



# **Modellbildung für das frequenzabhängige Ermüdungsverhalten von Beton basierend auf nichtlinearen Ultraschallmethoden**

Model development for the frequency-dependent  
fatigue behavior of concrete based on nonlinear  
ultrasonic methods

**Raúl Enrique Beltrán Gutiérrez**

Geboren am: 9. September 1981 in Cochabamba

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

## **Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)**

Erstgutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

Zweitgutachter

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Katharina Kleinschrot

apl. Prof. Dr. habil. Rostislav Chudoba

Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Ernst Niederleithinger

apl. Prof. Dr.-Ing. Birgit Beckmann

Eingereicht am: 9. Januar 2026

Verteidigt am: 16. März 2026



## Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation untersucht das nichtlinear-elastische Ermüdungsverhalten von Beton unter zyklischer Belastung und verknüpft experimentelle, messtechnische und modelltheoretische Ansätze zu einer ganzheitlichen Beschreibung der zugrunde liegenden Mechanismen. Im Zentrum steht die Frage, wie Belastungsfrequenz, Temperatur und dissipative Prozesse das Ermüdungsverhalten und die Entwicklung nichtlinearer Materialparameter beeinflussen und wie sich diese Effekte für die Modellierung und Prognose der Lebensdauer nutzen lassen.

Hierfür wurden umfangreiche quasistatische und dynamische Versuchsreihen durchgeführt, die eine simultane Erfassung der Materialantwort aus makroskopischer niederfrequenter und mikroskaliger hochfrequenter Perspektive ermöglichten. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ermüdungsprozess wesentlich durch eine thermomechanische Kopplung bestimmt wird: Erhöhte Belastungsfrequenzen führen zu einer verstärkten nichtlinearen und teilweise reversiblen Dissipation, begleitet von einer vergleichsweise geringen makroskopischen Dissipationsenergie, steigenden Proben Temperaturen und schließlich zu einer Erhöhung der Referenzdruckfestigkeit. Die erhöhten Temperaturen wiederum verändern die Materialeigenschaften und beeinflussen die Schädigungsentwicklung.

Zugleich lässt sich aus den Versuchsdaten erkennen, dass makroskopische und mikroskopische Dissipationsmaße unterschiedliche physikalische Prozesse erfassen: Während die makroskopische Dissipation primär irreversible, viskoelastische Energieverluste beschreibt, erfasst die mikroskalige Dissipation reversible Steifigkeitsmodulationen und Reibungsmechanismen.

Eine robuste Korrelation zwischen der Dehnungsrate in Phase II und der Lebensdauer ( $R^2 \geq 0,9$ ) konnte als universeller Indikator für die Ermüdungslebensdauer identifiziert werden. Diese Erkenntnis bildet gemeinsam mit den thermischen und nichtlinearen Parametern die Grundlage für ein neu entwickeltes stochastisches Degradationsmodell, das Versagenswahrscheinlichkeiten und Bruchlastwechselzahlen in Abhängigkeit von Spannungsniveau und Belastungsfrequenz beschreibt.

Die Ergebnisse haben unmittelbare Relevanz für die Bewertung von Betontragwerken und die Ausgestaltung zukünftiger Normen. Insbesondere wird gezeigt, dass beschleunigte Laborversuche bei hohen Frequenzen ohne thermische Korrektur zu nichtkonservativen Lebensdauerprognosen führen können. Zudem eröffnet die Kombination aus kraft geregelter dynamischer akustoelastischer Prüfung (DAET) und makroskaligen Messgrößen wie Spannung und Dehnung neue Perspektiven für die zerstörungsfreie Schädigungsdiagnostik im Strukturmonitoring.

Diese Dissertation erweitert das Verständnis der Betonermüdung, indem sie zeigt, dass die Ermüdungslebensdauer maßgeblich von dynamischen Prozessen abhängt, die sich durch die Konditionierung des Materials erfassen lassen. Daraus ergeben sich Grundlagen für weiterführende Modelle, Prüfverfahren und normative Ansätze.



## Abstract

This dissertation investigates the nonlinear elastic fatigue behavior of concrete under cyclic loading and combines experimental, measurement-based, and modeling approaches into a comprehensive description of the underlying mechanisms. The focus lies on understanding how loading frequency, temperature, and dissipative processes influence fatigue behavior and the evolution of nonlinear material parameters, and how these effects can be utilized for modeling and lifetime prediction.

To this end, extensive quasi-static and dynamic experimental campaigns were conducted, enabling the simultaneous characterization of the material response from a macroscopic low-frequency and a microscale high-frequency perspective. The results show that the fatigue process is predominantly governed by thermomechanical coupling: Increased loading frequencies lead to enhanced nonlinear and partially reversible dissipation, accompanied by comparatively low macroscopic dissipated energy, rising specimen temperatures, and ultimately an increase in reference compressive strength. These elevated temperatures, in turn, alter the material properties and influence damage evolution.

Furthermore, the experimental data reveal that macroscopic and microscopic dissipation measures capture different physical mechanisms: While macroscopic dissipation primarily reflects irreversible viscoelastic energy losses, microscopic dissipation captures reversible stiffness modulations and microscale frictional mechanisms.

A robust correlation between the strain rate in phase II and the fatigue life ( $R^2 \geq 0.9$ ) was identified as a universal indicator of the remaining fatigue life. Together with the thermal and nonlinear parameters, this finding forms the basis for a newly developed stochastic degradation model, which describes failure probabilities and fatigue lives as a function of stress level and loading frequency.

The results are of direct relevance for the assessment of concrete structures and the development of future design codes. In particular, it is shown that accelerated laboratory tests at high frequencies may lead to non-conservative lifetime predictions if thermal effects are not accounted for. Moreover, the combination of force-controlled dynamic acoustoelastic testing (DAET) and macroscopic quantities such as stress and strain opens new perspectives for non-destructive damage diagnostics in structural health monitoring.

This dissertation expands the understanding of concrete fatigue by demonstrating that fatigue life is significantly governed by dynamic processes that can be captured through the conditioning of the material. This provides a foundation for advanced models, testing methods, and normative approaches.