

Karbonatisierungsverhalten von Betonen unter Einbeziehung klinkerreduzierter Zusammensetzungen

Ein Modell zur Abschätzung des Karbonatisierungsfortschrittes

Vom Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Jens Stefan Hainer

aus
Frankfurt am Main

D 17

Darmstadt 2015

Referent: Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher
Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
Tag der Einreichung: 05. März 2015
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Mai 2015

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner

Anschrift:

Institut für Massivbau – Fachgebiet Massivbau
Franziska-Braun-Straße 3
64287 Darmstadt

<http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/massivbau/fgmassivbau>

Hainer, Jens Stefan:

Karbonatisierungsverhalten von Betonen unter Einbeziehung klinkerreduzierter
Zusammensetzungen
Ein Modell zur Abschätzung des Karbonatisierungsfortschrittes

1. Auflage Darmstadt

Dissertation // Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt; Heft 31

ISBN 978-3-942886-08-6

Dr.-Ing. Stefan Hainer

Geboren 1985 in Frankfurt/Main. Von 2004 bis 2010 Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2006 bis 2010 Werkstudent bei der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG. Von 2010 bis 2015 wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Seit 2015 Mitarbeiter bei der Dyckerhoff GmbH.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner danke ich sehr herzlich für die mir zuteilgewordene Motivation zu dieser Arbeit, für seine Unterstützung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher und Prof. Dr.-Ing Horst-Michael Ludwig möchte ich sehr herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Korreferates danken.

Bei meiner Frau Judith und meinem Freund Patrick Reining bedanke ich mich ganz herzlich für die kritische Durchsicht meiner Dissertation und die wertvollen Hinweise.

Besonderer Dank gebührt Herrn Dr.-Ing. Tilo Proske für seine großartige Forschungstätigkeit auf dem Gebiet der umwelt- und ressourcenschonenden Baustoffe als Grundlage für die vorliegende Arbeit und für die interessanten, fruchtbaren Diskussionen. Weiterhin möchte ich der Dyckerhoff GmbH für die fachliche und finanzielle Unterstützung danken.

Bedanken möchte ich mich bei den Studenten, die im Rahmen von Studienarbeiten zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt insbesondere Frau Anna Müller, Frau Katharina Jung, Herrn Mathias Dönges, Herrn Ramon Balling und Herrn Henrik Schwarzinger.

Meinen Kolleginnen und Kollegen des Instituts für Massivbau bin ich für das vertrauensvolle und freundschaftliche Verhältnis sehr dankbar. Unsere gemeinsame Zeit wird mir in freudiger Erinnerung bleiben.

Meinen Eltern Ute und Gerd sowie meiner Familie danke ich von ganzem Herzen für ihre fortwährende Unterstützung und die damit verbundenen Möglichkeiten.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung des Massenbaustoffs Beton ist mit signifikanten Umweltwirkungen verbunden, welche insbesondere dem im Zement enthaltenen Portlandzementklinker maßgeblich zuzuordnen sind. Aus diesem Grund wird die Entwicklung von Betonen mit klinkerarmen Zementen stark forciert. Damit derartige Betone in der Baupraxis eingesetzt werden können, muss eine ausreichende Dauerhaftigkeit des produzierten Betons gewährleistet werden. Üblicherweise führt die Reduzierung des Portlandzementklinkeranteils im Beton zu einem kritischen Karbonatisierungswiderstand und verhindert somit den Einsatz dieser Betone in Stahlbetonbauteilen.

Um die Entwicklung von Betonen aus klinkerarmen Zementen zu beschleunigen, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Zusammenhänge zwischen der Zementzusammensetzung und dem Karbonatisierungswiderstand von Beton erforscht. Auf Basis umfangreicher experimenteller Untersuchungen sowie vorhandener Vorhersagemodelle wurde ein neuer Ansatz zur Abschätzung des Karbonatisierungswiderstandes von ungerissenem Beton aus klinkerarmen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen entwickelt. Zusätzlich zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf den Karbonatisierungsfortschritt berücksichtigt dieses Modell die Auswirkungen verschiedener Umgebungsbedingungen. Des Weiteren erfolgte die Durchführung einer Lebensdauerbemessung von korrosionsgefährdeten Stahlbetonbauteilen auf vollprobabilistischer Basis. Die Ergebnisse münden in einer baupraktischen Empfehlung verschiedener Vorgehensweisen zur Sicherstellung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit von Beton gegenüber einer Depassivierung der Bewehrung.

ABSTRACT

The production of the mass construction material concrete is associated with significant environmental impacts, which are particularly allocated to the Portland cement clinker contained in cement. For this reason, recently the development of concrete made of low-clinker cements is strongly accelerated. To use such concretes in building practice, a sufficient durability of reinforced concrete elements must be ensured. Usually, the reduction of the Portland cement clinker content in concrete leads to a critical carbonation resistance and hence prevents the use of such concretes. Correlations between the cement composition and the carbonation resistance of concrete were studied in the present thesis with the objective of accelerating development of concrete made of low-clinker cements. Based on extensive experimental investigations as well as available prediction models, a new approach for the estimation of the carbonation resistance of concrete made of low-clinker cements with several main constituents was developed. In addition to the influence of the concrete composition on the carbonation progress, this model takes into account the effects of various environmental conditions. Furthermore, a service life design based on the theory of probability was carried out for reinforced concrete elements vulnerable to carbonation-induced corrosion. Based on the findings, different approaches to ensure an adequate durability of concrete with respect to the depassivation of reinforcement were recommended.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Variablen.....	VI
1 Einleitung.....	1
1.1 Problemstellung und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise	3
2 Wissenschaftliche Grundlagen und Stand der Technik von Betonen mit geringer Umweltauswirkung.....	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Zement	5
2.2.1 Definition	5
2.2.2 Herstellung von Portlandzementklinker.....	5
2.2.3 Klinkerphasen.....	6
2.2.4 Hydratation des Portlandzementklinkers	7
2.2.5 Weitere Zementhauptbestandteile neben Portlandzementklinker	8
2.2.6 Zusammensetzung von Zement in verschiedenen Regelwerken.....	13
2.3 Beton	16
2.3.1 Definition	16
2.3.2 Betongefüge und Transportprozesse	17
2.4 Umweltwirkungen des Baustoffs Beton	24
2.4.1 Grundlagen der Ökobilanzierung	24
2.4.2 Umweltwirkungen aus der Betonherstellung	25
2.4.3 Umweltwirkungen aus der Zementherstellung	25
2.5 Möglichkeiten zur Reduzierung der Umweltwirkung von Beton.....	28
2.5.1 Übersicht	28
2.5.2 Zementzusammensetzungen unter Anwendung bisheriger betontechnologischer Randbedingungen.....	28
2.5.3 Zementzusammensetzungen unter Anwendung veränderter betontechnologischer Randbedingungen.....	29
2.5.4 Neuartige, nicht auf Portlandzementklinker basierende Bindemittel.....	30

3	Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen	33
3.1	Allgemeines	33
3.2	Karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion	36
3.3	Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion	37
3.4	Frostangriff.....	39
3.5	Normative Regelungen zur Sicherstellung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit	41
3.6	Dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften von Betonen mit von DIN EN 197-1 (2011) abweichender Zementzusammensetzung.....	43
3.6.1	Allgemeines.....	43
3.6.2	Zemente mit Kalksteingehalten ≥ 35 M.-%	44
3.6.3	Zemente mit Flugaschegehalten > 35 M.-%	45
3.6.4	Zemente mit hohen Flugasche- und Kalksteingehalten	45
3.6.5	Zemente mit hohen Hüttensand- und Flugaschegehalten.....	45
3.6.6	Zemente mit hohen Hüttensand- und Kalksteingehalten	46
3.7	Zusammenfassung.....	47
4	Karbonatisierung von Beton.....	49
4.1	Allgemeines	49
4.2	Karbonatisierungsreaktionen	52
4.3	Gefügeänderungen infolge Karbonatisierung	53
4.4	Einflüsse auf das Karbonatisierungsverhalten	55
4.4.1	CO ₂ -Konzentration.....	55
4.4.2	Zementart.....	55
4.4.3	Wassermenge.....	58
4.4.4	Nachbehandlung.....	59
4.4.5	Umgebungsbedingungen - Feuchtigkeit.....	59
4.5	Modelle zur Beschreibung des Karbonatisierungsfortschrittes	61
4.5.1	Grundlagen	61
4.5.2	Überwiegend auf Ergebnissen empirischer Untersuchungen basierende Modellansätze.....	62

4.5.3	Auf den karbonisierbaren Bestandteilen und dem Diffusionswiderstand des Betons basierende Modellansätze	66
4.5.4	Numerische Modellansätze	76
4.5.5	Vergleich vorhandener Modelle zur Beschreibung des Karbonisierungsfortschrittes	79
5	Experimentelle Untersuchungen	83
5.1	Beschreibung des Versuchsprogramms	83
5.1.1	Allgemeines.....	83
5.1.2	Versuchsreihen zum Einfluss der Zementart auf das Karbonisierungsverhalten.....	85
5.1.3	Untersuchung zum Einfluss des Leimvolumens und der Nachbehandlungsart auf das Karbonisierungsverhalten	89
5.1.4	Untersuchung zum Einfluss der Nachbehandlung auf das Karbonisierungsverhalten.....	90
5.1.5	Untersuchungen zum Wasserdampfdiffusionswiderstand	93
5.1.6	Experimentelle Bestimmung des Calciumhydroxidgehaltes.....	95
5.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	98
5.2.1	Allgemeines.....	98
5.2.2	Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Karbonisierungstiefe	98
5.2.3	Einfluss der Prüfdauer und der CO ₂ -Konzentration auf die Karbonisierungstiefe	99
5.2.4	Einfluss der Zementhauptbestandteile auf die Karbonisierungstiefe	102
5.2.5	Einfluss des Leimvolumens und Größtkorndurchmessers auf die Karbonisierungstiefe	105
5.2.6	Einfluss des Wasserklinkerwertes auf die Karbonisierungstiefe	107
5.2.7	Einfluss der Nachbehandlung und Umgebungsbedingungen auf die Karbonisierungstiefe	109
5.2.8	Untersuchungen zur Wasserdampfdiffusion	114
5.2.9	Untersuchungen zum Calciumhydroxidgehalt	116
5.3	Zusammenfassung.....	117

6	Entwicklung eines analytischen Modells zur Vorhersage der Karbonatisierung von Beton	119
6.1	Allgemeines	119
6.2	Eignung vorhandener Modelle für die Vorhersage des Karbonatisierungswiderstandes	120
6.3	Theoretisch basierte Modellansätze	123
6.3.1	Allgemeines.....	123
6.3.2	Abbildung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes.....	125
6.3.3	Vorhersagemodell auf Basis des CaO-Gehaltes.....	127
6.3.4	Vorhersagemodell auf Basis des Hydroxidionengehaltes	130
6.3.5	Vorhersagemodell auf Basis des Calciumhydroxidgehaltes	133
6.3.6	Vergleich der theoretisch basierten Ansätze mit dem Modell nach Papadakis.....	135
6.3.7	Parameterstudie mit Hilfe der theoretisch basierten Modellansätze	137
6.3.8	Übertragungsunsicherheiten der theoretisch basierten Modellansätze	138
6.4	Rein empirische Modellansätze	140
6.4.1	Vorhersage der Karbonatisierungstiefe über die Druckfestigkeit	140
6.4.2	Vorhersagemodelle auf Basis von Wirksamkeitsfaktoren der Hauptbestandteile	140
6.4.3	Parameterstudie	148
6.4.4	Übertragungsunsicherheiten der rein empirischen Modellansätze.....	149
6.5	Einfluss der Umgebungsbedingungen und der Nachbehandlungsdauer auf die Karbonatisierungstiefe.....	150
6.6	Zusammenfassung.....	153

7	Vollprobabilistische Lebensdauerbemessung unter Verwendung der Prognosemodelle	159
7.1	Allgemeines	159
7.2	Grundlagen der Zuverlässigkeitstheorie	160
7.3	Grundlagen der Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauteilen hinsichtlich karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion	161
7.4	Modell zur vollprobabilistischen Lebensdauerbemessung	163
7.4.1	Definition von Basisvariablen der Grenzzustandsfunktion.....	163
7.4.2	Sensitivitätsanalyse der Basisvariablen.....	165
7.4.3	Verifizierung des probabilistischen Modells.....	167
7.5	Bestimmung betontechnologischer Grenzwerte für einen ausreichenden Karbonatisierungswiderstand	173
7.5.1	Allgemeines.....	173
7.5.2	Bestimmung von maximal zulässigen Karbonatisierungstiefen	174
7.5.3	Grenzwerte für die Zementzusammensetzung	178
7.5.4	Grenzwerte für die Betonzusammensetzung.....	181
7.6	Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes unter Verwendung des Teilsicherheitskonzeptes	183
7.7	Umweltwirkungen von Betonen mit identischem Karbonatisierungswiderstand	186
7.8	Performanceorientierte betontechnologische Grenzwerte	188
7.9	Zusammenfassung.....	191
8	Empfehlungen für die Baupraxis	195
9	Resümee und Ausblick	199
10	Literaturverzeichnis	205
	Anhang.....	223