale Verbesserung mit der Einbettung in Beton. Diese Vergleichsversuche wurden bei konstanter Unterspannung durchgeführt.

Für weitere Details wird hier auf die Zusammenstellung in der Literatur verwiesen.

4.3 Eigenspannungen

Die Frage nach diesem Einfluss kam insbesondere mit der Verbreitung des temporisierten BSts auf. Bei der dabei im Außenbereich entstehenden, wieder angelassenen Martensitschicht geht man davon aus, dass dadurch außen Druckspannungen entstehen, die das Dauerschwingverhalten deutlich verbessern (quasi durch Erniedrigung von σ_0). Untersuchungen in Australien [16] ergaben so eine positive Verschiebung der Wöhler-Linie um fast 40 MPa. Eigene, bisher erst begonnene Untersuchungen ergaben dagegen, dass außen

auch Zugspannungen vorliegen können (bis zu 30 MPa). Bei Untersuchungen in Spanien [17] kam man bei gezogenem SpSt auf äußere Zugspannungen von über 200 MPa.

Hier sind also dringend noch offene Fragen zu klären.

4.4 Korrosion

4.4.1 Übersicht

Die Verschlechterung des Dauerschwingverhaltens durch Korrosion, insbesondere Lochfraß, ist schon öfters untersucht worden, siehe hierzu u.a. die Zusammenstellungen in [14, 15]. Diese Erkenntnisse waren Grundlage für die Festlegungen von k_2 für BSt in den jüngeren Normen [6, 3], s. **Tabelle 1**. Danach geht man davon aus, dass die Wöhler-Linie bis $N=1$ Mio. unverändert gilt und danach ein stärkerer Abfall bis hin zu $k_1=k_2$ zu berücksichtigen ist. Bei SpSt wird jede Korrosion ausgeschlossen.

Im Rahmen von zwei parallelen Forschungsprojekten bei der DFG wurde die Thematik erneut aufgenommen, u.a. auch deshalb, weil die heutigen BSt fast nur noch temporisiert hergestellt werden, womit gegenüber früher neue Bedingungen vorliegen. Über eines der beiden Projekte (a), das erst kürzlich am IWB der Universität Stuttgart abgeschlossen wurde [18-20], wird hier auszugsweise berichtet. Das andere Projekt (b) läuft noch am cbm der Technischen Universität München mit Untersuchungen zum Einfluss der Abnutzung der Profilierungswalzen auf die Kerbwirkung an den BSt-Rippen, zum Einfluss von Korrosion an Betonrisen auf das Dauerschwingverhalten und zur Bestimmung von Eigenspannungen im BSt.

Bei (a) wurde die zyklische mechanische Beanspruchung unter gleichzeitiger Korrosionsbeanspruchung durch Simulation des Betons mit wässrigen Lösungen untersucht. Dabei wurde nicht nur der Frage nachgegangen, wie sich die Wöhler-Linie durch die Korrosion verändert sondern es wurden auch Möglichkeiten betrachtet, ob und wie man den sich anbahnenden Bruch beim Dauerschwingversuch frühzeitig erkennen kann.

Bei beiden Vorhaben wurden zwecks Vergleichbarkeit dieselben BSt-Chargen verwendet. Die Eigenschaften des für die Hauptversuche verwendeten Durchmesser 16 mm in Abhängigkeit von der Walzenstandzeit (Alter) gehen aus **Tabelle 2** und **Bild 5** hervor. Man sieht, dass die Festigkeitswerte leicht zunehmen und die Bruchdehnung etwas zurückgeht. Die unterschiedlichen Walzenstandzeiten wurden zwar auch bei den Dauerschwingversuchen mit einbezogen, jedoch waren hier wegen der geringen Probenzahl keine Abhängigkeiten erkennbar.

Tabelle 2: Mittlere mechanische Kennwerte zum verwendeten BSt (Durchmesser $D_n = 16$ mm)

Eigenschaften von 3x3 = 9 Proben BSt 500 S (B) $D_n=16$ mm				
Walzenalter	Anf.	Mitte	Ende	alle
Re [MPa]	518,5	527,2	547,8	531,1
Rm [MPa]	631,7	628,3	659,0	639,7
Agf %	12,6	12,2	11,6	12,1
Rm / Re [-]	1,22	1,20	1,20	1,21

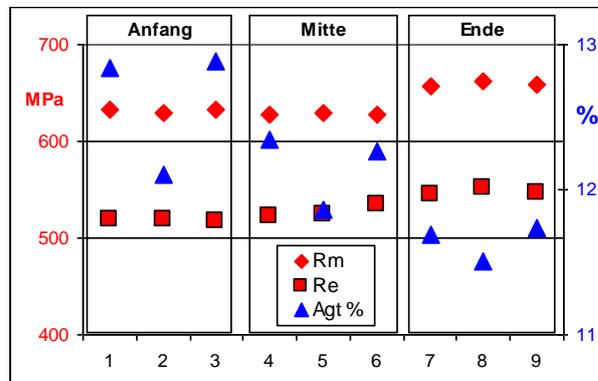


Bild 5: Einzelwerte zu Tabelle 2 in Diagrammform

4.4.2 Dauerschwingversuche ohne/ mit Korrosion

Für die Parameterstudien wurde das in **Tabelle 3** zusammengestellte Programm vorgesehen, das wie bei diesem Thema üblich unter den Kostenbegrenzungen leiden musste.

Tabelle 3: Übersicht zu den Dauerschwingversuchen

Medium und Simulationsziel	0		I		II		III		IV	
	Luft (Labor)		ges. Lösg. CaOH2		ges. Lösg. CaOH2 + 3 M% NaCl		ges. Lösg. CaCO3		ges. Lösg. CaCO3 + 1 M% NaCl	
	-		pH ca. 12,6				pH ca. 8			
	Referenz		Beton gerissen, nicht carbonatis., kein Chlorid		Beton gerissen, nicht carbonatis., + Chlorid!		Beton gerissen, carbonatis., kein Chlorid		Beton gerissen, carbonatis., + Chlorid!	
Dn 16 mm	Frequenz	5 / 15 Hz		0,5 Hz						
	Anzahl	18		18	20	20	20	20	20	
	Prüfspannungen MPa	$\sigma_0 = 300$;		$\Delta\sigma = 250$;	200,	175,	145			
Dn 40 mm	Frequenz	-		-						
	Anzahl	-		-						
	Prüfspannungen MPa	$\sigma_0 = 300$;		$\Delta\sigma =$	200,	175,	145		3 Hz	
									12	

Es wurden 5 für die Praxis relevante Umgebungsbedingungen gewählt. Die Versuche an Luft stellen die Referenz dar. Hier wurden zwei etwas höhere Prüffrequenzen gewählt, um Zeit zu gewinnen (15 Hz bei den beiden unteren Schwingweiten, sonst 5 Hz). Der größere Durchmesser wurde nur unter der Bedingung IV geprüft, weil sich hier bei $D_n=16$ mm der stärkste Korrosionseinfluss gezeigt hatte. Für die Hauptversuche (16 mm) mit Korrosion wurden als Kompromiss 0,5 Hz gewählt, um einerseits der Korrosion genügend Zeit zu lassen (1 Mio. ergeben rd. 23 Tage) und andererseits die Forschungsdauer nicht zu sehr auszudehnen. Der größere Durchmesser wurde bei 3 Hz und nur den 3 unteren Schwingweiten geprüft.

In allen Fällen lag die Temperatur bei rd. 20°C.

Bei allen Proben betrug die freie Prüflänge 600 mm. Während die Referenzversuche in einer üblichen Prüfmaschine gefahren wurden, wurde bei den Versuchen mit Korrosion ein Gerät verwendet, mit dem 4 Proben in einem Kranz gleichzeitig geprüft werden können, ohne dass bei einem Bruch einer Probe die anderen stärker gestört wurden.

Für den Abbruch von Versuchen, bei denen kein Bruch entstand, wurde eine Zyklen-Zahl von $N_{Ziel} = 7$ Mio. festgelegt, was jedoch nur bei den Referenzversuchen von Belang werden sollte.

Die Medieneinwirkung wurde mit aufgesteckten Kunststoffrohren realisiert, **Bild 6**. Hier war zu erwarten, dass die Hauptkorrosion an der Drei-Phasen-Grenze Stahl-Lösung-Luft stattfindet. Diese Stelle könnte man sich als Riss im Beton vorstellen, an dem Wasser, ggf. mit Chloriden bis zum Stahl vorgedrungen ist.

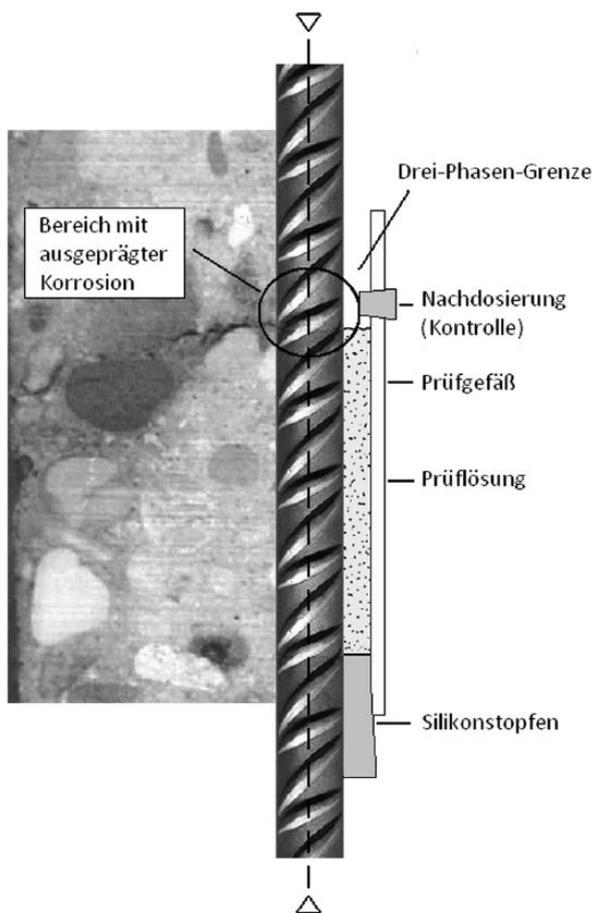


Bild 6: Schema zur Medien-Einwirkung während des Dauerschwingversuchs und Vergleich zur Situation im Beton.

Bei dieser Versuchsart muss man sich darüber klar sein, dass in der Praxis schon viele Belastungszyklen aufgetreten sein können, bevor die Korrosion beginnt. Hier im Versuch beginnt die zyklische Belastung gleichzeitig mit der Korrosion.

Wie zu erwarten war, traten fast alle Brüche genau an der Drei-Phasen-Grenze auf. Nur im Fall von IV gab es auch einige wenige Brüche in der Prüflösung oder am

Rand vom Silikonstopfen. Bei den chloridhaltigen Lösungen hatte sich in den maximal knapp 40 Tagen erwartungsgemäß erster leichter Lochfraß eingestellt.

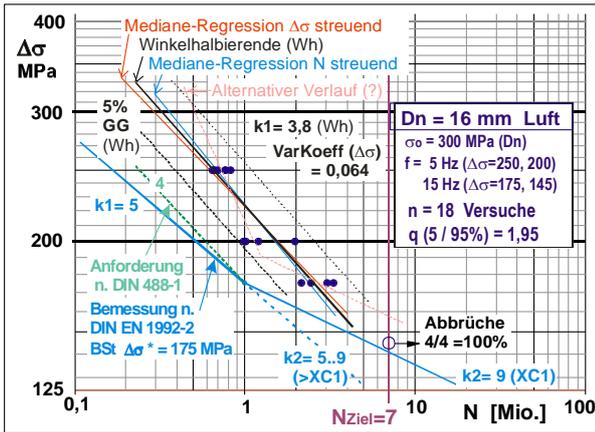
Die je $\Delta\sigma$ -Horizont erreichten Lastzyklen bzw. Korrosionsdauern gehen aus den **Bildern 7 bis 12** hervor.

Die Referenz-Proben ergaben einen Wöhler-Linien-Verlauf, der deutlich über der Anforderung nach DIN 488-1 liegt und damit die Bemessungs-Wöhler-Linie nach DIN EN 1992-1 gut erfüllt. Die festgestellte Streuung (vgl. Angabe des LNV-Variationskoeffizienten bezogen auf $\Delta\sigma$) liegt noch unter jenem Wert, ab dem der Teilsicherheitsbeiwert angehoben werden müsste. Mit der Feststellung von Brüchen über (rechts von) $N=2$ Mio. wird bestätigt, dass es früher nicht ganz richtig war, Dauerschwingversuche bei $N=2$ Mio. abzubringen und dort eine "Dauerschwingfestigkeit" anzunehmen. Es können aber hier keine genaueren Angaben zur Lage eines Knickpunktes gemacht werden. Mit der in **Bild 7** vorgenommenen Regression über die oberen 3 $\Delta\sigma$ könnte er rechts von $N=3$ Mio. liegen. Würde man nur die beiden oberen $\Delta\sigma$ zur Regression heranziehen und den 3. $\Delta\sigma$ -Horizont zum k_2 -Bereich hinzurechnen, läge er knapp rechts von $N=1$ Mio. und die Steigung k_1 wäre deutlich steiler, vgl. angedeuteten Verlauf im Diagramm. Um zu einer realistischeren Aussage kommen zu können, müssten also noch mehr Prüfungen im Bereich des möglichen Knicks vorliegen, die zu Brüchen vor N_{Ziel} geführt hätten.

Die Versuche mit Korrosion ergaben bei $D_n=16$ mm eine überraschend enge Streuung und einen gegenüber der Referenz sehr viel steileren Verlauf. In Calciumhydroxid-Lösung (Medium I) ergab sich bei der höchsten Schwingweite ($\Delta\sigma=250$ MPa), d.h. nach nur kurzer Korrosionsdauer nahezu dasselbe Ergebnis wie bei den Referenzuntersuchungen. Ein Knick ist in allen Fällen nicht hineininterpretierbar. Er dürfte bei Schwingweiten liegen, die weit kleiner als 145 MPa sind, möglicherweise sogar unterhalb von jenem Wert, bis zu dem "vorwiegend ruhend" angenommen werden darf, vgl. eingangs gezeigten Schadensfall aus der Praxis. Der steilere Verlauf deutet an, dass die Annahme in DIN EN 1992-1 möglicherweise noch zu positiv ist.

Bei $D_n=40$ mm war die Streuung etwas größer und die Steigung flacher, aber immer noch steiler als nach dem für Korrosion ungünstigsten k_2 der DIN EN 1992-1.

Die ersten Brüche nach nur ca. 2 Tagen Korrosionsdauer könnten vielleicht auch als von Korrosion beeinflusstes Ergebnis gewertet werden. Weiter reichende Interpretationen sind daher nicht möglich, weil hier leider keine Referenz-Untersuchungen durchgeführt werden konnten.

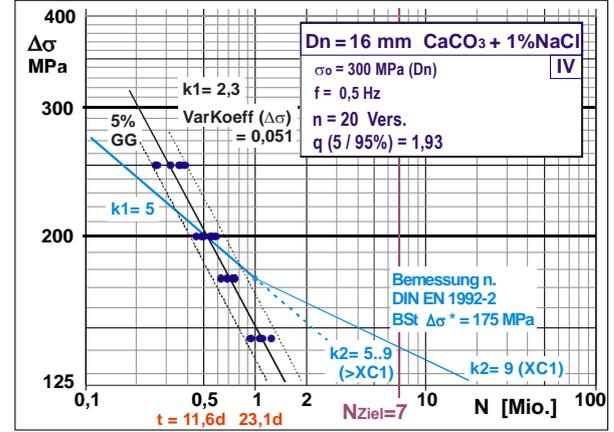
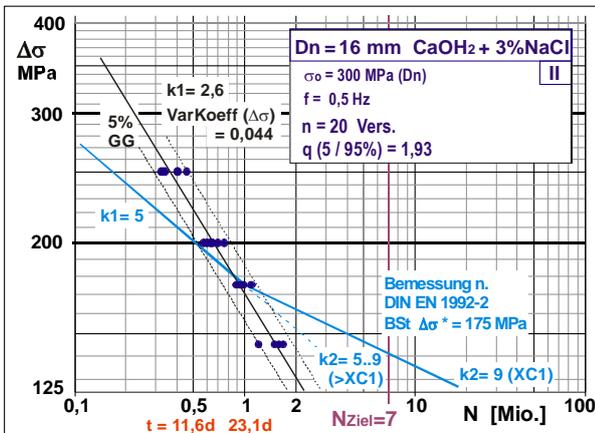
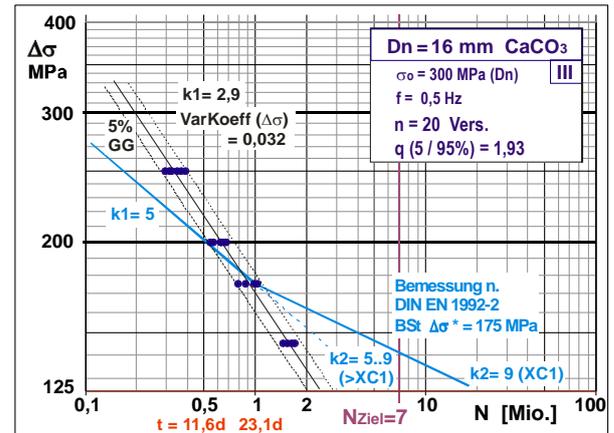
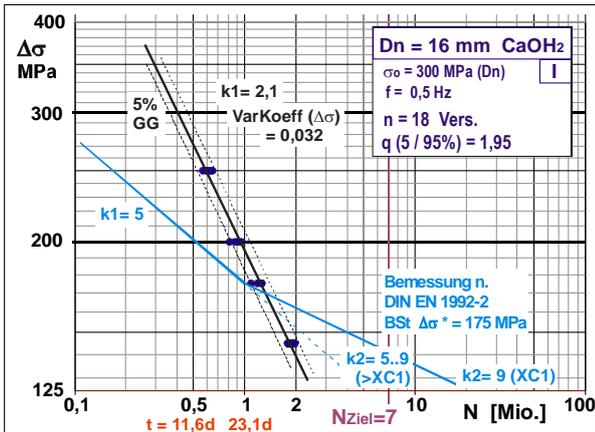


Links:

Bild 7: 16 mm, Medium 0 = Luft, Labor = Referenz

Bild 8: 16 mm, Medium I = ges. CaOH₂-Lösung

Bild 9: 16 mm, Medium II = wie Bild 8 + 3% NaCl

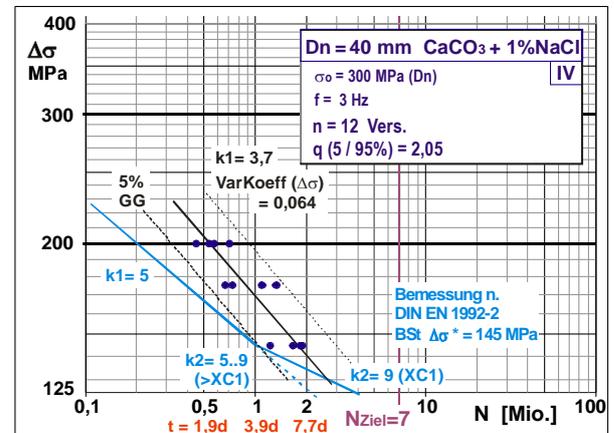


Rechts:

Bild 10: 16 mm, Medium III = ges. CaCO₃-Lösung

Bild 11: 16 mm, Medium IV = w. Bild 10 + 3% NaCl

Bild 12: 40 mm, Medium IV = wie Bild 11



4.4.3 Früherkennung von Anrissen

Zur Frage, ob der Beginn der Rissbildung, die dann zum Bruch führt, schon eher erkennbar ist, wurden zunächst orientierende Untersuchungen mit drei unterschiedlichen Verfahren an 1 mm tief vorgekerbten Proben (BSt mit $D_n=12$ mm) bei einer Schwingweite von 200 MPa durchgeführt (Umgebung Luft; Prüffrequenz 10 Hz):

- (A) Dehnungsmessungen mit Hysterese-Bewertung
- (B) Erfassung von Körperschall-Emissionen
- (C) Potentialsonden-Verfahren.

Bei (A) wurde während der Dauerschwingbeanspruchung die Dehnung des Stahls im Kerbbereich mit einem Wegaufnehmer von 100 mm Länge mit erfasst.

Es zeigte sich, dass erst kurz vor dem Bruch (bei $N_A=0,131$ bis $0,137$ Mio. von $N_{Bruch}=0,150$ Mio.) eine Dehnungszunahme auftrat, während sich die Hysterese kaum signifikant änderte.

Bei (B) wurde die Probe beidseits der Kerbe mit je zwei Körperschall-Sensoren bestückt. Während der Dauerschwingbeanspruchung wurden so alle Schalleignisse aufgezeichnet, wobei Störgeräusche, z.B. von der Einspannung und der Prüfmaschine oder elektrische Störungen durch fehlende Laufzeitunterschiede an den beiden äußeren Sensorsignalen meist erkannt werden konnten.

Bei einem typischen Beispiel ($N_{Bruch}=0,158$ Mio.) wurden mögliche Vorankündigungen (Anrisse) nur bei rd. $N_A=0,128$ Mio. festgestellt. Es konnte also nicht wie erhofft das sukzessive Risswachstum dargestellt werden. Darüber hinaus verhinderten die Störsignale doch oft eine richtige Zuordnung.

Für (C) wurden die Proben ähnlich wie bei (B) mit 4 elektrischen Kontaktierungen an der BSt-Oberfläche versehen, über die beiden äußeren Kontakte ein konstanter Gleichstrom (z.B. $I=5$ A) eingepreßt und u.a. an den beiden inneren Kontakten der Spannungsabfall ΔP (nur wenige μV oder noch darunter) gemessen.

Hier zeigte sich ($N_{Bruch}=0,197$ Mio.) ab ca. $N_A=0,157$ Mio. eine kontinuierliche Zunahme des elektrischen Widerstands.

In **Tabelle 4**, links sind die Ergebnisse der Früherkennung in % von der Bruchzyklenzahl zusammengestellt.

Weil (C) die besten Ergebnisse lieferte, wurde dieses Verfahren für die zuvor beschriebenen Hauptversuche angewandt. Die je Umgebungsbedingung und Schwingweite erhaltenen Vorankündigungen sowie die Mittel und Variationskoeffizienten sind in **Tabelle 4**, rechts aufgeführt, wonach sich die Vorversuchsergebnisse in allen Fällen bestätigt haben.

Man kann aus den Ergebnissen ableiten, dass die Geschwindigkeit des Risswachstums kaum von der Korrosionsart beeinflusst wird. Die Korrosion bestimmt also praktisch nur die Risseinleitungsphase.

Weitere Details sind [19] zu entnehmen.

Tabelle 4: Verhältnis der Zyklenzahl bei erster Früherkennung zur Bruchlast-Zyklenzahl mit unterschiedlichen Messverfahren.

Links: Vorversuche an $D_n=12$ mm; rechts: Hauptversuche an $D_n=16$ und 40 mm.

Dn mm				Dn mm					
12				16		40			
Verfahren	A	B	C	C					
	Hyster.	Schall	Pot.	Potentialverfahren					
$\Delta\sigma$ MPa	Medium			Medium					
	Luft			I	II	III	IV	IV	
	N Anriss / N Bruch			N Anriss / N Bruch					
250				0,93	0,90	0,89	0,80	-	
200	0,92	0,81	0,8	0,93	0,90	0,90	0,81	0,88	
175				0,94	0,91	0,91	0,87	0,79	
145				0,95	0,90	0,91	0,88	0,79	
				Mittel	0,94	0,9	0,9	0,84	0,82
				Var %	1,19	0,66	0,86	4,64	6,08

5 Einstweilige Folgerungen

Aufgrund der festgestellten Wöhler-Linien unter Korrosionseinfluss und der Feststellung, dass sich die Korrosion kaum auf die Risswachstumsphase sondern hauptsächlich nur auf die Risseinleitung auswirkt, ergibt sich, dass der Einfluss von Korrosion auf das Dauerschwingverhalten praktisch nur als Zeiteinfluss zu sehen ist. D.h. bei sehr niedrigen Frequenzen ergibt sich eine andere Wöhlerlinie als bei höheren.

Daraus ergibt sich, dass der in DIN EN 1992 vorgesehene Einfluss von Korrosion "nur im k2-Bereich" neu überdacht werden muss. Es sollten jedoch noch die Ergebnisse aus dem parallelen DFG-Forschungsvorhaben an der TU München abgewartet werden.

Quellen

- [1] Fleischer, H., Lutz, M., Deutscher, M., Ehmann, R.: Materialermüdung an einer Schiffschleuse aus Stahlbeton. Bautechnik 83 (2006), Heft 6
- [2] Espert, M.: Schleuse Bamberg, Instandsetzung der östlichen Kammerwand. Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes.; http://pianc.vzb.baw.de/veranstaltungen/kolloquium_2009/.../2009-11-19_Espert.pdf
- [3] DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Ausgabe 2011-01 + DIN EN 1992-1-1/ NA Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter
- [4] DIN 488-3:1972: Betonstahl – Betonstabstahl – Prüfungen

- [5] Richtlinien für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen an Spannstählen, Deutsches Institut für Bau-technik (DIBt), Entwurf 1965
- [6] DIN 488-1:2009-08: Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung
- [7] Grundsätze für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen von mechanischen Betonstahlverbindungen – Fassung Mai 2007. DIBt-Mitteilungen, 4/2007
- [8] Richtlinien für Zulassungs- und Überwachungsprüfungen an Spannstählen, Deutsches Institut für Bau-technik (DIBt), 2011
- [9] Maurer, R., Block, K., Dreier, F.: Ermüdungsfestigkeit von Betonstahl mit dem Interaktiven Verfahren. Bauingenieur, Bd. 85, Januar 2010
- [10] DIN 1045-1:2001: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Ausgabe Juli 2001
- [11] DIN 1045-1:2008: (Nachfolgeausgabe zu [10])
- [12] Volkwein, A.: Auswertung von Dauerschwingversuchen an Betonstählen zur Ableitung von Werkstoffkenngrößen für DIN 488. Forschungsbericht Nr.: F 38001/ 04 im Auftrag Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; cbm der TU München, 2005
- [13] Maurer, R. e.a., Zilch, K., Dunkelberg, D. e.a.: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 89, September 2012
- [14] König, G. und Danielewicz, I.: Ermüdungsfestigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit Erläuterungen zu den Nachweisen gemäß CEB-FIP Model Code 1990, Heft 439, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 1994
- [15] Rehm, G., Harre, W. und Beul, W.: Schwingfestigkeitsverhalten von Betonstählen unter wirklichkeitsnahen Beanspruchungs- und Umgebungsbedingungen, Heft 374, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 1986
- [16] Zheng, H., Abel, A. A.: Residual stress effects on the fatigue properties of Tempcore reinforcing steel. MAT-TEC 1997, i.i.t.t.-International, Gournay sur Marne
- [17] Atienza, J.M., Riiz-Hervias, J., Martinez-Perez, M.L.: Residual stresses in cold drawn perlitic rods. Scripta Materialia 52 (2005)
- [18] Weirich, T.: Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbeanspruchung. IWB Jahresbericht 2008/10 Activities; Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart
- [19] Gehlen, C., Weirich, T.: Ermüdungsverhalten von Betonstahl unter Korrosionsbedingungen. Mat.-wiss. U. Werkstofftechn., 42, No.9; Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2011
- [20] Weirich, T.: Dissertation Universität Stuttgart, in Bearbeitung