



# **Betonkorrosion infolge kombinierten Säure-Sulfat-Angriffs bei Oxidation von Eisendisulfiden im Baugrund**

Von der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung  
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

**Dissertation**

von

Björn Siebert

Bochum, im Februar 2010



Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2010-2

**Björn Siebert**

**Betonkorrosion infolge kombinierten  
Säure-Sulfat-Angriffs bei Oxidation von  
Eisendisulfiden im Baugrund**

Shaker Verlag  
Aachen 2010

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8997-3

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2006 bis 2009 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum.

Die Arbeit basiert im Wesentlichen auf dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekt „Realistische Bewertung des chemischen Angriffspotentials auf Betonbauwerke infolge Pyritoxidation durch Baumaßnahmen“. Dieses interdisziplinäre Projekt an der Ruhr-Universität Bochum zielte zum einen auf die Beschreibung des Oxidationsprozesses von Pyrit und zum anderen auf die daraus folgenden Korrosionsmechanismen im Betongefüge ab. Während die Angriffsseite im Rahmen von geologischen/hydrologischen Untersuchungen an pyrithaltigen Böden durch den Lehrstuhl „Angewandte Geologie“ näher beleuchtet wurde, fokussierten meine baustofftechnischen Untersuchungen die Widerstandsseite, d.h. die Interaktionen zwischen Beton und den angreifenden Oxidationsprodukten.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Breitenbücher, der mir diese Arbeit ermöglicht und die Berichterstattung übernommen hat. Herrn Professor Stark danke ich sehr herzlich für seine Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Ich möchte mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Baustofftechnik für die kollegiale Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken. Besonders danke ich meinem Kollegen Dr. Hussein Alawieh für zahlreiche Diskussionen und Anregungen. Meinem Freund Carsten Grashoff danke ich für die redaktionelle Durchsicht des Manuskripts. Herrn Dr. Neuser, Herrn Born sowie Herrn Dettmar und seinen Mitarbeiterinnen Frau Kessler und Frau Schremmer danke ich für die aufwändige und umfangreiche Probenpräparation. Weiterhin gilt mein Dank Herrn Dr. Reinecke und Herrn Mammen für wertvolle Diskussionen und ausdauernde Phasenanalysen, sowie nicht zuletzt Herrn Professor Wisotzky und Frau Vera Eisenberg für diverse Exkurse in die Gebiete der Hydrologie und Geologie.

Vielen Dank auch für die freundliche Unterstützung, die ich anderenorts erfahren habe, hier insbesondere Herrn Dr. Möser und Herrn Dr. Nobst vom F.A. Finger-Institut in Weimar, Herrn Dr. Rankers vom ibac in Aachen und Herrn Professor Pöllmann vom Institut für Geowissenschaften in Halle.

Schließlich möchte ich noch meiner Freundin Esther, meiner Familie und meinen Freunden danken, deren so wertvolle aufmunternde Unterstützung ich mir immer wieder sicher sein durfte.

Bochum, im Februar 2010

Björn Siebert

eingereicht am 20.10.2009  
mündliche Prüfung am 22.12.2009

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. R. Breitenbücher  
Lehrstuhl für Baustofftechnik  
Ruhr-Universität Bochum

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. e.h. mult. Dr. h.c. mult. J. Stark  
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
Bauhaus Universität Weimar

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Problemstellung</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Erkenntnisse</b> .....	<b>6</b>
2.1	Chemisches Angriffspotential eisendisulfidhaltiger Böden auf Beton .....	6
2.1.1	Oxidation von Eisendisulfiden im Boden .....	6
2.1.2	Transport der angreifenden Medien im Boden und an die Betonoberfläche.....	9
2.1.3	Bewertung des chemischen Angriffspotentials .....	10
2.1.4	Maßnahmen bei einem chemischen Angriff auf Beton.....	12
2.2	Betongefüge .....	13
2.2.1	Phasen des Zementsteins.....	13
2.2.2	Dichtigkeit und Ionentransport.....	15
2.3	Betonkorrosion durch äußeren Sulfatangriff.....	18
2.3.1	Allgemeines.....	18
2.3.2	Ettringit- und Gipsbildung .....	19
2.3.3	Thaumasitbildung.....	22
2.3.4	Einfluss des Kations .....	23
2.3.5	Korrosionszonen.....	24
2.3.6	Einflussparameter auf die Bildung von Schadmineralen .....	25
2.4	Betonkorrosion durch Angriff von Schwefelsäure.....	29
2.4.1	Allgemeines zum Säureangriff.....	29
2.4.2	Reaktionen beim Säureangriff auf Zementstein .....	30
2.4.3	Einfluss des Anions .....	33
2.4.4	Korrosionszonen.....	34
2.4.5	Korrosionsfortschritt .....	36
2.5	Kombinierter Säure-Sulfat-Angriff auf Beton .....	43
<b>3</b>	<b>Vorgehensweise bei den experimentellen Untersuchungen</b> .....	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der untersuchten Betone</b> .....	<b>50</b>
4.1	Zusammensetzung .....	50
4.2	Herstellung der Probekörper .....	51
4.3	Porosität.....	52
4.4	Restalkalität.....	53
<b>5</b>	<b>Durchführung der Untersuchungen</b> .....	<b>55</b>
5.1	Betone in eisendisulfidhaltigen Böden.....	55
5.1.1	Bodeneigenschaften .....	55
5.1.2	Einlagerung der Probekörper .....	57
5.2	Betone in Prüflösungen .....	58
5.2.1	Einlagerung für Festkörperuntersuchungen .....	58
5.2.2	Einlagerung für Lösungsuntersuchungen.....	60
5.3	Untersuchungsmethoden .....	62
5.3.1	Festkörperuntersuchungen .....	62
5.3.2	Lösungsuntersuchungen.....	65

<b>6</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>67</b>
6.1	Festkörperuntersuchungen an Betonen nach Einlagerung in eisendisulfidhaltigen Böden .....	67
6.1.1	Visuelle Beurteilung.....	67
6.1.2	Säureeindringtiefe .....	69
6.1.3	Relative Restdruckfestigkeit .....	72
6.1.4	Chemisch-mineralogische Untersuchungen.....	76
6.2	Festkörperuntersuchungen an Betonen nach Einlagerung in Prüflösungen.....	84
6.2.1	Visuelle Beurteilung.....	84
6.2.2	Masseänderung.....	86
6.2.3	Säureeindringtiefe .....	90
6.2.4	Relative Restdruckfestigkeit .....	95
6.2.5	Chemisch-mineralogische Untersuchungen des Phasenbestands .....	103
6.3	Lösungsuntersuchungen .....	114
6.3.1	Elementspezifische Auslaugung .....	114
6.3.2	Säureverbrauch.....	118
<b>7</b>	<b>Zusammenführende Diskussion.....</b>	<b>121</b>
7.1	Kurzbewertung der eingesetzten Untersuchungsmethoden .....	121
7.2	Übertragbarkeit von Angriffsbedingungen in Prüflösungen auf Verhältnisse in-situ.....	121
7.3	Eigenschaften der charakteristischen Korrosionszonen.....	123
7.4	Einflüsse auf Angriffsseite .....	125
7.5	Einflüsse auf Widerstandsseite.....	127
<b>8</b>	<b>Übertragung der Ergebnisse auf die Bewertung des Angriffspotentials von eisendisulfidhaltigem Baugrund .....</b>	<b>131</b>
<b>9</b>	<b>Empfehlungen für Maßnahmen bei Bauvorhaben in eisendisulfidhaltigem Baugrund .....</b>	<b>136</b>
<b>10</b>	<b>Offene Fragen und Ausblick .....</b>	<b>138</b>
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>139</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>142</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>153</b>