

**Überprüfung des Nennmaßes der Beton-
deckung im Falle von carbonatisierungs-
induzierter Korrosion mit Hilfe einer
Dauerhaftigkeitsbemessung**

T 2968

T 2968

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2001, ISBN 3-8167-5991-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

e-mail info@irb.fhg.de

URL <http://www.IRBbuch.de>

**Institut für
Baustoffe und
Konstruktion**

MPA Bau

Lehrstuhl für Massivbau
Univ.-Prof.
Dr.-Ing. K. Zilch

Arbeitsgruppe:

Betonkennwerte

Bericht
Überprüfung des Nennmaßes der Betondeckung im Falle von
carbonatisierungsinduzierter Korrosion mit Hilfe einer
Dauerhaftigkeitsbemessung

Bericht Nr.: sl-2 301 211

vom: 13.09.2001

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10820 Berlin

Der Untersuchungsbericht umfasst 16 Textseiten

Der Bericht darf nur ungekürzt veröffentlicht werden.
Die gekürzte oder auszugsweise Veröffentlichung bedarf der vorherigen Genehmigung des Lehrstuhls

Inhalt

KURZFASSUNG, ABSTRACT, RESUME	3
1. EINLEITUNG.....	4
2. BESCHREIBUNG DES SCHÄDIGUNGSMODELLS UND DER PROBABILISTISCHEN DAUERHAFTIGKEITSBEMESSUNG.....	5
2.1. DAS SCHÄDIGUNGSMODELL FÜR CARBONATISIERUNGSINDUZIERTE KORROSION.....	5
2.2. PROBABILISTISCHE DAUERHAFTIGKEITSBEMESSUNG	6
2.2.1. <i>Sicherheitskonzept</i>	6
2.2.2. <i>Anforderungen an das Zuverlässigkeitsniveau</i>	7
3. PARAMETERSTUDIE.....	8
3.1. UMGEBUNGSKLASSE XC2	9
3.2. UMGEBUNGSKLASSE XC3	10
3.3. UMGEBUNGSKLASSE XC4	11
4. ERHÖHUNG DER BETONDECKUNG FÜR EINE LEBENSDAUER VON 100 JAHREN	13
5. ZUSAMMENFASSUNG	14
6. LITERATUR	16

Überprüfung der Betondeckung bei carbonatisierungsinduzierter Korrosion mit Hilfe einer Dauerhaftigkeitsbemessung

Konrad Zilch, Angelika Schießl

Kurzfassung: *Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird eine Dauerhaftigkeitsbemessung für carbonatisierungsinduzierte Korrosion durchgeführt. Unter Berücksichtigung des w/z Wertes, der Zementart und des Klimas wird der Sicherheitsindex für eine Lebensdauer von 50 Jahren in Abhängigkeit der Betondeckung bestimmt. Die Ergebnisse werden mit den in verschiedenen Normen (DIN 1045-1, prEN 1992-1) vorgeschriebenen Betondeckungen verglichen. Außerdem wird die Betondeckung für eine Lebensdauer von 100 Jahren bestimmt und eine Empfehlung für eine entsprechende Normenformulierung gegeben.*

Abstract: *In this study a probability based durability design for carbonation induced corrosion is performed. The reliability index for different concrete covers is determined as a function of w/c value, type of cement and climate for a life time of 50 years. The results are compared with the values required in different design codes (DIN 1045-1, prEN 1992-1). In addition the concrete cover is determined for a life time of 100 years and a respective recommendation for a practical standard formulation is given.*

Résumé:

Dans le cadre de ce projet de recherche on examine le dimensionnement pour une bonne durabilité en fonction de la corrosion de carbonatation. Pour une durée de vie de 50 ans, l'index de sécurité pour différents enrobages est déterminé en fonction du rapport eau/ciment, du type de ciment et du climat. Les résultats des calculs sont comparés avec des valeurs données dans les normes de dimensionnement (DIN 1045-1, prEN 1992-1). Finalement l'enrobage est déterminé pour une durée de vie de 100 ans et une formulation pour un code de dimensionnement est donnée.

1. Einleitung

In einem europäischen Forschungsprojekt wurde ein umfassendes Konzept für eine probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken entwickelt z.B. [1], [2], [3]. Das Ziel war, ein vom Prinzip her ähnliches Bemessungskonzept wie in der Tragwerksplanung auszuarbeiten, in dem der Widerstand eines Bauwerkes mit den Einwirkungen verglichen wird. Auf die Problematik der Bewehrungskorrosion übertragen, wird der Widerstand eines Bauwerkes aus Stahlbeton im wesentlichen durch das Maß und die Qualität der Betondeckung bestimmt. Im Moment sind die in den Normen angegebenen Regeln für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit Konstruktionsregeln, die hauptsächlich aus Erfahrungswerten entstanden sind, jedoch keinen wissenschaftlichen Hintergrund haben.

Nach der europäischen Bemessungsnorm für Stahlbetonbauwerke prEN 1992-1 (Juli 1999) setzt sich die nominale Betondeckung aus einer Mindestbetondeckung (abhängig von der Umweltklasse) und einem Vorhaltemaß (für X0 u. XC1 10 mm, für alle anderen Umgebungs-klassen 15 mm) zusammen. In der ersten Fassung des prEN 1992-1 (Juli 1999) entsprachen die Werte für die Mindestbetondeckung und für das Vorhaltemaß den Werten, die in der letzten Fassung der DIN 1045-1 (09/2000) zu finden sind.

Jedoch wurde auf europäischer Ebene beschlossen, dass zukünftig in prEN 1992-1 auf Werte oder Regeln, die in anderen Normen festgelegt sind, nur mehr verwiesen wird. Das Vorhaltemaß wird in der Ausführungsnorm prEN 13670 für Bauteile aus Stahlbeton zu 10 mm bestimmt, also 5 mm weniger als der ursprüngliche Wert. Wenn dieser Wert künftig auch für prEN 1992-1 gilt, entspricht dies einer Verminderung des Nennmaßes der Betondeckung von 5 mm.¹

Aus deutscher Sicht soll nun mit Hilfe einer Dauerhaftigkeitsbemessung untersucht werden, ob diese Verminderung der Betondeckung Auswirkungen auf die Sicherheit gegen carbonatisierungsinduzierte Stahlkorrosion hat. Dazu wurde für verschiedene Betonzusammensetzungen und verschiedene Betondeckungen der Zuverlässigkeitsindex β bestimmt und bewertet. Die Betonzusammensetzungen wurden nach den Anforderungen der prEN 206² gewählt – der Mindestzementgehalt und der w/z Wert wurden nach der Umgebungs-klasse bestimmt.

¹ Für alle Umgebungs-klassen außer XC0 und XC1.

² Inzwischen EN 206 ohne wesentliche Änderung im Hinblick auf die hier untersuchte Fragestellung.

Des weiteren wurde untersucht, um wie viel man die Betondeckung für 50 Jahre vergrößern muss, um eine ausreichende Dauerhaftigkeit für 100 Jahre zu gewährleisten.

2. Beschreibung des Schädigungsmodells und der probabilistischen Dauerhaftigkeitsbemessung

Dieses Kapitel stellt lediglich eine kurze Übersicht dar, da das Schädigungsmodell für die carbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion und das Sicherheitskonzept für die Dauerhaftigkeitsbemessung in der Literatur bereits ausführlich beschrieben wurden.

2.1. Das Schädigungsmodell für carbonatisierungsinduzierte Korrosion

Der carbonatisierungsinduzierte Korrosionsprozess kann in zwei Zeitperioden eingeteilt werden: Die *Einleitungsphase* beschreibt den Zeitraum, bis die Bewehrung durch Carbonatisierung depassiviert wird.

Wenn genügend Sauerstoff und Feuchtigkeit zur Verfügung stehen, beginnt nach der Depassivierung des Bewehrungsstahls die Korrosion. Als Folge von Bewehrungskorrosion kann es zu einer Verringerung des Stahlquerschnitts, Rissbildung oder Abplatzen des Betons kommen. Dieses Zeitintervall wird mit *Zerstörungsphase* bezeichnet.

Nach dem heutigen Stand des Wissens ist es für carbonatisierungsinduzierte Korrosion möglich [3], den zeitlichen Verlauf des Schädigungsprozesses in der Einleitungsphase stochastisch zu beschreiben. Die Prozesse, die sich in der Zerstörungsphase abspielen, sind sehr viel komplexer und bisher existieren keine international anerkannten Modelle.

In Gleichung 2.1 wird das CEB Task Group V - Modell beschrieben, in dem der zeitabhängige Verlauf des Carbonatisierungsfortschritts dargestellt wird:

$$x_c(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot D_{\text{Eff},0} \cdot \Delta C}{a}} \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t}\right)^w \quad (2.1)$$

Dabei sind:

$x_c(t)$ die Carbonatisierungstiefe zur Zeit t in [m]

$D_{\text{Eff},0}$ effektiver CO_2 – Diffusionskoeffizient von trockenem, carbonatisiertem Beton, bestimmt an definiert hergestellten und vorgelagerten Prüfkörpern in [m^2/s] (20°C , 65% RH)

a	CO ₂ – Bindekapazität von Beton in [kg CO ₂ /m ³]
ΔC	CO ₂ – Konzentrationsgradient, der als Variable der Einwirkung bei der Bemessung zu berücksichtigen ist; in [kg CO ₂ /m ³]
k _e	Parameter für die mikroklimatische Umgebung; zur Berücksichtigung der Feuchteabhängigkeit
k _c	Parameter für die Nachbehandlungsbedingungen
w	Parameter (Exponent) zur Berücksichtigung mikroklimatischer Bedingungen an der betrachteten Betonoberfläche - z.B. Häufigkeit der Beregnung, Schlagregenwahrscheinlichkeit für vertikale Bauteile (0 < w < 0,5)
t ₀	Referenzzeitpunkt - bezeichnet den Zeitraum, in dem das \sqrt{t} Gesetz gültig ist - in [s]
t	Betonalter in [s]

2.2. Probabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung

2.2.1. Sicherheitskonzept

Für die Erläuterung der Vorgehensweise reicht es aus, zwei Variablen mit Normalverteilung (hier: eine Widerstandsvariable und eine Einwirkungsvariable) zu betrachten. Diese Art von Problemen können gelöst werden, in dem man die Differenz der beiden Variablen betrachtet:

$$Z=R-S \quad (2.2)$$

Dabei ist Z die Zuverlässigkeit eines Bauwerks, R der Widerstand und S die Einwirkung. Im betrachteten Fall sind beide Variablen mit entsprechenden Mittelwerten und Standardabweichungen normal verteilt. Z ist dann ebenfalls eine stochastische Variable (siehe Abbildung 2.1) die normal verteilt ist. Mittelwert μ_z und Standardabweichung σ_z können nach den Gleichungen (2.3) und (2.4) bestimmt werden.:

$$\mu_z = \mu_R - \mu_S \quad (2.3)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2.4)$$

In diesem einfachen Fall mit zwei Variablen ist der Zuverlässigkeitsindex β ein Multiplikator, der Auskunft darüber gibt, um welchen Faktor die Standardabweichung der Variablen Z quantitativ vom Abstand zwischen Nullpunkt und Mittelwert um Z abweicht.

(siehe Gleichung 2.5, Abbildung 2.1):

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta) \quad (2.5)$$

($\Phi(\cdot)$ steht für eine Normalverteilung und p_f für die Versagenswahrscheinlichkeit.)

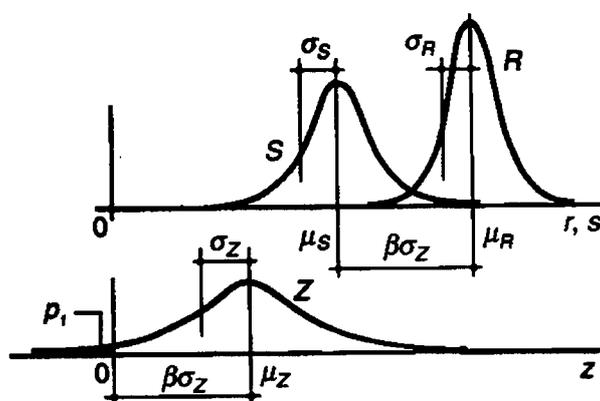


Abbildung 2.1: Widerstand, Einwirkung, Versagenswahrscheinlichkeit und Zuverlässigkeitsindex nach [4]

Die Einflüsse, die im Zusammenhang mit einer Dauerhaftigkeitsbemessung betrachtet werden, sind von zahlreichen Variablen abhängig, die wiederum unterschiedliche Verteilungen aufweisen. Da eine stochastische Auswertung mit der Hand nicht mehr durchführbar ist, wurde das kommerziell vertriebene Computerprogramm STRUREL [7] benutzt.

2.2.2. Anforderungen an das Zuverlässigkeitsniveau

Wie oben schon erwähnt, kann der Korrosionsprozess in zwei Zeitperioden unterteilt werden. Für beide Perioden können Grenzzustände definiert werden. Nach DURACRETE [3] kann man den Zustand der Depassivierung (entsprechend dem Ende der Einleitungsperiode) mit dem Erreichen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (SLS) gleichsetzen, da sich noch keine Beeinträchtigung der Sicherheit ergibt. Der tatsächliche Korrosionsprozess wird mit dem Erreichen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (ULS) gleichgesetzt, da dieser Prozess unter Umständen zu schwerwiegenden Konsequenzen führen kann (Sicherheitsverlust für Mensch und Bauwerk). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird nur die Einleitungspha-

se betrachtet – es handelt sich also um eine Betrachtung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit.

Bemessungsgrenzzustände werden nach heutiger Praxis anhand des Sicherheitsindex β definiert. Nach EC1 wird der Sicherheitsindex für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit $\beta = 1,5$ festgelegt. In anderen Normen sind oft noch höhere Werte für den Zuverlässigkeitsindex gefordert.

Für die hier durchgeführte Dauerhaftigkeitsbemessung wird eine risikoorientierte Abstufung der geforderten Zuverlässigkeit vorgeschlagen. Da nur die Einleitungsperiode betrachtet wird, wird der eigentliche Korrosionsprozess bisher nicht in die Dauerhaftigkeitsbemessung eingebunden. Eine Möglichkeit, die unterschiedlichen Korrosionsrisiken in die Betrachtung mit einzubeziehen, besteht in der Anpassung des Zuverlässigkeitsindex an die Umgebungsklassen. Dementsprechend sollte der Korrosionsprozess in Umgebungen mit abwechselnder Befeuchtung und Austrocknung (XC4) höhere Sicherheitsanforderungen als trockene Umgebungen (e.g.XC1) erfüllen. Aus dieser Überlegung und in Anlehnung an [5] wurden die Werte in Tabelle 2.1 vorgeschlagen.

Umgebungsklasse	Zuverlässigkeitsindex $\beta_{SLS,50}$
XC4	2,0
XC2, XC3	1,5
XC1	0,5

Table 2.1: Geforderter Zuverlässigkeitsindex $\beta_{SLS,50}$ für eine Lebensdauer von 50 Jahren nach [5]

3. Parameterstudie

Die Berechnungen basieren auf dem Modell, das unter 2.1 angegeben ist. Alle Eingabewerte sind stochastische Variablen (Mittelwert, Standardabweichung, Verteilungstyp). Das Ergebnis der Berechnung ist der Zuverlässigkeitsindex β als Funktion des Lebensalters. In diesem Teil der Studie wird ein Lebensalter von 50 Jahren betrachtet.

Eine Vielzahl anderer Studien hat gezeigt, dass der Zementtyp einen starken Einfluss auf die Carbonatisierung hat, z.B. [8]. Wenn Betone aus Portlandzement (CEM I) carbonatisieren, zeigen sie eine abnehmende Porosität in der Carbonatisierungszone, was zu einem erhöhtem Widerstand gegen die weitere Carbonatisierung führt. Für Betone mit Hüttensandzementen

kann der umgekehrte Effekt beobachtet werden: die Porosität des Betons nimmt nach der Carbonatisierung zu und die Carbonatisierungsgeschwindigkeit ebenfalls, da das CO_2 schneller durch die carbonatisierte Zone mit den größeren Poren diffundieren kann. Dieser Einfluss des Zementtyps wird in der Materialnorm prEN 206 nicht berücksichtigt.

In den Berechnungen wurden jeweils zwei unterschiedliche Betonzusammensetzungen mit verschiedenen Zementtypen untersucht (günstig und ungünstig). Dabei wurde der w/z-Wert für die Betone nach den Bestimmungen der Materialnorm prEN 206 festgelegt (siehe Tabelle 3.1). Der Zementgehalt lag für alle Mischungen bei 320 kg. Die Materialwiderstände, die für die Berechnung benötigt werden (effektiver CO_2 – Diffusionskoeffizient, CO_2 – Bindekapazität, CO_2 – Konzentrationsgradient), wurden unter Laborbedingungen ermittelt (siehe [5]).

	Umgebungs-klasse		
	XC2	XC3	XC4
w/z- Wert [-]	0,60	0,55	0,50
Zementgehalt [kg/m^3]	320	320	320
Festigkeitsklasse [N/mm^2] CEM I 42,5 R	38,4	43,4	49,4
Festigkeitsklasse [N/mm^2] CEM III/B 42,5 NW HS NA	42,3	48,6	54,1

Tabelle 3.1: Materialkennwerte für die untersuchten Mischungen

Die Nachbehandlungsdauer, die ebenfalls einen Einfluss auf die Carbonatisierung hat, wurde zu 2 Tagen (CEM I 42,5 R) bzw. 3 Tagen (CEM III/B 42,5 NW HS NA) angenommen. Die klimatischen Bedingungen wurden nach den Angaben von den entsprechenden Wetterstationen zusammengestellt. Genauere Angaben sind in [5] und [9] zu finden. Die Berechnungen wurden für ein moderates und ein heißes europäisches Klima (Standorte Aachen, Deutschland; Barcelona, Spanien) durchgeführt, um den Temperatureinfluss auf die carbonatisierung-sinduzierte Korrosion zu zeigen.

3.1. Umgebungs-klasse XC2

Das Nennmaß der Betondeckung beträgt nach DIN 1045-1 (09/2000) 35 mm. Wenn nach prEN 1992-1 das Vorhaltemaß von 15 mm auf 10 mm reduziert wird, ergäbe sich eine Verringerung des Nennmaßes der Betondeckung auf 30 mm. In Abbildung 3.1 werden die Ergebnisse der Berechnung für beide Betondeckungen, sowie der Einfluss des Zementtyps und des Klimas dargestellt.

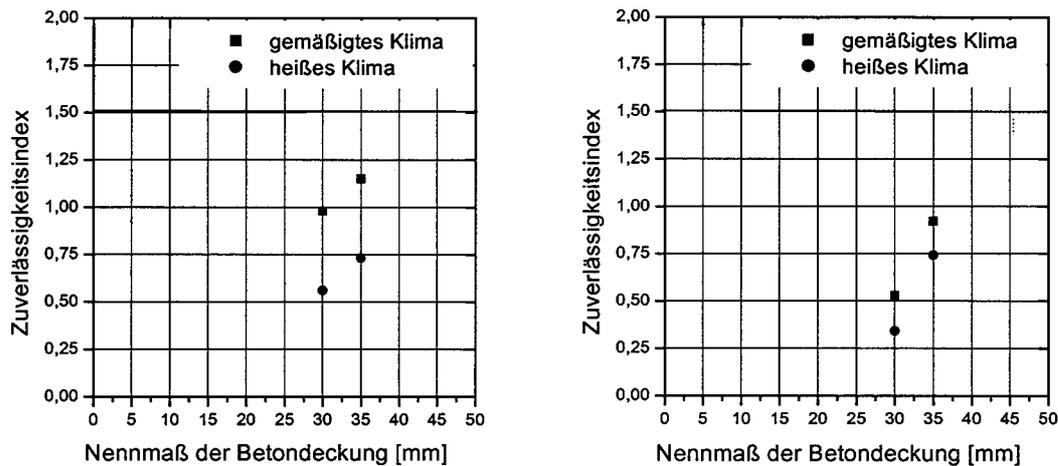


Abbildung 3.1: Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der Betondeckung für die Umgebungs-kategorie XC2 (w/z -Wert = 0,6, Lebensdauer 50 Jahre)
 a) für CEM I 42,5 R (Nachbehandlungsdauer 2 Tage)
 b) CEM III/B 42,5 NW HS NA (Nachbehandlungsdauer 3 Tage)

Man sieht, dass der Zuverlässigkeitsindex von allen drei Parametern abhängt. Der Zuverlässigkeitsindex sinkt mit abnehmender Betondeckung und mit zunehmend wärmerem Klima. Für den Zement CEM III/B ergibt sich durch die reduzierte Betondeckung eine Abnahme des Zuverlässigkeitsindexes von fast 50%. Dies entspricht einer Verkürzung der Lebensdauer von 15 Jahren. Interessant ist die Tatsache, dass die Wahl des Zementtyps einen größeren Einfluss auf die Abnahme des Zuverlässigkeitsindexes als die Verringerung der Betondeckung hat.

An dieser Stelle ist hinzuzufügen, dass in der Berechnung nur eine relativ kurze Nachbehandlungsdauer angesetzt wurde. In der Praxis könnte bei Betonen mit Hüttensandzement der Carbonatisierungswiderstand durch längere Nachbehandlungszeiten verbessert werden.

3.2. Umgebungs-kategorie XC3

Für die Umweltklasse XC3 ist nach DIN 1045-1 bzw. nach prEN 1992-1 das selbe Nennmaß der Betondeckung erforderlich wie für die Klasse XC2. Dafür ist der erforderliche w/z -Wert nach prEN 206 niedriger. Bei einem Vergleich der Abbildungen 3.1 und 3.2 sieht man, dass die Verringerung des Wasserzementwertes und damit die Verringerung der Porosität ebenfalls einen wichtigen Einfluss auf den Zuverlässigkeitsindex hat. Wenn man die erreichten Zuverlässigkeitsindices betrachtet, fällt auf, dass man durch die Verringerung des w/z Wertes we-

sentlich näher an den geforderten Wert von $\beta = 1,5$ (siehe 2.2.2) kommt, als im Fall höheren w/z Wertes.

Abgesehen von diesem neuen Aspekt können die selben Beobachtungen gemacht werden wie bei der Umgebungsklasse XC2: Die Verringerung der Betondeckung bewirkt eine Abnahme des Zuverlässigkeitsindex und ein heißes Klima in Meernähe ebenfalls.

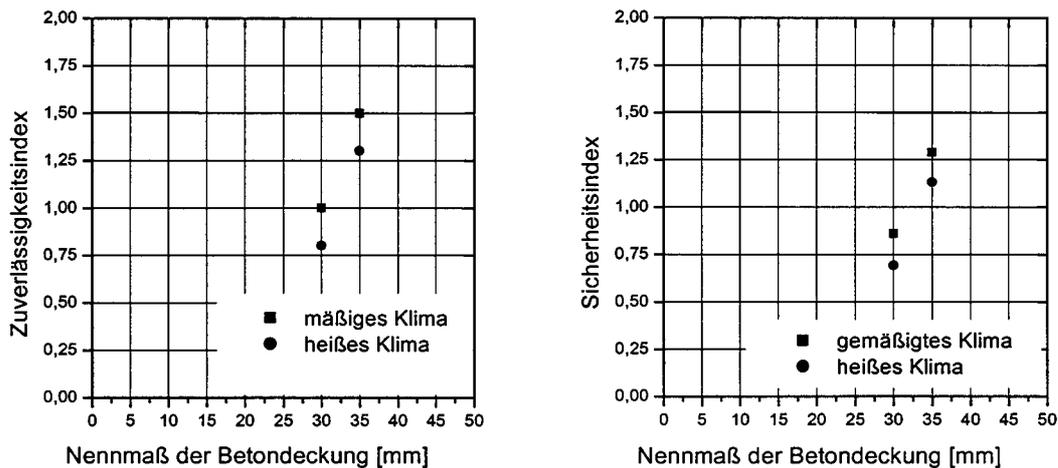


Abbildung 3.2: Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der Betondeckung für die Umgebungsklasse XC3 (w/z -Wert = 0,55, Lebensdauer 50 Jahre)
 a) für CEM I 42,5 R (Nachbehandlungsdauer 2 Tage)
 b) CEM III/B 42,5 NW HS NA (Nachbehandlungsdauer 3 Tage)

3.3. Umgebungsklasse XC4

Für die Umgebungsklasse XC4 beträgt der geforderte w/z Wert 0,5 (nach prEN 206) und das Nennmaß der Betondeckung 40 mm (nach DIN 1045-1). Die Erhöhung der w/z Wertes bzw. die zunehmende Verbesserung der Betonqualität (Abnahme der Porosität) spiegelt sich erneut bei der Betrachtung des Sicherheitsindex wieder (vergleiche Abbildungen 3.1(a), 3.2(a), 3.3(a)). Obwohl das geforderte Zuverlässigkeitsniveau für die Umgebungsklasse XC4 von 1,5 auf 2,0 angehoben wurde, liegen die Werte für den Beton mit CEM I 42,5 R immer noch darüber.

Für den Beton mit CEM III/B 42,5 NW HS NA lässt sich eine 50%ige Abminderung des Zuverlässigkeitsindex beobachten, der Beton mit dem Hüttensandzement liegt also wieder weit unter dem geforderten Sicherheitsniveau. Eine Verringerung der Betondeckung trägt zu einem weiteren Zuverlässigkeitsverlust bei.

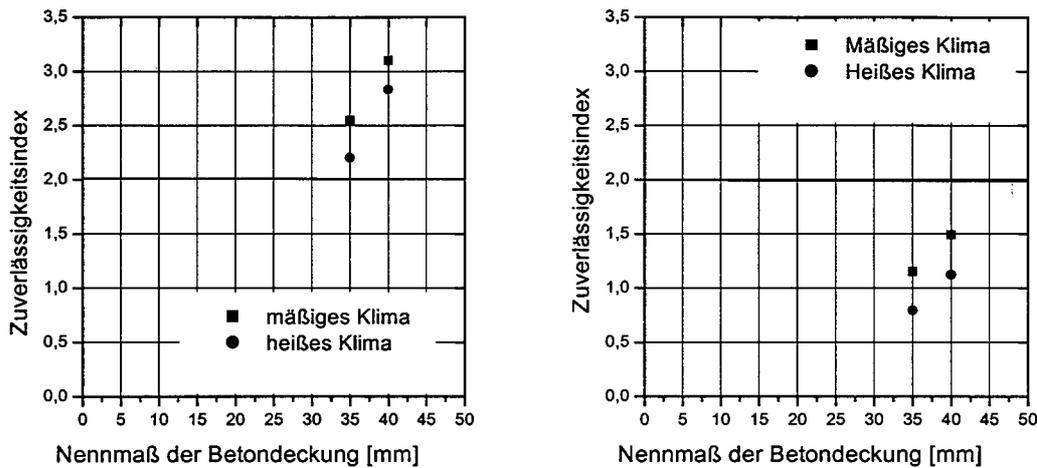


Abbildung 3.3: Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit der Betondeckung für die Umgebungs-kategorie XC4 (w/z -Wert = 0,5, Lebensdauer 50 Jahre)
 a) für CEM I 42,5 R (Nachbehandlungsdauer 2 Tage)
 b) CEM III/B 42,5 NW HS NA (Nachbehandlungsdauer 3 Tage)

Der beachtliche Unterschied des Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit des verwendeten Zementtyps zeigt, dass die im Moment geltenden Regelungen zur Bestimmung der Betondeckung für die Umgebungs-klassen XC1-XC4 nicht alle wichtigen Parameter beinhaltet und dass auch die Gewichtung der jetzt berücksichtigten Einflussgrößen nicht ganz richtig ist. Dies kann daran gezeigt werden, dass sich durch einen niedrigeren w/z Wert ein unproportional höherer Zuverlässigkeitsindex ergibt.

Eine Verringerung des Nennmaßes der Betondeckung, wie sie sich durch eine Reduzierung des Vorhaltemaßes bei gleichbleibender Mindestbetondeckung ergeben würde, ergibt eine weitere Abnahme der Zuverlässigkeit. Da die errechneten Zuverlässigkeitsindices bis auf einen Fall unter dem geforderten Sicherheitsindex liegen, ist aus deutscher Sicht von einer solchen Änderung der Betondeckung abzuraten.

Um bei einer Verringerung des Vorhaltemaßes weiterhin auf ein Nennmaß der Betondeckung zu kommen, mit dem man zwar teilweise unter dem in 2.2.2 geforderten Zuverlässigkeitsniveau liegt, welches sich aber aus deutscher Sicht in der Praxis bewährt hat, werden für die zukünftige prEN 1992-1 zur Sicherstellung einer Dauerhaftigkeit von 50 Jahren die Werte der nachfolgenden Tabelle 3.2 vorgeschlagen.

	X0	XC1	XC2	XC3	XC4
c_{min}	10	15	25	30	30
Δc gemäß prEN13670	10	10	10	10	10
c_{nom}	20	25	35	40	40

Tabelle 3.2: Mindestbetondeckung (c_{min}), Vorhaltemaß (Δc) und Nennmaß der Betondeckung für carbonatisierungsinduzierte Korrosion gemäß prEN 1992-1(12/2000) (Werte gelten zur Sicherstellung einer Dauerhaftigkeit von 50 Jahren)

4. Erhöhung der Betondeckung für eine Lebensdauer von 100 Jahren

Die Angaben zur Betondeckung, die jetzt in der DIN 1045-1 (09/2000) bzw. im prEN 1992-1 zu finden sind, beziehen sich auf eine Lebensdauer von 50 Jahren. Da die zukünftige Fassung des EN 1992-1 auch allgemeine Regeln für Brücken enthalten soll, wurde hier die Frage untersucht, wie sich eine Erhöhung des Lebensalters auf 100 Jahre auf die Betondeckung auswirkt.

In den vorgehenden Kapiteln wurde der Zuverlässigkeitsindex für ein Lebensalter von 50 Jahren bestimmt und bewertet. Für die Berechnung des Zuverlässigkeitsindexes waren die Eingabegrößen die Dicke der Betondeckung, die Materialkenngrößen der verschiedenen Betonzusammensetzungen und die Umweltbedingungen. Für die Bestimmung der Betondeckung für ein Lebensalter von 100 Jahren wurden alle Eingabewerte außer der Dicke der Betondeckung konstant gehalten. Die Betondeckung wurde solange variiert, bis der selbe Zuverlässigkeitsindex erreicht wurde wie für ein Lebensalter von 50 Jahren. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Es ist noch einmal hinzuzufügen, dass einige der Zuverlässigkeitsindizes sehr niedrig sind. Aber solange es in den Normen keine genaueres Nachweiskonzept zur Bestimmung der Betondeckung gibt und die Betondeckung nur über die Umgebungsklasse und den w/z Wert gesteuert wird, scheint die hier gewählte Methode ausreichend präzise zu sein.

Man sieht, dass der Unterschied des Nennmaßes der Betondeckung für eine Lebensdauer von 50 und 100 Jahren zwischen 8 und 12 mm schwankt. Obwohl die Berechnungen für unterschiedliche Zementtypen und Klimabedingungen durchgeführt wurden, sind die voneinander abweichenden Ergebnisse, die in Kapitel 3 beobachtet wurden, bei dieser Berechnung nicht mehr festzustellen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass der zeitliche Verlauf der

Carbonatisierung keiner reinen \sqrt{t} Beziehung entspricht, sondern dass sich durch die klimatischen Einflüsse Abweichungen ergeben. Hier sei noch einmal auf [5] verwiesen.

	$c_{\text{nom}, 50}$ [mm]	Gemäßigtes Klima	Heißes Klima
		$c_{\text{nom}, 100}$ (Zuverlässigkeitsindex β) [mm]	$c_{\text{nom}, 100}$ (Zuverlässigkeitsindex β) [mm]
XC2 – CEM I	35	45,5 (1,2)	46,0 (0,7)
XC2 – CEM III/B NW HS NA	35	46,0 (0,9)	46,0 (0,7)
XC3 – CEM I	35	45,5 (1,5)	45,5 (1,3)
XC4 – CEM I	40	50,0 (3,1)	50,0 (2,8)
XC4 – CEM III/B NW HS NA	40	51,0 (1,5)	52,0 (1,1)

Tabelle 4.1: Nennmaß der Betondeckung für ein Lebensalter von 100 Jahren mit dem selben Zuverlässigkeitsindex wie für 50 Jahren

Da die Untersuchungen für chloridinduzierte Korrosion ähnliche Ergebnisse ergeben haben, wird als einheitliche Normenformulierung für beide Korrosionsarten für eine Lebensdauer von 100 Jahren eine Erhöhung des Nennmaßes der Betondeckung von 10 mm für alle Umgebungsklassen vorgeschlagen.

5. Zusammenfassung

Die Berechnungen, die in dieser Forschungsarbeit durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Bestimmung der Betondeckung in Abhängigkeit von der Umgebungsklasse, so wie sie in den geltenden Bemessungsnormen (z.B. DIN 1045-1, prEN 1992-1) vorgeschrieben ist, nicht alle wichtigen Einflussgrößen erfasst. Zusätzlich zu den Umgebungsklassen wird die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken von der Zementart, der Betonqualität (über den w/z Wert und die Nachbehandlungsdauer steuerbar) und dem lokalen Umgebungsklima (Temperatur, relative Luftfeuchte) beeinflusst. Zum w/z Wert werden zwar Angaben in der Materialnorm prEN 206 gemacht, jedoch fehlen Angaben zur Zementart und zu den lokalen klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit). Wenn diese fehlenden Einflussgrößen im Rahmen einer Dauerhaftigkeitsbemessung berücksichtigt werden, kommt es zu extrem unterschiedlichen Ergebnissen innerhalb einer Umweltklasse.

Die Berechnungen haben auch gezeigt, dass durch die vorgeschriebenen Betondeckungen, wie sie in DIN 1045-1 definiert sind, nicht immer der Zuverlässigkeitsindex erreicht werden kann, der hinsichtlich des Korrosionsrisikos festgelegt wurde. Eine weitere Verringerung des Nennmaßes der Betondeckung würde zu noch niedrigeren Zuverlässigkeitsindices und einer kürzeren Lebensdauer führen. Deshalb wird vorgeschlagen, bei einer Verringerung des Vorhaltemaßes gemäß prEN 13670 die Mindestbetondeckung entsprechend zu erhöhen, so dass sich das Nennmaß der Betondeckung verglichen mit den früheren Bestimmungen nicht ändert. Jedoch sollte in den Normen darauf hingewiesen werden, dass die Bestimmung der Betondeckung auch durch eine geeignete Berechnung erfolgen kann (zum Beispiel eine Dauerhaftigkeitsbemessung) und bei zweckmäßiger Betonzusammensetzung unter den in der Norm vorgeschriebenen Werten liegen kann.

Bei der Bestimmung des Nennmaßes der Betondeckung für 100 Jahre hat sich gezeigt, dass sich eine Erhöhung von 8-12 mm gegenüber den Werten für 50 Jahre ergibt. Als Normenformulierung für eine Lebensdauer von 100 Jahren wird hier eine einheitliche Erhöhung von 10 mm für alle Umweltklassen gegenüber den jetzt angegebenen Werten der Mindestbetondeckung vorgeschlagen.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch



Dipl.-Ing. A. Schießl

6. Literatur

- [1] Faber M.H.; Sloth. M.; Edvardsen, C.; Siemes, T.; Vrouwenfelder, T. and van Manen S.: Design Framework. Brussels: European Union – Brite EURam,1997–CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R1, March 1997
- [2] Faber M.H.; Siemes, T. and Vrouwenfelder, T.: Probabilistic Methods for Durability Design. Brussels: European Union – Brite EURam,1999–CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R0,1999
- [3] Alisa, M.; Andrade, C.; Gehlen, C.; Rodriguez, J. and Vogels R.: Modelling of Degradation. Brussels: European Union – Brite EURam,1998–CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R4-5,1998
- [4] Gehlen C. und Schießl P.: Probability-based design for the Western Scheldt Tunnel. In Structural Concrete, Journal of the fib, Volume P1, Number 2, pp 1-8, June 1999
- [5] Gehlen C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 510, Beuth Verlag, Berlin 2000
- [6] New Approach to Durability Design. An example for carbonation induced corrosion. CEB Bulletin 238, May 1997
- [7] RCP Consulting: STRUREL, A Structural Reliability Analysis Program System. RCP Consulting, München 1995
- [8] A review of Carbonation in Reinforced Concrete. London: Cement and Concrete Association, C&C1987
- [9] Lindvall, A.; Nilsson, L. O.; Högberg, A.; Rodhe, M.; Andersen A. and Taesler R.: Models for Environmental Actions on Concrete Structures. Brussels: European Union – Brite EURam,1999–CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R3,1999