

**Kurzfassung und Thesen
in deutscher und englischer Sprache**

A Durability Concept for
Strain-Hardening Cement-Based Composites

Ein Dauerhaftigkeitskonzept
für hochduktilen Beton

An der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Frank Altmann
aus Heilbronn am Neckar

Abstract

Premature deterioration of concrete structures is often caused by the early onset of steel reinforcement corrosion due to the ingress of chlorides into cracks of sometimes considerable width. Durability may be improved by utilising new high-performance materials such as strain-hardening cement-based composites (SHCC). These are characterised by their high ductility due to the progressive formation of multiple cracks of self-limiting width.

In this treatise a fuzzy probabilistic durability concept for steel-reinforced SHCC (R/SHCC) exposed to chlorides is presented. It allows a rigorous durability assessment and hence the full utilisation of the durability properties of SHCC towards attaining the desired service life with the required reliability. The durability concept is comprised of a chloride ingress model and a model to quantify the uncertainty associated with the ingress model and its input variables. Further to that steel depassivation is defined as limit state.

The empirical *erfc*-model for chloride ingress used in the DuraCrete framework provides a good balance between accuracy and usability. For the presented durability concept it was modified to model ageing mathematically correctly, reflect the influence of the age at first chloride exposure, and to account for the contribution of cracks to chloride ingress. In contrast to other performance-based concepts, an extensive database is neither required nor available to quantify the input variables of the deterioration model. The fuzzy probabilistic uncertainty model allows their transparent quantification based on a combination of hard data and subjective expert assessment, clearly differentiating between random uncertainty due to the nondeterministic nature of the variables and imprecision due to a lack of information.

To assess R/SHCC durability with this design concept, the software WinFuz and a fuzzy stochastic sampling algorithm consisting of nested loops for time as well as fuzzy, stochastic, and deterministic analyses are used. The software allows the computation of fuzzy uncertain time-dependent probabilities of failure. Further to that, the influence of individual variables on chloride ingress may be assessed using empirical coefficients of correlation.

The potential of the design concept was demonstrated in an example. It could be shown that fuzzy parameter quantification is practicable and transparent, and that the concept allows the computation of the desired output variables. However, at present the results show significant imprecision precluding the concept from being used as a practical design tool. Nonetheless, the sensitivity analysis allows the identification of critical parameters and knowledge gaps. This facilitates targeted research efforts to reduce uncertainty efficiently.

The presented durability concept may be used as a blueprint for the development of durability concepts for other limit states, load cases, and load case combinations.

Theses

- Premature deterioration of concrete structures is often caused by the early onset of steel reinforcement corrosion due to the ingress of chlorides into cracks of sometimes considerable width.
- Strain-hardening cement-based composites (SHCC) are characterised by their high ductility due to the progressive formation of multiple cracks of self-limiting width. They thus address the cause for the formation of wide cracks and subsequent premature steel corrosion at the material level.
- Structural members made from SHCC are likely to contain steel reinforcement, and it can be expected that chloride-induced rebar corrosion will remain of similar significance as is the case for ordinary concrete.
- To fully utilise the durability properties of SHCC towards attaining the desired service life with the required reliability a performance-based durability concept is required.
- The DuraCrete framework¹ and Gehlen's² performance-based durability design concept for crack-free ordinary concrete provide a rational basis for the development of a similar concept for SHCC. While the limit state defined as steel depassivation may be retained, some changes to the deterioration and uncertainty models are required.
- Gehlen's model for chloride ingress must be amended to account for the contribution of cracks to chloride ingress. Furthermore, a mathematically correct equation for the influence of ageing on diffusivity should be used. This equation also considers the influence of the age at first exposure on chloride ingress.
- The limited database available for the quantification of input variables results in significant imprecision. Hence, a fuzzy probabilistic uncertainty model must be used, which allows their transparent quantification based on a combination of hard data and subjective expert assessment. In this the model clearly differentiates between random uncertainty due to the nondeterministic nature of the variables and imprecision due to a lack of information.

¹ DURACRETE: *Probabilistic performance based durability design of concrete structures*. The European Union - Brite Euram III, Project BE95-1347, Report R15, 2000

² GEHLEN, C.: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 510, Beuth Verlag, Berlin, 2000

- The performance-based durability concept developed in this thesis allows a practicable and transparent input variable quantification and the computation of the time-dependent uncertain chloride profile and failure probability. However, at present the results show significant imprecision precluding the concept from being used as a practical design tool. Critical input variables and knowledge gaps can be identified with a sensitivity analyses. This facilitates targeted research efforts to reduce uncertainty efficiently and develop the concept into a practical design tool.
- The durability concept is expected to serve as a template for other limit states, load cases, and load case combinations, as well as for other new materials such as textile reinforced concrete. It may further provide the basis for durability concepts for ordinary concrete with compositions not covered by existing concepts.

Kurzfassung

Die oftmals unbefriedigende Lebensdauer von Tragwerken aus Stahlbeton ist zu einem signifikanten Teil auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion zurückzuführen. Hierbei wird der Chlorideintrag häufig durch die Bildung von Rissen mit teilweise beträchtlicher Breite begünstigt. Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung (strain-hardening cement-based composites, SHCC) ist ein neuartiger zementgebundener Hochleistungswerkstoff, mit materialbedingt beschränkter Rissbreite auch bei großen Dehnungen. In Kombination mit ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften verspricht dies auch unter hohen mechanischen Belastungen in aggressivem Umgebungsmilieu lange Lebensdauern.

Zur zielsicheren Nutzung der Dauerhaftigkeit hochduktilen Betons ist ein leistungsbezogenes Dauerhaftigkeitskonzept erforderlich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein solches Konzept für stahlbewehrten SHCC (R/SHCC) unter Chloridbeanspruchung entwickelt. Neben der Festlegung der Stahldepassivierung als Grenzzustand besteht das Dauerhaftigkeitskonzept aus einem Modell für den Chlorideintrag, sowie einem erweiterten Unschärfemodell zur Quantifizierung der Eingangsvariablen.

Das empirische DuraCrete-Modell für Chlorideintrag zeichnet sich durch seine gute Balance zwischen Genauigkeit und Anwenderfreundlichkeit aus. Dieses wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit so modifiziert, dass die alterungsbedingte Abnahme des Diffusionskoeffizienten mathematisch korrekt modelliert wird. Somit ist es möglich, die Auswirkung des Betonalters bei erstmaligem Chloridkontakt zu berücksichtigen. Des Weiteren wurde ein verschmierter Chloriddiffusionskoeffizient eingeführt, der es erlaubt, den Rissbeitrag zum Chlorideintrag zu berücksichtigen. Im Gegensatz zu anderen leistungsbezogenen Dauerhaftigkeitskonzepten ist eine breite Datenbasis zur Quantifizierung der Eingangsvariablen weder erforderlich noch verfügbar. Das fuzzy-stochastische Unschärfemodell erlaubt deren transparente Quantifizierung basierend auf einer Kombination aus verfügbaren experimentellen Daten und subjektiven Experteneinschätzungen.

Die numerische Umsetzung des Dauerhaftigkeitskonzeptes erfolgte mit Hilfe der Software WinFuz und einem fuzzy-stochastischen Sampling Algorithmus bestehend aus vier Schleifen für die Zeit, eine fuzzy-, eine stochastische und eine deterministische Analyse. Neben der Bestimmung der zeitabhängigen Versagenswahrscheinlichkeit erlaubt die Software die Abschätzung des Einflusses individueller Eingangsvariablen auf den Chlorideintrag mit Hilfe des empirischen Korrelationskoeffizienten.

Anhand eines Beispiels wurde gezeigt, dass das Konzept eine praktikable und transparente Parameterquantifizierung und die Bestimmung der gewünschten Ergebnisgrößen erlaubt. Die Ergebnisse weisen jedoch aufgrund der unzureichenden Datenbasis noch eine erhebliche

nichtstochastische Unschärfe auf, weshalb die praktische Anwendung des Konzeptes zur Dauerhaftigkeitsbemessung zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht sinnvoll ist.

Nichtsdestotrotz erlaubt die Sensitivitätsanalyse die Identifikation kritischer Parameter somit deren gezielte Zuschärfung. Dies ermöglicht die zügige und zielorientierte Weiterentwicklung des vorliegenden Konzeptes zu einem praxistauglichen Bemessungsansatz. Darüber hinaus lässt sich das Konzept auf andere Grenzzustände, Schädigungsmechanismen und Kombinationen verschiedener Schädigungsmechanismen übertragen.

Thesen

- Die oftmals unbefriedigende Lebensdauer von Tragwerken aus Stahlbeton ist zu einem signifikanten Teil auf chloridinduzierte Bewehrungskorrosion zurückzuführen. Hierbei wird der Chlorideintrag häufig durch die Bildung von Rissen mit teilweise beträchtlicher Breite begünstigt.
- Hochduktiler Beton mit Kurzfaserbewehrung (strain-hardening cement-based composites, SHCC) weist materialbedingt auch bei großen Dehnungen eine beschränkte Rissbreite auf. Dies verspricht in aggressivem Umgebungsmilieu eine gegenüber Normalbeton deutlich verbesserte Dauerhaftigkeit von SHCC-Bauteilen.
- Es ist davon auszugehen, dass tragende Bauteile aus SHCC Stabstahlbewehrung enthalten werden. Dies bedeutet, dass chloridinduzierte Bewehrungskorrosion eine vergleichbare Bedeutung für die Dauerhaftigkeit dieser Bauteile hat wie bei gewöhnlichem Stahlbeton.
- Zur zielsicheren Nutzung der vielversprechenden Dauerhaftigkeitseigenschaften hochduktilen Betons ist ein leistungsbezogenes Dauerhaftigkeitskonzept erforderlich.
- Die im Rahmen des DuraCrete¹-Projektes sowie von Gehlen² entwickelten leistungsbezogenen Dauerhaftigkeitskonzepte bilden einen geeigneten Ausgangspunkt zur Ableitung eines vergleichbaren Konzeptes für hochduktilen Beton. Während der Grenzzustand der Bewehrungsdepassivierung übernommen

¹ DURACRETE: *Probabilistic performance based durability design of concrete structures*. The European Union - Brite Euram III, Project BE95-1347, Report R15, 2000

² GEHLEN, C.: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton Heft 510, Beuth Verlag, Berlin, 2000

werden kann, muss die Modellierung des Schädigungsprozesses und der damit verbundenen Unsicherheit angepasst werden.

- Das Modell für Chlorideintrag nach Gehlen ist so zu erweitern, dass der Beitrag der Risse zum Chloridtransport transparent berücksichtigt wird. Darüber hinaus sollte eine mathematisch korrekte Formulierung für die alterungsbedingte Änderung des Diffusionskoeffizienten gewählt werden. Diese erlaubt die Berücksichtigung des Werkstoffalters bei Erstbeaufschlagung durch Chloride.
- Da hochduktiler Beton ein neuer Werkstoff ist, liegen keine ausreichenden Daten für die stochastische Quantifizierung der Eingangsvariablen des Modells für Chlorideintrag vor. Mit Hilfe einer fuzzy-zufälligen Unschärfemodellierung ist es jedoch möglich, diese basierend auf einer Kombination experimentell gewonnener Daten und subjektiver Experteneinschätzungen und Erfahrungen transparent zu quantifizieren. Das Unschärfemodell erlaubt hierbei die klare Trennung von stochastischer Unschärfe infolge des nichtdeterministischen Charakters der Variablen und nichtstochastischer Unschärfe aufgrund fehlender Informationen.
- Das vorliegende Dauerhaftigkeitskonzept erlaubt eine praktikable und transparente Quantifizierung der unscharfen Eingangsvariablen und die Ermittlung der zeitlichen Entwicklung des unscharfen Chloridprofils sowie der Chloridkonzentration auf Höhe der Bewehrung und der sich daraus ergebenden Versagenswahrscheinlichkeit. Die ausgeprägte nichtstochastische Unschärfe der Versagenswahrscheinlichkeit verhindert jedoch zum jetzigen Zeitpunkt die Anwendung des vorliegenden Konzeptes zur praktischen Dauerhaftigkeitsbemessung. Nichtsdestotrotz können die relative Bedeutung der Eingangsvariablen sowie Informationsdefizite mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse bestimmt werden, was die gezielte Zuschärfung der entsprechenden Variablen erlaubt. Dies ermöglicht die zügige und zielorientierte Weiterentwicklung des vorliegenden Konzeptes zu einem praxistauglichen Bemessungsansatz.
- Das vorgestellte Dauerhaftigkeitskonzept lässt sich auf weitere Grenzzustände, Schädigungsmechanismen, Kombinationen von Schädigungsmechanismen, sowie auf andere neuartige Werkstoffe wie beispielsweise Textilbeton übertragen. Es kann darüber hinaus als Grundlage für die Entwicklung von Dauerhaftigkeitskonzepten für Normalbetone dienen, die aufgrund ihrer Zusammensetzung von existierenden Dauerhaftigkeitskonzepten für Normalbeton nicht erfasst werden.