

Methodenentwicklung zur Bestimmung des hygrothermomechanischen Langzeitverhaltens von strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und mineralischen Untergründen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im Fachbereich Maschinenbau der
Universität Kassel

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Cornelia Bieker
aus Amöneburg-Rüdigheim

Kassel, den 07. Dezember 2005

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Schlimmer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ekkehard Fehling

Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

Cornelia Bieker

**Methodenentwicklung zur Bestimmung des
hygrothermomechanischen Langzeitverhaltens von
strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und
mineralischen Untergründen**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2006

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.: Kassel, Univ., Diss., 2006

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Kasseler Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades einer Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. E. Fehling

Tag der mündlichen Prüfung: 03.02.2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5433-1

ISBN-13: 978-3-8322-5433-9

ISSN 1613-3498

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkstofftechnik im Fachgebiet Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde der Universität Kassel in der Zeit vom Februar 2003 bis Februar 2006.

Mein besonderer, aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schlimmer für die großzügige Unterstützung, die Betreuung und für die Möglichkeit, meine Forschungstätigkeit auf verschiedenen Tagungen vorstellen zu können. Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Fehling danke ich herzlich für die Übernahme des Korreferates und die darüber hinausgehende Unterstützung und das Interesse an der Arbeit.

Ferner danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. P. Geiß sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. A. Bledzki für ihre Mitwirkung als Prüfer.

Den Kollegen und studentischen Mitarbeitern am Institut, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Karl-Michael Mihm und Herrn Thomas Herwig, danke ich für die stete Diskussionsbereitschaft, für die vielfältigen Anregungen und die sehr gute Zusammenarbeit. Frau Dr.-Ing. Elfriede Ott und Herrn Dr.-Ing. Karsten Schilde danke ich für das sorgfältige Korrekturlesen.

Schließlich möchte ich meiner Familie und meinen Freunden danken, mein besonderer Dank gilt Erik Humburg für seine Unterstützung und sein Verständnis.

Cornelia Bieker

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE, INDIZES	VI
1 EINLEITUNG	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	2
2 STAND DER FORSCHUNG	5
2.1 Kleben auf Stahl	5
2.1.1 Grundlagen	5
2.1.2 Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Klebverbindungen mit Stahlfügeteilen	6
2.2 Klebverbindungen im Bauwesen	16
2.2.1 Strukturelles Kleben von Beton und Mauerwerk	17
2.3 Schlussfolgerungen und Ziele der eigenen Untersuchungen	22
3 VERWENDETE KLEBSTOFFE UND DEREN EIGENSCHAFTEN	24
3.1 Allgemeine Grundlagen der Klebtechnik	24
3.1.1 Haft- und Versagensmechanismen von Klebstoffen	25
3.1.2 Oberflächenbehandlung	28
3.2 Untersuchungen der Klebstoffsysteme	29
3.2.1 Probekörperherstellung und Versuchsdurchführung	30
3.2.2 Klebstoffeigenschaften nach Konditionierung	31
3.2.3 Mechanische Eigenschaften des verwendeten Klebstoffs	35
3.2.4 Thermische Analyse	41
4 KENNWERTERMITTLUNG VON KLEBVERBINDUNGEN	44
4.1 Allgemeines	44
4.2 Versuchsprogramm für Klebverbindungen mit metallischen Untergründen	45
4.2.1 Quasistatisch zügige Beanspruchung (Kurzzeitbeanspruchung)	45
4.2.2 Statische Beanspruchung (Langzeitbeanspruchung)	45
4.3 Herstellung der Probekörper für Kurzzeit- und Zeitstandversuche	46
4.4 Versuchsdurchführung	47
4.4.1 Quasistatische Kurzzeitversuche	47
4.4.2 Zeitstandversuche unter Normklima	51
4.4.3 Zeitstandversuche unter hygrothermischen Bedingungen	53

5	ENTWICKLUNG EINES PROBEKÖRPERS FÜR DIE KLEBUNG MIT MINERALISCHEN UNTERGRÜNDE	59
5.1	Allgemeines	59
5.2	Verwendete Baumaterialien	60
5.2.1	Mauerziegel	60
5.2.2	Kalksandsteine	61
5.2.3	Ultrahochfeste Betone	62
5.3	Kenwertermittlung	62
5.3.1	Allgemeines	62
5.3.2	Herkömmliche Untersuchungsmethoden für Klebverbindungen	63
5.4	Probekörper	65
5.4.1	Anforderungen an den Probekörper	65
5.4.2	Probekörperform	66
5.4.3	Eigener Probekörper	68
5.4.4	Randbedingungen bei der Probekörperherstellung	70
5.4.5	Ausführungsvarianten der Probekörperherstellung	71
6	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN KLEBVERBINDUNGEN VON METALLISCHEN WERKSTOFFEN	77
6.1	Kurzzeitversuche	77
6.1.1	Allgemeines	77
6.1.2	Quasistatische Zugversuche unter verschiedenen Umgebungsbedingungen	77
6.1.3	Quasistatische Torsionsversuche unter verschiedenen Umgebungsbedingungen	81
6.1.4	Ergebnisse der Grundversuche	86
6.2	Zeitstandversuche	88
6.2.1	Allgemeines	88
6.2.2	Torsionsversuche unter Normklima	89
6.2.3	Torsionsversuche unter verschiedenen hygrothermischen Bedingungen	90
6.2.4	Zugversuche unter hygrothermischen Bedingungen	95
6.2.5	Verformungsmessungen	98
6.3	Mikroskopische Untersuchung der geklebten Stahlproben	99
7	EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN AN KLEBVERBINDUNGEN VON MAUERSTEINEN UND UHPC	104
7.1	Allgemeines	104
7.2	Randbedingungen der eigenen Versuche	105
7.2.1	Begrenzung des Temperaturbereichs	105
7.2.2	Belastungsgeschwindigkeit	106
7.3	Versuche an Mauerziegel- und Kalksandsteinprobekörpern	107
7.3.1	Grundsätzliche Überlegungen	107
7.3.2	Einfluss der Entnahmestelle	108
7.3.3	Torsionsversuche unter Normklima	114
7.3.4	Versuche nach hygrothermischer Auslagerung	116
7.3.5	Untersuchung zur Eindringtiefe des Klebstoffs	120
7.3.6	Alternative Bestimmung der aufnehmbaren Schubkraft durch die Ermittlung der Oberflächenzugfestigkeit	122

7.4 Versuche mit Ultrahochfestem Beton (UHPC)	123
7.4.1 Einkleben der Probekörper in die Einspannhülsen	123
7.4.2 Oberflächenvorbehandlung der Einspannhülsen	124
7.4.3 Torsionsversuche unter Normklima	126
7.4.4 Zugversuche unter Normklima	129
7.4.5 Versuche nach hygrothermischer Auslagerung	131
7.4.6 Zeitstandversuche unter hygrothermischen Bedingungen	133
8 METHODEN DER ZEITRAFFUNG	136
8.1 Extrapolation der Zeitstandversuche	136
8.2 Herleitung der Extrapolationsgleichung	140
8.2.1 Darstellung der Versuchsergebnisse aus Torsionsversuchen	151
8.2.2 Darstellung der Versuchsergebnisse aus Zugversuchen	155
8.2.3 Auswertung der Extrapolationsparameter	156
8.3 Methode 1 - Hygrothermische Zustandsgleichung für die Funktionen von α und β	158
8.3.1 Beschreibung der Parameter	158
8.3.2 Tendenz-Darstellung aus der Auswertung von $\alpha(\varphi, \vartheta)$ und von $\beta(\varphi, \vartheta)$	160
8.4 Methode 2 - Zeitstanddiagramme zur Bestimmung der Versagenszeit	164
8.4.1 Torsionsversuche	164
8.4.2 Zugversuche	167
8.4.3 Parameterdarstellung	169
8.4.4 Zeitstanddiagramme aus Torsionsversuchen	169
8.4.5 Zeitstanddiagramme aus Zugversuchen	174
9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	178
10 SUMMARY AND PROSPECTS	183
11 LITERATUR	187
12 ANHANG	203