



**Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Applied Life Sciences, Vienna**

Department für Bautechnik und
Naturgefahren
Department of Structural Engineering
and Natural Hazards

Theodor Guggenberger

Einfluss der Zementart auf das Tragverhalten von Befestigungselementen in Beton

Diplomarbeit

1. Betreuer:

o.Univ.Prof. Dipl.Ing. DDr. Konrad BERGMEISTER, MSc.

2. Betreuer:

Dipl.Ing. Ronald MIHALA

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Wien, 2009

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere,

- dass ich diese Diplomarbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfe bedient habe.
- dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.
- dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

(Theodor Guggenberger)

Abstract

Approvals have become very important for the building products industry. The approval process in Europe is defined in standards or guidelines. The most important guideline for fastening technology is the ETAG 001.

The guideline provides very strict regulations for the test setup and for the production of the concrete members. So the type of the used cement is also fixed.

The market situation for cement has changed over the last few years as a result of the higher environmental awareness and the modified regulations such as the adoption of emission trading. These are the reasons why nowadays the specified cement type holds a poor market share in most European countries.

This thesis intends to show the cement-caused influence on the behaviour of anchorages based on the results of a comprehensive literature research.

The results of the experimental studies are the starting-point for an analysis of the effects of other cement types.

The present diploma-thesis ends with an advice for a possible modification of ETAG 001.

Kurzzusammenfassung

Die Befestigungstechnik ist ein Industriezweig, in welchem sich Zulassungen sehr stark durchgesetzt haben, welche aufgrund von Leitlinien oder Normen -in diesem Fall auf Grundlage der ETAG 001- erteilt werden.

Diese „Leitlinie für Metalldübel zur Verankerung in Beton“ schreibt derzeit im Zulassungsverfahren die Verwendung einer bestimmten Zementart für die Herstellung der Prüfkörper vor.

Diese Zementart weist heute aufgrund der geänderten Marktsituation in Folge des gestiegenen Umweltbewusstseins und in Folge der Einführung neuer Bestimmungen wie dem CO₂-Zertifikatehandel zurückgehende Marktanteile auf.

In der Arbeit werden anhand einer umfangreichen Literaturrecherche die Einflüsse der einzelnen Zementbestandteile auf das Tragverhalten von Befestigungselementen herausgearbeitet.

Experimentelle Versuchsergebnisse erlauben daran anschließend die Abschätzung der Auswirkungen einer Substitution der bisher verwendeten Zementart.

Die Arbeit schließt mit einer Empfehlung für eine Abänderung der ETAG 001.

Vorwort

*Dass alle unsere Erkenntnis
mit der Erfahrung anfangt,
daran ist gar kein Zweifel.*

(Immanuel Kant)

Besonderen Dank möchte ich meinem Betreuer Dipl.-Ing. Ronald Mihala aussprechen. Seine Betreuung hat sich am oben stehenden Zitat orientiert, indem er mir die Möglichkeit eröffnete, mich ins Zulassungswesen einzubringen und an den Tätigkeiten der akkreditierten Prüfstelle teilzuhaben. Er hat es verstanden, mir durch immer wieder neue Herausforderungen die eigenen Grenzen aufzuzeigen aber mich bei deren Überwindung auch geführt.

Zu Dank verpflichtet bin ich Prof. DDr. Dipl.-Ing. Konrad Bergmeister Msc, der mir neben der Diplomarbeit auch die Möglichkeit gab, am Institut erste Berufserfahrungen zu sammeln.

Ein herzlicher Dank gilt heute auch meinen Eltern für die fortwährende Unterstützung während meiner gesamten Studienzzeit. Auch meiner Freundin Franca und meinen Geschwistern danke ich, dass sie immer hinter mir gestanden sind. Meiner Mutter und meiner Schwester Agatha danke ich außerdem für das gewissenhafte Korrekturlesen der Arbeit.

Ein freundschaftlicher Dank gebührt meinem Studienkollegen Michael Dellantonio, zusammen haben wir auch die herausfordernden Phasen des Studiums gemeistert.

Danke auch an die Kollegen am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau für die vielen gemeinsamen Stunden bei Projekten, Feiern und Diskussionen. Namentlich nennen möchte ich Dipl.-Ing. Anton Rieder, Dr. Roman Wendner, Dipl.-Ing. Raimund Hilber und Dr. Alfred Strauss sowie Dipl.-Ing. Panagiotis Spyridis, Duro Petricevic und Evelin Kamper - ich habe viel von Euch gelernt!

Mein Weg am Institut begann mit Dr. Simon Hoffmann, der mir Gebiete aufzeigte, die sich am Beginn des Studiums noch außerhalb meines Interessenshorizonts befanden, auch bei ihm möchte ich mich dafür bedanken.

Dank gilt schließlich auch den Firmen „fischer GmbH&Co. KG“ und „Hilti AG“ für die Unterstützung mit Material und für die Denkanstöße; besonders Herrn Dr. Rainer Mallée, Herrn Dr. Fritz Wall, Herrn Dr. Hannes Spieth, Herrn Dr. Ulrich Bourgund und Herrn Dipl.-Ing. Michael Rößle.

Inhalt

Eidesstattliche Erklärung.....	II
Abstract	III
Kurzzusammenfassung.....	IV
Vorwort	V
Inhalt	VI
Teil 1: Einleitung.....	- 1 -
1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit.....	- 1 -
1.2 Gliederung der Arbeit.....	- 2 -
Teil 2: Grundlagen der Befestigungstechnik.....	- 3 -
2.1 Geschichtliche Entwicklung der Befestigungstechnik.....	- 3 -
2.2 Arten und Wirkungsweisen von Befestigungen	- 4 -
2.2.1 Einlegeteile und Kopfbolzen	- 5 -
2.2.2 Nachträgliche Befestigungen im Bohrloch.....	- 5 -
2.2.3 Direktbefestigungen	- 8 -
2.3 Tragverhalten und Versagensarten.....	- 8 -
2.3.1 Verankerungen unter Zuglast	- 8 -
2.3.2 Verankerungen unter Querlasten.....	- 10 -
2.3.3 Verankerungen unter kombinierten Lasten	- 10 -
2.4 Normung und Zulassung.....	- 11 -
2.4.1 ETAG 001	- 12 -
2.4.2 ACI 355.2-04 und AC193.....	- 13 -
2.5 Zulassungsversuche nach ETAG 001	- 14 -
2.5.1 Eignungsversuche	- 14 -
2.5.2 Versuche zur Ermittlung der Anwendungsbedingungen	- 15 -
2.6 Bemessung.....	- 15 -
2.6.1 Zugrundeliegendes Sicherheitskonzept.....	- 15 -
2.6.2 Bemessungsbeispiel	- 17 -
2.7 Zusammenfassung.....	- 18 -
Teil 3: Zement	- 19 -
3.1 Geschichtliche Entwicklung des Zements.....	- 19 -
3.2 Normung und Standardisierung der Zemente	- 22 -
3.3 Zementbestandteile, deren Eigenschaften und Herstellung	- 23 -
3.3.1 Portlandzementklinker (K)	- 23 -
3.3.2 Hüttensand (S).....	- 29 -
3.3.3 Gebrannter Ölschiefer (T).....	- 29 -
3.3.4 Natürliche und künstliche Puzzolane (P,Q), Flugaschen (W,V)	- 30 -
3.3.5 Kalkstein (L,LL)	- 32 -
3.3.6 Nebenbestandteile	- 33 -

3.4	Zementarten.....	- 33 -
3.5	Zementherstellung	- 36 -
3.5.1	Mahlen und Mischen des Zements	- 36 -
3.6	Härtung und Hydratationsreaktionen.....	- 37 -
3.6.1	Zementklinker	- 37 -
3.6.2	Härtung und Hydratationsreaktionen der anderen Zementhauptbestandteile.....	- 41 -
3.6.3	Hydratationswärme und Reaktionsenthalpien.....	- 43 -
3.6.4	Nachhärtung und weiterer zeitlicher Verlauf.....	- 44 -
3.7	Umweltauswirkungen und Energiebedarf der Zementherstellung	- 45 -
3.7.1	Energiebedarf	- 46 -
3.7.2	Emissionen klimarelevanter Gase	- 47 -
3.7.3	Rohstoffverbrauch	- 49 -
3.7.4	Einsparungspotential bei Energieeinsatz, Treibhausgas- emissionen und Rohstoffverbrauch.....	- 49 -
3.7.5	Staub	- 52 -
3.7.6	Abgase und Luftschadstoffe	- 53 -
3.8	Eigenschaften und Verwendung der Zementarten	- 53 -
3.8.1	Überblick.....	- 53 -
3.8.2	Portlandzement.....	- 56 -
3.8.3	Portlandkalksteinzement.....	- 56 -
3.8.4	Portlandhüttenzemente und Hochofenzemente	- 56 -
3.9	Zusammenfassung.....	- 58 -
Teil 4: Parameterstudie - Einflüsse der Zementart auf die Beton- und Befestigungstechnik.....		- 59 -
4.1	Einleitung	- 59 -
4.2	Einfluss der Zementart auf die Druckfestigkeit und die Druckfestigkeitsentwicklung des Betons.....	- 59 -
4.3	Einfluss der Zementart auf die (Bruch-) mechanischen Eigenschaften des Betons	- 61 -
4.4	Einfluss des Zements auf Bohrlocherstellung und Rauigkeit der Bohrlochoberfläche.....	- 63 -
4.5	Einfluss auf das Verhalten von chemischen Verankerungssystemen	- 64 -
4.5.1	Einfluss auf die Bohrlochreinigung.....	- 65 -
4.5.2	Andere Einflüsse auf Verbundanker	- 66 -
4.6	Einfluss der Zementart auf die Hydratation, die Permeabilität, die Porosität und die Dauerhaftigkeit des Betons.....	- 66 -
4.7	Einfluss der Zementart auf die Eigenschaften des Frischbetons	- 68 -
4.8	Andere Einflüsse.....	- 69 -
4.9	Programm für experimentelle Untersuchungen	- 69 -
4.9.1	Versuche mit Betonausbruch	- 70 -

4.9.2	Versuche mit Verbundankern	- 70 -
4.9.3	Anpassung des Versuchsprogramms	- 70 -
4.10	Zusammenfassung	- 71 -
Teil 5:	Experimentelle Untersuchungen - Durchführung	- 72 -
5.1	Einleitung	- 72 -
5.2	Beschreibung der verwendeten Materialien	- 72 -
5.2.1	Betonprüfkörper	- 72 -
5.2.2	Zement	- 73 -
5.2.3	Hinterschnittanker	- 73 -
5.2.4	Verbunddübel	- 74 -
5.3	Beschreibung der verwendeten Geräte	- 75 -
5.3.1	Prüfmaschine IKI-02	- 75 -
5.3.2	Bohrmaschinen und weitere Hilfsmittel	- 76 -
5.4	Versuchsaufbau und Durchführung	- 76 -
5.4.1	Allgemein	- 76 -
5.4.2	Versuche mit Hinterschnittdübeln	- 77 -
5.4.3	Versuche mit Verbundankern	- 78 -
5.4.4	Versuche mit unterschiedlichen Reinigungsstufen	- 79 -
5.5	Betrachtung möglicher Fehler und Messabweichungen	- 80 -
5.5.1	Systematische Fehler	- 80 -
5.5.2	Zufällige Fehler	- 81 -
5.6	Zusammenfassung	- 82 -
Teil 6:	Versuchsergebnisse	- 83 -
6.1	Einleitung	- 83 -
6.2	Grundlagen der Versuchsauswertung	- 83 -
6.3	Nachbearbeitung von Versuchsergebnissen	- 83 -
6.4	Ablehnung von Versuchsergebnissen	- 84 -
6.5	Versuchsergebnisse Hinterschnittanker	- 85 -
6.5.1	Versagensart	- 85 -
6.5.2	Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten	- 85 -
6.5.3	Besonderheiten und Anmerkungen	- 87 -
6.6	Versuchsergebnisse Verbundmörtelsysteme – Reinigung laut Herstellerangaben	- 88 -
6.6.1	Versagensarten	- 88 -
6.6.2	Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten	- 89 -
6.6.3	Besonderheiten und Anmerkungen	- 92 -
6.7	Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem mit „halber“ Reinigung	- 93 -
6.7.1	Versagensart	- 93 -
6.7.2	Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten	- 93 -
6.7.3	Besonderheiten und Anmerkungen	- 95 -

6.8	Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem – optimale Reinigung	- 96 -
6.8.1	Versagensart.....	- 96 -
6.8.2	Bruchlasten und Last-Verschiebung-Verhalten.....	- 96 -
6.8.3	Besonderheiten und Anmerkungen.....	- 98 -
6.9	Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem – keine Reinigung	- 98 -
6.9.1	Versagensart.....	- 98 -
6.9.2	Bruchlasten und Last-Verschiebung-Verhalten.....	- 99 -
6.9.3	Besonderheiten und Anmerkungen.....	- 101 -
6.10	Zusammenfassung.....	- 102 -
Teil 7: Interpretation der Versuchsergebnisse		- 103 -
7.1	Einleitung	- 103 -
7.2	Statistische Grundlagen.....	- 103 -
7.2.1	t-Test für unabhängige Stichproben.....	- 103 -
7.2.2	Kolmogorow-Smirnow Anpassungstest	- 104 -
7.2.3	Einschränkungen und Grenzen der gewählten Verfahren.....	- 105 -
7.3	Interpretation der Ergebnisse der Versuche mit Hinterschnittankern.....	- 106 -
7.3.1	Statistische Parameter „Hinterschnitt“	- 106 -
7.3.2	Hypothesentest	- 107 -
7.3.3	Interpretation	- 107 -
7.4	Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörteltyp „A“ bei Reinigung nach Herstellerangaben.....	- 109 -
7.4.1	Statistische Parameter „Typ A - Herstellerreinigung“	- 109 -
7.4.2	Hypothesentest	- 110 -
7.4.3	Interpretation	- 110 -
7.5	Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörteltyp „B“ bei Reinigung nach Herstellerangaben.....	- 111 -
7.5.1	Statistische Parameter „Typ B Herstellerreinigung“	- 111 -
7.5.2	Hypothesentest	- 112 -
7.5.3	Interpretation	- 112 -
7.6	Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel „Typ B“ bei „halber“ Reinigung.....	- 115 -
7.6.1	Statistische Parameter „Typ B - halbe Reinigung“	- 115 -
7.6.2	Hypothesentest	- 116 -
7.6.3	Interpretation	- 116 -
7.7	Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel „Typ B“ bei optimaler Reinigung	- 118 -
7.7.1	Statistische Parameter „Typ B - optimale Reinigung“	- 118 -
7.7.2	Hypothesentest	- 119 -
7.7.3	Interpretation	- 119 -

7.8	Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel	
	„Typ A - keine Reinigung“	- 123 -
7.8.1	Statistische Parameter „Typ A - keine Reinigung“	- 123 -
7.8.2	Hypothesentest	- 124 -
7.8.3	Interpretation	- 125 -
Teil 8: Zusammenfassung und Ausblick		- 126 -
Teil 9: Verzeichnisse		- 127 -
9.1	Literaturverzeichnis	- 127 -
9.2	Abbildungsverzeichnis	- 133 -
9.3	Tabellenverzeichnis	- 136 -
Teil 10: Anhang		- A:1 -
10.1	Versuchsprotokolle	- A:1 -

TEIL 1: EINLEITUNG

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die Befestigungstechnik ist heute einer jener Zweige der Bauproduktenindustrie, in welchem Zulassungen eine große Rolle spielen. Europäische technische Zulassungen werden auf Grundlage der entsprechenden Normen oder Leitlinien erteilt.

Die Leitlinie für Metalldübel zur Verankerung in Beton sieht im Zulassungsverfahren die Verwendung einer bestimmten Zementart für den Beton vor.

Die Marktsituation für Zement hat sich aufgrund geänderter Anforderungen und aufgrund gestiegenen Umweltbewusstseins geändert.

Die vorgeschriebene Zementart ist in der Produktionsmenge sehr stark rückgängig und stellt in vielen Teilen Europas und der Welt nicht mehr die übliche Zementart dar. Befestigungselemente werden dadurch vielfach nicht in Untergrund jener Zusammensetzung angewendet für welche eine Zulassung erlangt wurde.

Die Arbeit soll nach einem Überblick über die Grundlagen sowohl der Befestigungstechnik als auch der Zementtechnologie mögliche Einflussfaktoren herausarbeiten und die Auswirkungen verschiedener Zementarten auf die Befestigungstechnik überprüfen. Dazu wird anhand der wichtigsten Faktoren ein Prüfprogramm für experimentelle Untersuchungen erstellt und ausgeführt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Bestimmung des Einflusses der Zementart auf das Bruch- und Tragverhalten von Verankerungen in Beton.

Das Ziel der Arbeit ist eine Beurteilung der aktuellen Situation und eine Empfehlung für die zukünftige Vorgehensweise bei der Erteilung von europäischen technischen Zulassungen.

1.2 Gliederung der Arbeit

Im folgenden Teil 2 der Arbeit werden die Grundlagen der Befestigungstechnik erörtert, wobei neben dem prinzipiellen Teil über Wirkungsweisen und Arten von Befestigungselementen besonders die Normung und Zulassung großen Raum einnehmen.

Teil 3 widmet sich dem Zement, wobei zunächst ein kurzer Überblick über die Geschichte und die Anwendungen gegeben wird. Kapitel 3.3 setzt sich mit den Bestandteilen von heute verwendeten Zementen auseinander, wobei auf deren Eigenschaften, deren Herstellung und deren Verwendung in den folgenden Kapiteln eingegangen wird. Besonders sei auf Kapitel 3.7 verwiesen, welches sich mit den Umweltauswirkungen der Zementherstellung befasst.

In Teil 4 der Arbeit werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Zementbestandteile auf die Beton- und Befestigungstechnik in Form einer Parameterstudie untersucht. Dieser Teil stützt sich besonders auf eine umfangreiche Literaturrecherche. Argumente, die aus der Literatur nicht zufriedenstellend herausgearbeitet werden konnten, bilden die Grundlage für Kapitel 4.9, in welchem ein Programm für experimentelle Untersuchungen vorgeschlagen wird.

In Teil 5 wird die Durchführung des in Teil 4 beschriebenen Programms erläutert, wobei Kapitel 5.3 den verwendeten Geräten gewidmet ist und Kapitel 5.4 den Versuchsaufbau und die Durchführung beschreibt. Kapitel 5.5 ist einer Betrachtung der Fehler und Abweichungen in den Messungen gewidmet.

In Teil 6 werden die Versuchsergebnisse vorgestellt, wobei jeweils auch auf die Versagensmechanismen eingegangen wird. Für alle untersuchten Systeme werden außerdem Besonderheiten, die während der Durchführung zu beobachten waren, vermerkt.

Teil 7 der vorliegenden Arbeit umfasst die Interpretation der Versuchsergebnisse und die Beurteilung der Auswirkungen auf die Fragestellungen.

Mit Teil 8 wird die Arbeit abgerundet, indem auf die Fragestellungen zusammenfassend geantwortet wird.

Schließlich sind in Teil 9 die Verzeichnisse und als Anhang in Teil 10 die Versuchsprotokolle zu finden.

TEIL 2: GRUNDLAGEN DER BEFESTIGUNGSTECHNIK

2.1 Geschichtliche Entwicklung der Befestigungstechnik

Die Befestigungstechnik ist ein Teilgebiet der Bautechnik, welches in den letzten 50 Jahren eine stürmische Entwicklung erfahren hat. Durch Errungenschaften in den Materialwissenschaften, der Bohrtechnik sowie neuerdings in der Chemie und durch grundlegende Forschung auf dem Gebiet der Anwendung konnten Erfolge erzielt werden, die das nachträgliche Befestigen von tragenden und nichttragenden Strukturen und Einbauten zu einem unverzichtbaren „*Bindeglied zwischen Konstruktion und Ausbau*“ [1] werden ließen.

Der Anspruch, Dinge an Bauwerken zu befestigen und verschiedene Bauteile miteinander zu verbinden, ist so alt wie die Bautechnik selbst. So können bei einer weiter gefassten Betrachtungsweise auch Kalk und Zement als „*Verbindungsmittel*“ bezeichnet werden [2]. Bei einer spezielleren Betrachtungsweise können die im Mauerwerksbau seit Jahrhunderten üblichen und später auch auf den Betonbau übertragenen Einlegeteile aus Eisen und Holz als Vorgänger der heutigen Befestigungselemente angesehen werden.

Die Befestigungstechnik hat sich von der rein handwerklichen Anwendung entfernt [3] und präsentiert sich heute als eigener, lebendiger Forschungszweig, wo durch grundlegende Forschung das Prozessverständnis immer noch gesteigert und damit weiterhin Fortschritte für die praktische Anwendung erreicht werden können. Die Befestigungstechnik bildet einen Schnittpunkt zwischen verschiedenen Bereichen der Wissenschaft, wie Materialwissenschaft, Chemie, Verarbeitungs- und Prozesstechnik usw.

Eine Disziplin, welche die Befestigungstechnik besonders nachhaltig verändert hat, ist die *Bohrtechnik*. Die Entwicklung leistungsstarker elektrischer Bohrhämmer Mitte des 20. Jahrhunderts kann als Wendepunkt bezeichnet werden und hat der Befestigungstechnik mit den nachträglichen Befestigungen einen zweiten Zweig eröffnet.

2.2 Arten und Wirkungsweisen von Befestigungen

Befestigungen jedweder Art haben gemeinsam, dass sie Lasten in einen Untergrund (in vorliegender Arbeit meist Beton) einleiten. Diese Lasteinleitung beansprucht den Beton mit Zug- und Querlasten (entscheidend ist die *Zugkapazität*), für welche dieser Baustoff normalerweise nur in geringem Maße geeignet ist.

Formel 1: Verhältnis der Zug- zur Druckfestigkeit des Betons. Nach [4]

$$f_{ctm} = 0,30 \times f_{cck}^{\frac{2}{3}} \sim 10\%$$

f_{ctm} ... Mittelwert der Betonzugfestigkeit

f_{cck} ... Charakteristischer Wert der
Würfeldruckfestigkeit des Betons

Die Übertragung der Kräfte kann durch *Formschluss* (Hinterschnitt), *Kraftschluss* (Reibung, Spreizkraft), *Stoffschluss* (Verbund) und Kombinationen aus diesen erfolgen, wobei jedes dieser Prinzipien gewisse Vor- und Nachteile in der Anwendung mit sich bringt.

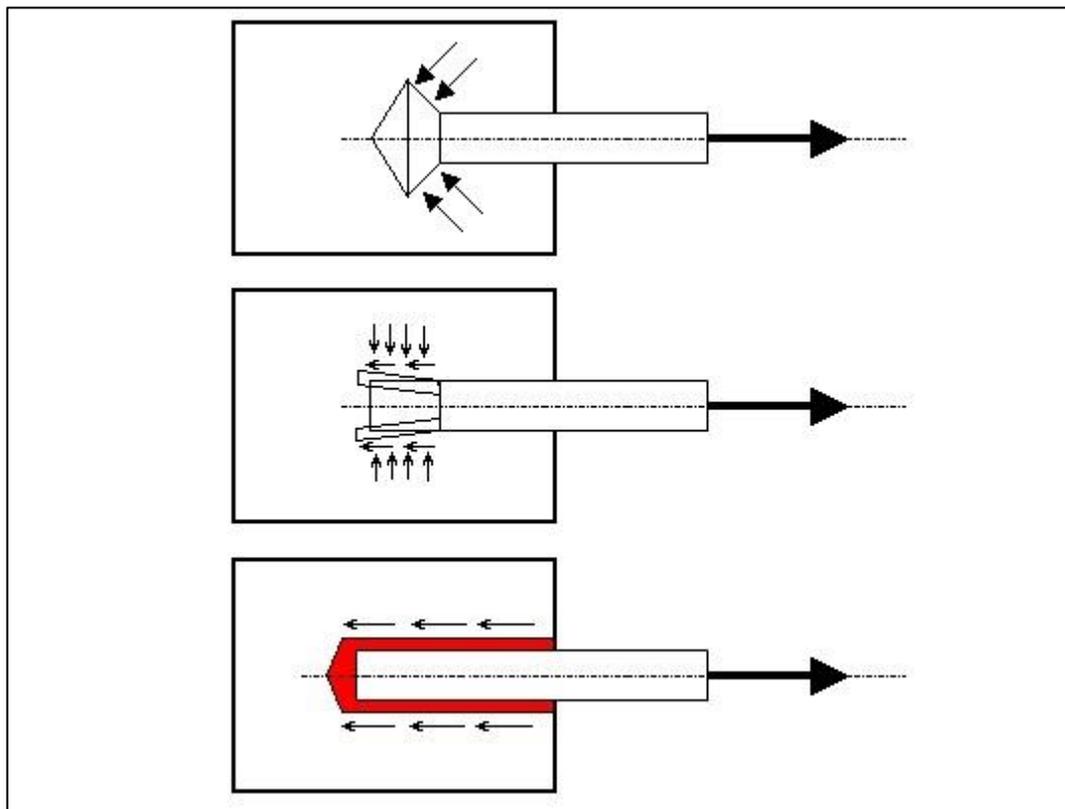


Abbildung 1: Wirkungsweisen von Befestigungen: Formschluss, Kraftschluss, Stoffschluss

2.2.1 Einlegeteile und Kopfbolzen

Einlegeteile bestimmten die Befestigungstechnik im Betonbau bis in die 1960er Jahre [3] und haben z.B. im Fertigteilbau bis heute eine dominierende Stellung. Vorteile der zumeist als Kopfbolzen mit aufgeschweißten Platten, als rückverankerte Ankerschienen oder als Bewehrungsstäbe mit aufgeschweißten Gewindehülsen ausgeführten Einlegeteile sind die bekannte und somit berechenbare und auf die Bewehrungslage abstimmbare Position und die Vorfertigung mit Entfall des Bohrvorganges.

In der Interaktion mit dem Beton und dem Zement sind die Einlegeteile und Kopfbolzen ähnlich wie Bewehrung einzuschätzen und zu behandeln.

2.2.2 Nachträgliche Befestigungen im Bohrloch

a) Spreizanker

Spreizanker werden in zylindrische Bohrlöcher eingesetzt. Durch das Aufbringen eines definierten Drehmoments (drehmomentkontrolliert spreizend) bzw. durch Einschlagen des Ankers oder eines Teils davon (wegkontrolliert spreizend) wird ein spezieller Bestandteil des Ankers gegen den Beton gepresst. Die Kraftübertragung erfolgt durch den Kraftschluss, wobei allerdings bei den meisten Systemen durch Betonverdrängung usw. auch eine durch Formschluss übertragene Komponente auftritt.

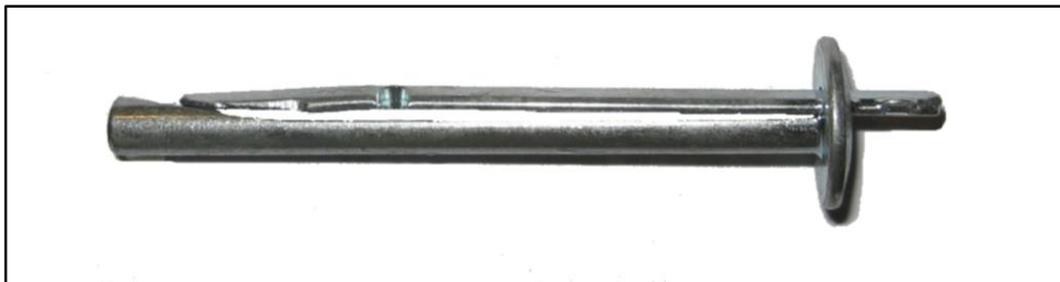


Abbildung 2: Wegkontrolliert spreizender Deckenabhängler HILTI DBZ 6/35

Spreizanker sind sehr beliebt, dementsprechend sind die verschiedenen Ausführungsvarianten¹ und Anwendungsversionen² weit verbreitet und von vielen Herstellern zu beziehen.

¹ Hülsentyp, Bolzentyp, Innengewindetyp

² Vorsteckmontage, Durchsteckmontage

Kraftkontrolliert spreizende Dübel haben prinzipiell die Möglichkeit des Nachspreizens, wodurch sie ein sicheres und auch risstaugliches Verhalten aufweisen.



Abbildung 3: Drehmomentkontrolliert spreizender Ankerbolzen fischer FAZ II M12.

b) Verbundanker

Bei Verbundankern werden Injektions- und Patronensysteme unterschieden, wobei die Kraftübertragung dieselbe bleibt. Diese erfolgt durch vollständige Ausfüllung des Bereichs zwischen Ankerstange und Bohrlochwand mit einem speziellen Mörtel bzw. Harz³, welches über Verzahnung und/oder Klebewirkung die Lastübertragung gewährleistet. Es existieren mit dem Bereich zwischen Ankerstange und Verbundmörtel bzw. -harz und dem Bereich zwischen Mörtel und Beton zwei Grenzflächen, an welchen es zu Versagen kommen kann [5].



Abbildung 4: Verbundanker im Beton

Vorteile von Verbundsystemen sind die im Prinzip frei wählbare Ankerstangen-geometrie⁴, die geringen Spreizkräfte und die Anwendbarkeit auf verschiedenen Untergründen. Als nachteilig wird oft die z.T. aufwändige Bohrlochreinigung empfunden, welche für das Tragverhalten allerdings von enormer Bedeutung ist.

³ Verwendet werden Epoxidharze, Polyester- und Vinylesterharze, zementbasierte Systeme und Hybridsysteme [9]

⁴ Es können handelsübliche Gewindestangen oder Bewehrungsseisen verwendet werden

c) Hinterschnittanker und Betonschrauben

Hinterschnittanker übertragen die in den Untergrund abzuleitenden Kräfte über einen Formschluss, welcher entweder durch spezielle Bohrwerkzeuge, einen speziellen Bohrvorgang oder aber durch den Anker selbst erzeugt wird. Die Herstellung dieses Formschlusses ist auch der größte Nachteil gegenüber anderen Systemen. Betonschrauben haben das Potential diesen Nachteil bei gleichzeitiger Nutzung der Vorteile dieser Systeme auszugleichen; sie sind heute aber noch nicht vollständig ausgereift und derzeit nur ein Nischenprodukt.



Abbildung 5: Betonschraube HECO Multi-Monti-Schraubanker 10/100

Vorteile von Hinterschnittankern sind das gute Verhalten im Riss und die geringen Spreizkräfte, welche kleine Randabstände ermöglichen [6].



Abbildung 6: Hinterschnittanker fischer FZA 18x80 (nach einem Auszugsversuch fotografiert)

d) Kunststoffdübel

Kunststoffdübel bestehen aus einer Dübelhülse aus Kunststoff und einem Spreizelement aus Stahl. Durch das Eintreiben des Spreizelements erfährt der Kunststoffteil eine elastische Stauchung, wodurch Spreizkräfte aktiviert werden [7].

Der erste Kunststoffdübel wurde 1958 von Artur Fischer zum Patent angemeldet. Seitdem haben sich Dübel dieses Typs aufgrund der kostengünstigen Herstellung und der einfachen Anwendung weit verbreitet.

Ein Nachteil von Kunststoffdübeln liegt im viskoelastischen Materialverhalten begründet, welches eine Befestigung von tragenden Elementen über Kopf nach den derzeit geltenden Normen ausschließt.

2.2.3 Direktbefestigungen

Unter Direktbefestigungen werden Anwendungen verstanden, bei denen ein Befestigungselement wie z.B. ein Bolzen entweder in der Art eines Projektils direkt oder über einen Kolben indirekt in den Untergrund eingetrieben wird. Die dazu erforderliche Kraft stammt entweder aus einer Gaspatrone oder aus einer Treibladung.

Diese Art der Befestigung ist besonders auf Metalluntergründen verbreitet und hier auch sehr leistungsfähig, auf Beton kommt sie weniger häufig zum Einsatz, auch wenn durch das Eintreiben des Bolzens in kleine Pilotbohrungen ebenfalls relativ hohe Tragfähigkeiten erreicht werden können. Durch das Anfertigen der Pilotbohrungen verliert die Direktbefestigung auf Beton aber ihren größten Vorteil und wird dementsprechend weniger interessant.

2.3 Tragverhalten und Versagensarten

2.3.1 Verankerungen unter Zuglast

Beanspruchung auf Zug ist die wichtigste Beanspruchungsart. Sofern Stahlversagen ausgeschlossen werden kann und der Dübel seine Funktionsfähigkeit behält, ist bei dieser Lastrichtung die Tragfähigkeit des Untergrunds maßgebend. Anker, welche dem Stand der Technik entsprechen, erzeugen somit meistens einen **Betonausbruch**. Der Betonausbruch bildet sich in Form eines Kegels über die Verankerungstiefe aus, der Winkel beträgt dabei etwa 30-40° [6]. Die Tiefe des Betonausbruchkörpers kann die gesamte *Verankerungslänge* h_{ef} umfassen.



Abbildung 7: Betonausbruchkegel

Die Betonausbruchlast kann über das von FUCHS und ELIGEHAUSEN [8] vorgeschlagene *CC-Verfahren*⁵ relativ einfach berechnet werden:

Formel 2: CC-Formel für Verankerungen in Beton. Aus [8].

$$N_{u,m} = k \cdot \sqrt{\beta_{Wcube,200}} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad [\text{N}]$$

Dabei ist k ein produktabhängiger, aus Versuchen ermittelter Faktor⁶, β_w die Würfel-druckfestigkeit zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung und h_{ef} die Verankerungstiefe des Dübels.

Andere mögliche Versagensarten für Metallanker bei zentrischem Zug sind wie angedeutet [6]:

- Dübelauszug und Konusdurchzug
- Spalten
- „Concrete Blowout“
- Stahlbruch

Spalten und Concrete Blowout sind von der Dicke und den Materialeigenschaften des Betonelements bzw. vom Randabstand beeinflusst, Dübelauszug und Konusdurchzug vom Dübeldesign. Die Höhe der Last, die zum Stahlbruch führt, ist vom Durchmesser und den Materialeigenschaften abhängig, aber ebenso wie die vorher genannten Parameter nicht vom Beton beeinflusst.

Bei Verbundankersystemen kommt zu den genannten Versagensarten noch das **Verbundversagen** hinzu. Dieses kann an beiden Grenzflächen, sowohl zwischen Verbundmörtel und Anker als auch zwischen Verbundmörtel und Beton, auftreten. Auch Mischformen zwischen den beiden Arten des Verbundversagens und Betonversagen können auftreten⁷ [9].



Abbildung 8: Grenzflächenversagen bei Verbunddübeln. Oben Interface Mörtel-Gewindestange, unten Interface Mörtel-Beton

⁵ CC steht für „Concrete Capacity“.

⁶ 13,5 für Metalldübel, 15,5 für Kopfbolzen; im gerissenen Beton mit 0,7 abzumindern.

⁷ Der Übergang von Betonausbruch zu Verbundversagen ist auch von der Verankerungslänge, Reinigungsart usw. abhängig. Vgl. auch [5].

Die Beschaffenheit der Grenzfläche zwischen Beton und Verbundmörtel ist wesentlich von der Reinigungsart, dem Bohrverfahren und auch vom Beton und seinen Inhaltsstoffen beeinflusst, wie in Teil 4 ausführlich dargelegt wird.

Das Last-Verschiebungs-Verhalten bis zum Bruch ist von vielen Parametern wie z.B. den Reibungsverhältnissen im Dübel, den Materialeigenschaften, der Vorspannkraft usw. abhängig und deshalb sehr stark produktabhängig. Zugelassene⁸ Produkte unterliegen gewissen Einschränkungen, was das Last-Verschiebungsverhalten betrifft, so darf beispielsweise kein größerer Lastabfall vor dem Erreichen der Höchstlast auftreten.

2.3.2 Verankerungen unter Querlasten

Unter Querlast weisen alle Typen von Metallankern inklusive der Verbundankersysteme dieselben Versagensmechanismen auf [6]. Es sind dies:

- Stahlbruch
- Betonkantenbruch
- Pry-Out⁹ Versagen

Betonkantenbruch wird nur bei kleinen Randabständen relevant, Pry-Out Versagen zumeist nur bei kurzen Verankerungslängen.

2.3.3 Verankerungen unter kombinierten Lasten

Das Verhalten von Verankerungssystemen bei kombiniertem Lastangriff und bei schräg wirkenden Zuglasten ist stark produktabhängig [6]. Aufgrund von Versuchsergebnissen können Interaktionsdiagramme für die zulässigen Höchstlasten bei kombinierter Beanspruchung erstellt werden.

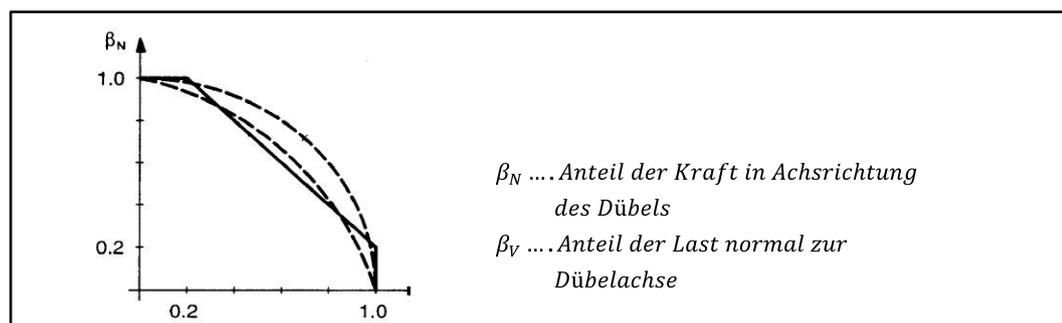


Abbildung 9: Beispiel für ein Interaktionsdiagramm aus ETAG 001 Annex C [10]

⁸ Vgl. Hierzu Kapitel 2.4

⁹ Aushebeln des Betons auf der lastabgewandten Seite

2.4 Normung und Zulassung

Die Befestigungstechnik hat mit ihrem Potential, große Lasten zu verankern und Bauteile nachträglich miteinander zu verbinden, großen Einfluss auf die Standsicherheit und Tragfähigkeit von Bauwerken und Bauwerksteilen.

Die hohen Anforderungen an die Befestigungsmittel sind durch das große Gefahrenpotential bei unsachgemäßer Bemessung und Anwendung der Produkte begründet. Deshalb ist *„ihr Verhalten während der Nutzung für (...) Hersteller, Planungsingenieure, Konstrukteure, Bauunternehmen und spezielle Einbaufirmen“* [11] von Interesse.

Dieses Risiko hat in den verschiedenen Ländern zu unterschiedlich strengen Normen für die Befestigungstechnik geführt. [12; 13] Diese unterschiedlichen Anforderungen und Bedingungen stellten im gemeinsamen europäischen Wirtschaftsraum ein Handelshindernis und somit eine Beschränkung des freien Warenverkehrs dar.

Die Beseitigung dieser Schranken ist eine der wesentlichen Zielsetzungen der „Bauproduktenrichtlinie“ (BPR) welche Produkte erfasst, die [14]:

- im EWR-Raum in den Handel gelangen
- zur Verwendung in Bauwerken bestimmt sind, welche in einem oder mehreren Mitgliedsstaaten gesetzlichen Vorschriften unterworfen sind
- zur Erfüllung wenigstens einer „wesentlichen Anforderung“ (Essential Requirement, ER) an das Bauwerk beitragen¹⁰.

Alle diese Punkte treffen auf Befestigungsmittel zu.

Der europäische Gesetzgeber sieht vor, für Bauprodukte *„so schnell wie möglich harmonisierte Normen zu schaffen“*, um *„den größten Nutzen für einen einheitlichen Binnenmarkt zu verwirklichen, möglichst vielen Herstellern den Zugang zu diesem Markt zu eröffnen, eine größtmögliche Markttransparenz zu gewährleisten und die*

¹⁰ Wesentliche Anforderungen sind [14]:

ER 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit

ER 2: Brandschutz

ER 3: Hygiene, Gesundheit, Umweltschutz

ER 4: Nutzungssicherheit

ER 5: Schallschutz

ER 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz

Voraussetzungen für ein harmonisiertes Gesamtregelwerk im Bauwesen zu schaffen“ [15].

Wenn es „innerhalb eines angemessenen Zeitraumes“ [15] nicht möglich ist, harmonisierte Normen zu erstellen, kann die Kommission das Mandat zur Erstellung von Leitlinien¹¹ an die EOTA¹² vergeben.

Aufgrund dieser Leitlinien werden von unabhängigen, von den jeweiligen Staaten ermächtigten Stellen europäische technische Zulassungen erteilt, welche im gesamten Wirtschaftsraum der Gemeinschaft gültig sind. Die europäische technische Zulassung¹³ bildet eine mögliche Grundlage für die CE-Kennzeichnung.

2.4.1 ETAG 001

Die Leitlinie ETAG 001 für Metalldübel zur Verankerung in Beton war das erste Regelwerk, das unter diesen Rahmenbedingungen ausgearbeitet wurde. Sie ist 1997 in Kraft getreten.

Die ETAG 001 besteht aus sechs Teilen und drei Anhängen [11; 10]:

- Teil 1: Dübel – Allgemeines
Part 1: Anchors in General
- Teil 2: Kraftkontrolliert spreizende Dübel
Part 2: Torque-controlled expansion anchors
- Teil 3: Hinterschnittdübel
Part 3: Undercut anchors
- Teil 4: Wegkontrolliert spreizende Dübel
Part 4: Deformation-controlled expansion anchors
- Teil 5: Verbundanker
Part 5: Bonded anchors
- Teil 6: Dübel als Mehrfachbefestigung nichttragender Systeme
Part 6: Anchors for multiple use for non-structural applications

- Anhang A: Einzelheiten der Versuche
Annex A: Details of tests

¹¹ European Technical Approval Guideline – ETAG

¹² European Organisation for Technical Approvals

¹³ ETA - European Technical Approval

- Anhang B: Versuche zur Ermittlung der zulässigen Anwendungsbedingungen. Detaillierte Angaben
Annex B: Tests for admissible service conditions – Detailed information
- Anhang C: Bemessungsverfahren für Verankerungen
Annex C: Design methods for anchorages

Zusätzlich gibt es noch die Möglichkeit, präzisierende Dokumente zu veröffentlichen. Diese werden als „*Technical Reports*“ bezeichnet.

Die ETAG 001 enthält grundlegende Beschreibungen von Verankerungen, außerdem werden die wichtigsten allgemeinen Anforderungen festgelegt. Aufgrund dieser Anforderungen wird ein Prüfprogramm zur Beurteilung der Eignungsfähigkeit von Dübeln vorgeschlagen, auf welches bei Punkt 2.5 näher eingegangen wird.

Wichtige Anforderungen, die auch im Rahmen dieser Arbeit von Relevanz sind, sind beispielsweise [10; 11]:

- *Dübel dürfen nicht zu empfindlich gegenüber Abweichungen von den Montagevorschriften des Herstellers sein, zu denen es während des Bauvorganges kommen kann.*
- *Dübel dürfen nicht zu empfindlich gegenüber Abweichungen bei den Eigenschaften des Verankerungsgrundes sein.*

2.4.2 ACI 355.2-04 und AC193

Das amerikanische Zulassungsverfahren für „*Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete*“ ist dem europäischen Verfahren prinzipiell sehr ähnlich. Im „Basisdokument“ ACI 355.2-04 [16] und dem präzisierenden Dokument ICC ES AC193 [17] werden Prüfungen und Kriterien für eine Zulassung auf dem US-amerikanischen Markt vorgegeben. Diese Prüfungen sind den in der ETAG 001 formulierten europäischen Abnahmekriterien ebenbürtig. Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings im Vorhandensein von Tests auf seismische Beanspruchung, über deren Einführung in Europa noch diskutiert wird.

Die große Ähnlichkeit zwischen den Zulassungsverfahren in Europa und in den Vereinigten Staaten von Amerika hat sicherlich zur großen internationalen Akzeptanz der Ergebnisse und zur Durchsetzung von Zulassungen weltweit beigetragen.

2.5 Zulassungsversuche nach ETAG 001

Die ETAG 001 sieht ein umfassendes Prüfprogramm zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit vor. Dieses Prüfprogramm ist notwendig, da der Einfluss verschiedener Faktoren „nicht ausreichend bekannt ist, um die Gebrauchseigenschaften von Dübeln für die verschiedenen Belastungsarten auf theoretischem Weg ermitteln zu können“ [11].

Im Prüfprogramm werden Eignungsversuche und Versuche zur Ermittlung von zulässigen Anwendungsbedingungen durchgeführt. Die Tauglichkeit der Dübel ist natürlich sehr stark von verschiedenen Randbedingungen wie Betonfestigkeit, Betonzustand usw. abhängig, weshalb der Hersteller für seinen jeweiligen Dübel aus einer Anzahl von „Optionen¹⁴“ die passende auswählen kann. Option 1 ist dabei die Klasse mit den höchsten Anforderungen an das Produkt, das sichere Verankerung in gerissenem und ungerissenem Beton verschiedener Druckfestigkeitsklassen nachweisen muss.



Abbildung 10: Beispiel für einen Verpackungsaufdruck eines nach ETAG 001 zugelassenen Dübels

2.5.1 Eignungsversuche

Der Betonanker muss bei den Eignungsversuchen den prinzipiellen Nachweis der Funktionstauglichkeit erbringen, wobei verschiedene Einflussfaktoren in ungünstiger Weise miteinander kombiniert werden. Diese ungünstigen Einflussfaktoren sollen *extreme Baustellenbedingungen* simulieren, wie zum Beispiel:

- Rissbreite $\Delta w = 0,5 \text{ mm}$
- Bohreckmaß an der unteren bzw. oberen Toleranzgrenze
- Bewehrungskontakt
- Zyklische Belastung
- Zyklische Rissöffnung

¹⁴ Option 1-6 für gerissenen und ungerissenen, Option 7-12 nur für ungerissenen Beton. Vgl. auch ETAG 001 Part 1 Tabelle 5.3 [10]

Durch diese extreme Kombination wird akzeptiert, dass „es zu einer genau definierten, jedoch begrenzten Reduzierung der Dübel-Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche zur Ermittlung der zulässigen Anwendungsbedingungen kommen kann“ [11]. Diese Reduzierung kann mit der geringen Auftretenswahrscheinlichkeit derartiger Kombinationen begründet werden.

Zusätzlich wird aus den Eignungsversuchen der dübelspezifische Montagesicherheitsfaktor abgeleitet [11].

2.5.2 Versuche zur Ermittlung der zulässigen Anwendungsbedingungen

Die Versuche zur Ermittlung der zulässigen Anwendungsbedingungen dienen in der Leitlinie zur Ableitung von Leistungskennwerten. Die Versuchsdurchführung gestaltet sich derart, dass *normale Baustellenbedingungen* erfasst werden sollen und die Dübel entsprechend der Vorschriften und Anweisungen des Herstellers installiert werden.

Bei der Beurteilung der Versuche zur Ermittlung der zulässigen Anwendungsbedingungen kann eine Reduzierung der Versuchsanzahl dann erfolgen, wenn [11]:

- Daten des Herstellers vorliegen
- Der Dübel und sein Verhalten vorliegenden Erfahrungen entsprechen

2.6 Bemessung

Die ETAG 001 liefert im Annex C [10] mehrere Möglichkeiten für die Bemessung von Verankerungen, die als A, B und C bezeichnet werden. Die Wahl des Bemessungsverfahrens hängt von der Option ab, für welche der Dübel eine Zulassung erhalten hat. Die Bemessungsmethode A ist die umfangreichste, kann aber die gegebenen Aufgabenstellungen aufgrund der Berücksichtigung mehrerer Randbedingungen im zugrundeliegenden Versuchsprogramm genauer und somit zumeist wirtschaftlicher erfüllen. Die Methoden B und C sind vereinfachte Verfahren, die zum Beispiel auf die je nach Lastangriffsrichtung unterschiedlichen Bruchmechanismen keine Rücksicht nehmen.

2.6.1 Zugrundeliegendes Sicherheitskonzept

Dem Bemessungsverfahren von Verankerungen nach ETAG 001 liegt ebenso wie den Bemessungsverfahren des EUROCODES ein Verfahren mit Teilsicherheitsbeiwerten zugrunde. Der Nachweis mit Teilsicherheitsbeiwerten ist ein semipropa-

bilistischer Ansatz¹⁵, der die Variable mit einem Kennwert und die Unsicherheit mit einem Teilsicherheitsbeiwert erfasst [4].

Der Kennwert ist ein charakteristischer Wert, der aus der 95%-Fraktile der Einwirkung bzw. der 5%-Fraktile des Widerstandes abgeleitet wird [4]. Daraus ergibt sich eine gewisse Versagenswahrscheinlichkeit p_f , die in Kauf genommen wird¹⁶.

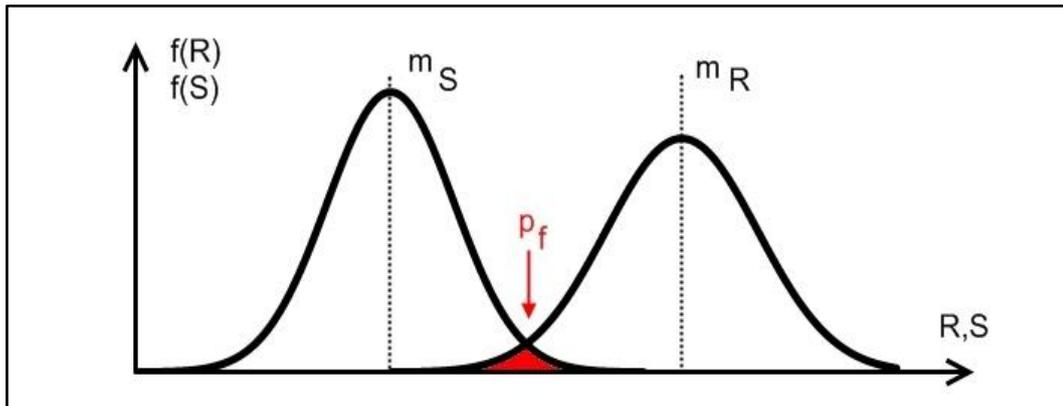


Abbildung 11: Versagenswahrscheinlichkeit

Das Ziel eines Verfahrens mit Teilsicherheitsbeiwerten ist die Erfassung von Unsicherheiten am Ort des Auftretens, beispielsweise auf der Materialseite, der Montage oder bei den jeweiligen Einwirkungen.

Zu erfüllen ist die Bedingung, dass die Summe der Einwirkungen kleiner als der Widerstand bleiben muss:

Formel 3: Sicherheitskonzept

$$S_d \leq R_d$$

Im einfachsten Fall führt dies zu einer Bemessung in folgender Form [10]:

Formel 4: Grundform der Bemessung

$$S_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_Q \cdot Q_k$$

$$R_d = R_k / \gamma_M$$

γ_G stellt den Teilsicherheitsbeiwert ständiger Lasten (G_k), γ_Q den Teilsicherheitsbeiwert nicht ständiger Einwirkungen (Q_k), R_k den charakteristischen Wert des Materialwiderstandes und γ_M den Teilsicherheitsbeiwert für das Material dar.

¹⁵ Ein sogenannter probabilistischer Ansatz der ersten Stufe. [4]

¹⁶ Akzeptiertes Risiko

2.6.2 Bemessungsbeispiel

Im nachfolgenden Abschnitt wird für den Hinterschnittanker „fischer FZA 18x80“ (als Beispiel) eine Bemessung nach ETAG und ein Vergleich mit der bei Punkt 2.3.1 in Formel 2 wiedergegebenen theoretischen Betonausbruchlast durchgeführt.

Erforderliche Nachweise für einen Einzelanker unter zentrischer Zugbeanspruchung ohne Randeinfluss nach [10]:

- Stahlversagen $N_{Sd} \leq N_{Rk,s}/\gamma_{MS}$
- Dübelauszug („Pull-Out failure“) $N_{Sd} \leq N_{Rk,p}/\gamma_{Mp}$
- Betonausbruch („Concrete Cone failure“) $N_{Sd} \leq N_{Rk,c}/\gamma_{Mc}$

Die Beiwerte sind in der relevanten ETA-98/0004 [18] in Tabelle 7 wie folgt angegeben:

Tabelle 1: fischer Zykon Anker FZA 18x80, Beiwerte für das Bemessungsverfahren A. Aus [18].

Charakteristische Werte für die Tragfähigkeit von Bolzenankern bei zentrischem Zug für das Bemessungsverfahren A		
Stahlversagen FZA		
Charakteristische Zugtragfähigkeit	$N_{Rk,s}$	67,4 kN
Teilsicherheitsbeiwert	γ_{MS}	1,5
Herausziehen		
Charakteristische Zugtragfähigkeit (ungerissener Beton)	$N_{Rk,p}$	30 kN
Teilsicherheitsbeiwert	γ_{Mp}	1,5
Betonausbruch und Spalten		
Charakteristische Zugtragfähigkeit (ungerissener Beton)	$N_{Rk,c}$	$=7,2 \cdot \sqrt{f_{ck,cube200}} \cdot h_{ef}^{1,5}$ [N]
Teilsicherheitsbeiwert	γ_{Mc}	1,5

Stahlversagen:

Formel 5: Bemessung auf Stahlversagen

$$N_{Sd} \leq N_{Rk,s}/\gamma_{MS} \quad N_{Sd} \leq 67,4/1,5 \rightarrow N_{Sd} \leq 45 \text{ kN}$$

Herausziehen:

Formel 6: Bemessung auf Pull-Out Versagen

$$N_{Sd} \leq N_{Rk,p}/\gamma_{Mp} \quad N_{Sd} \leq 30/1,5 \rightarrow N_{Sd} \leq 20 \text{ kN}$$

Betonausbruch¹⁷:

Formel 7: Bemessung auf Betonausbruchsversagen

$$N_{Sd} \leq N_{Rk,c} / \gamma_{Mc} \quad N_{Sd} \leq 25,1 / 1,5 \rightarrow N_{Sd} \leq 16,7 \text{ kN}$$

Die maßgebliche Versagensart ist Betonausbruch mit einer zulässigen Bemessungseinwirkung kleiner 16,7 kN.

Der Mittelwert der theoretischen Betonausbruchlast, berechnet nach dem CC-Verfahren [8], ergibt sich für den betrachteten Anker wie folgt:

Formel 8: Berechnung des Mittelwerts der Betonausbruchlast

$$N_{u,m} = k \cdot \sqrt{f_{ck,cube200}} \cdot h_{ef}^{1,5} = 13,5 \cdot \sqrt{23,75} \cdot 80^{1,5} = 47,1 \text{ kN}$$

2.7 Zusammenfassung

Dieser Teil der Arbeit gibt einen Überblick über den Stand der Technik im Bereich der nachträglichen Befestigungen. Die verschiedenen Arten der Wirkungsweise und der Krafteinleitung in den Untergrund werden anhand von Beispielen erläutert.

Ein Teil des Kapitels widmet sich den Zulassungs- und Bemessungsvorschriften von Bauteilen zur Verankerung in Beton und geht dabei auch auf die zugrundeliegenden (Sicherheits-) Konzepte ein. Anhand eines einfachen Beispiels wird die Bemessung von Verankerungen in der Praxis aufgezeigt und ein Vergleich der zulässigen Bemessungslast mit dem Mittelwert der rechnerischen Bruchlast dargestellt. Dadurch wird eine Abschätzung über das Sicherheitsniveau ermöglicht.

¹⁷ Für eine angenommene Betonwürfeldruckfestigkeit $f_{c,cube,150}$ von 25 MPa entspricht $f_{c,cube,200}$ von 23,75 MPa.

TEIL 3: ZEMENT

3.1 Geschichtliche Entwicklung des Zements

Zement ist nach der heutigen Definition ein hydraulisch¹⁸ erhärtender Baustoff aus fein gemahlenden, nichtmetallisch-anorganischen Bestandteilen, der hauptsächlich als Bindemittel für Beton und Mörtel eingesetzt wird [19]. Der so hergestellte künstliche Stein eröffnet der Bautechnik seit dem Altertum enorme Möglichkeiten, die durch die Kombination mit Stahl noch erweitert wurden. Die enorme Bedeutung des Zements als Industrieprodukt wurde allerdings mit erheblichen Umweltauswirkungen erkauft.



Abbildung 12: Beton im Wasserbau. Römischer Kanal bei Bonn [20], Donaukraftwerk Freudenau.

Bereits seit dem 3. vorchristlichen Jahrhundert war römischen Baumeistern ein Stoffgemisch („opus caementium“) aus natürlichen Materialien wie Sand, Puzzolanen und Ziegelmehl sowie gelöschtem Kalk bekannt, das auch unter Wasser aushärtete („weder die Wellen noch die Kraft des Wassers können es trennen“) und hohe Festigkeiten erreichte. Diese herausragenden Eigenschaften der in der Gegend um den Vesuv abgebauten Puzzolane, die erst die beeindruckenden, bis heute erhaltenen Bauten jener Zeit ermöglichten, wurden auf die „Feuer, die tief unter der Erde lodern“ zurückgeführt [21].

¹⁸ D.h. durch die Reaktion mit Wasser, auch unter Luftabschluss.



Abbildung 13: Kuppel des Pantheon in Rom. Leichtbeton in Kassettenschalbauweise, um 120 n.Chr. [22]

Im 18. Jahrhundert entdeckte der Engländer John Smeaton (1724-1792), dass ein aus einem Ton-Kalkgemisch gebranntes Bindemittel auch ohne die Zugabe von Puzzolanen hydraulisch erhärtet. James Parker, ebenfalls Engländer, verbesserte die Rezeptur und ließ sie sich 1796 unter dem Namen „Romancement“ patentieren. Damit wurde auch zum ersten Mal nur das Bindemittel als „Zement“ bezeichnet und nicht der künstliche Stein, der durch die Mischung mit Zuschlagstoffen hergestellt wurde.

Diese „Zemente“ waren alle noch nicht bis zur Sinterung ($>1400\text{ °C}$) gebrannt worden und sind somit am ehesten mit den heute üblichen hydraulischen Kalken vergleichbar. Auch die in den folgenden Jahren durch den Franzosen Louis J. Vicat, den Engländer Edgar Dobbs und den Deutschen J.F. John fortgeschriebene Entwicklung erreichte diesen Schritt noch nicht. Im Jahr 1824 ließ sich Joseph Aspdin ein ebenfalls dem Romancement ähnliches Bindemittel unter dem Namen „Portland-Cement“ patentieren. Seinem Sohn William (1815-1864) gelang es, einen verbesserten Baustoff auf den Markt zu bringen. Sein Zement hatte durch das Erreichen der Sintertemperatur während des Brennvorganges wesentlich bessere Eigenschaften, was einen Nachfrageboom in ganz Europa auslöste. In zunehmendem Maß wurden Zementwerke errichtet und die Entwicklung vorangetrieben, wobei besonders der Deutsche Wilhelm Michaëlis (1840-1911) durch chemische und praktische Untersuchungen und die Veröffentlichung eines Buches zu dem Thema Maßstäbe setzte.

Im gleichen Zeitalter wurden auch die (latent) hydraulischen Eigenschaften der *granulierten, basischen Hochofenschlacke* entdeckt und 1880 erstmals zur Produktion eines Kalkschlackenzements verwendet. Seit 1901 bzw. 1907 waren Zemente mit Hüttensandanteilen als „*Eisenportlandzement*“ bzw. „*Hochofenzement*“ bekannt und erhältlich, wenn auch ein Kampf um die Einhaltung eines so genannten „*Reinheitsgebotes*“ die Fabrikanten spaltete und bis in neuere Zeit vorhandene Vorurteile gegen Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen bewirkte.

Die Herstellung von Zement war aufgrund der erforderlichen Verarbeitungsschritte (Brechen, Brennen, Mahlen) erst nach der Entwicklung entsprechender Maschinen möglich und die Verbesserung der Maschinen erlaubte somit folglich auch über lange Zeit eine Verbesserung der Zementqualität. Andererseits war die Herstellung eines leistungsfähigen Bindemittels für die Bautechnik eine wichtige Randbedingung für die voranschreitende Industrialisierung, sodass beide Entwicklungen Hand in Hand vonstatten gingen.

Die Bedeutung des Zements für die Industrie wird auch aufgrund der Tatsache ersichtlich, dass bereits im Jahr 1876 ein Ausschuss aus Vertretern des „*Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement*“ zusammentrat, um „*Normen zur einheitlichen Lieferung und Prüfung von Portland-Cement*“ auszuarbeiten. Für die beginnende Normung waren die von Michaëlis in seinem Standardwerk „*Die hydraulischen Mörtel*“ festgelegten Kriterien von herausragender Bedeutung. Auch in Frankreich (1885), England und den USA (jeweils 1904) wurde die Zementproduktion sehr früh Normen und Mindeststandards unterworfen, was charakteristisch für ein bedeutendes Industrieprodukt ist [23; 19].

Im 20. Jahrhundert konzentrierte sich die Forschung in der Zementherstellung neben der immer noch fortschreitenden Leistungssteigerung vor allem auf die Optimierung des Energieeinsatzes beim Trocknen und Mahlen und auf die Verminderung von Emissionen. Dass bereits 1895 in einer „*Technischen Anleitung*“ Staubfiltersysteme für die Zementindustrie in Deutschland vorgeschrieben wurden, beweist einerseits das große Verschmutzungspotential der Zementherstellung, andererseits aber auch die Vorreiterrolle der Zementindustrie auf diesem Gebiet [23].

3.2 Normung und Standardisierung der Zemente

Die Normung der Bindemittel im Allgemeinen und der Zemente im Speziellen orientiert sich sehr stark an den jeweiligen Anforderungen an die Bauwerke und an die Verfügbarkeit von Rohstoffen und Ausgangsmaterialien [23]. Da zudem noch traditionelle Vorlieben einfließen, hat beinahe jedes Land seine eigenen Zementnormen [23]. Bereits daraus wird ersichtlich, dass „Zement“ kein absolut homogener Stoff, sondern vielmehr ein nach lokalen Bedürfnissen abgestimmtes Stoffgemisch ist.

Ein großer Schritt in Hinblick auf die Schaffung von einheitlichen Standards war die Einführung der Europäischen Norm für Normalzemente EN 197-1:2000, die mit 1.4.2001 in Kraft getreten ist. Diese Norm vereinigt alle 27 auf dem europäischen Markt relevanten¹⁹ Zementarten und hatte dadurch einen langen Entstehungsprozess zu überwinden. Der Prozess der Normung wurde mit einer Initiative der europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) im Jahre 1969 eingeleitet [24]. Seit dem Jahr 1973 [24] war zuerst an der zugrundeliegenden Norm über vereinheitlichte Test- und Prüfverfahren für Zemente (EN 196) und an der eigentlichen Norm gearbeitet worden [23].

Die EN 197-1 definiert „Zement“, hier „CEM-Zement“ genannt, als *„(...) hydraulisches Bindemittel, das heißt ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der, mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt, (...) ausreichend lange verarbeitbar sein muss und ein bestimmtes Festigkeitsniveau erreicht. (...)“* Weiters wird festgelegt: *„die hydraulische Erhärtung (der Zemente) beruht vorwiegend auf der Hydratation von Calciumsilikaten (...)“*.

In diese Definition fallen die in den beteiligten Staaten als „traditionell und bewährt“ [24] bezeichneten Zementsorten, insgesamt 27 unterschiedliche europäische Normalzemente, die entsprechend den Rahmenbedingungen der Bauproduktenrichtlinie jeweils als entsprechende Produkte geführt sind und deren Anwendungsgebiete nicht Bestandteil der Norm sind. Sehr wohl Teil der Norm sind die Zusammensetzung und die Einhaltung bestimmter Grenzwerte. Produkte, welche die festgelegten Anforderungen nicht erfüllen, werden somit nicht als „Zement“ im Sinne der Norm bezeichnet [25].

¹⁹ „traditionellen und bewährten“ [24]

Aus der großen Anzahl an Zementen ergibt sich auch eine Variation in den Eigenschaften, wodurch nicht alle in der EN197-1 geführten Zemente auch für alle Anwendungsfälle geeignet sind. Die Eignung wird in der „für das Einsatzgebiet maßgeblichen Anwendungsnorm, z.B. der Betonnorm“ [25] geregelt²⁰.

Diese Unterscheidung ist aufgrund der rechtlichen Situation von Bedeutung, denn die Anwendung von Produkten betrifft den Schutz von Mensch und Umwelt, welcher in die Zuständigkeit der einzelnen Mitgliedsstaaten fällt. Die Vergleichbarkeit von Produkten und der Abbau von Handelshemmnissen wiederum fällt unter Wirtschafts- und somit Gemeinschaftsrecht [25].

Der Aufbau der EN 197-1²¹ orientiert sich an der Zusammensetzung der Zemente und gibt somit eine sinnvoll erscheinende Gliederung vor. Auch die für die Befestigungstechnik relevanten Normen beziehen sich sämtlich auf diese Norm, weshalb in der vorliegenden Arbeit bis auf wenige Hinweise nicht von diesem Rahmen abgewichen wird.

3.3 Zementbestandteile, deren Eigenschaften und Herstellung

3.3.1 Portlandzementklinker (K)

Portlandzementklinker ist ein hydraulisches Material, welches durch Sinterung einer genau festgelegten Rohstoffmischung produziert wird [24].

a) Rohstoffe für die Klinkerherstellung

Zementklinker besteht im Wesentlichen aus Trikalziumsilikat (Alit), Dikalziumsilikat (Belit), Kalziumaluminatferrit und Trikalziumaluminat sowie freiem Kalziumoxid und Magnesiumoxid (Periklas). Diese so genannte „Phasenzusammensetzung“ findet ihre Entsprechung in den chemischen Bestandteilen der Ausgangsstoffe, die demzufolge hauptsächlich Gesteine mit hohen Gehalten an Kalziumoxid und Siliziumdioxid (neben geringen Anteilen an Eisen- und Aluminiumoxiden) bilden. Gesteine, die diese Zusammensetzung aufweisen, sind im Wesentlichen Kalksteine bzw. Kreide und Ton. Kalksteine und Kreide bestehen aus Kalziumcarbonat, in den

²⁰ Diese Regelung entstand auch aus der Angst gewisser Länder heraus, die ein Abfallen des Qualitätsniveaus befürchteten [25].

²¹ Diese Europäische Zementnorm findet weltweit kein Gegenstück. Einzig die US-amerikanischen ASTM-Normen haben vergleichbare Bedeutung.

Tonminerale befinden sich Quarz (Siliziumdioxid) und die Eisen- und Aluminiumoxide [23].

In der modernen Zementindustrie gelangen aber nicht nur natürliche Rohstoffe zum Einsatz, sondern auch als „sekundäre Rohstoffe“ bezeichnete Neben- und Abfallprodukte anderer Industriezweige wie Kalkschlämme, Flugaschen usw., die je nach erforderlicher Klinkerzusammensetzung die natürliche Rohstoffchemie ergänzen.

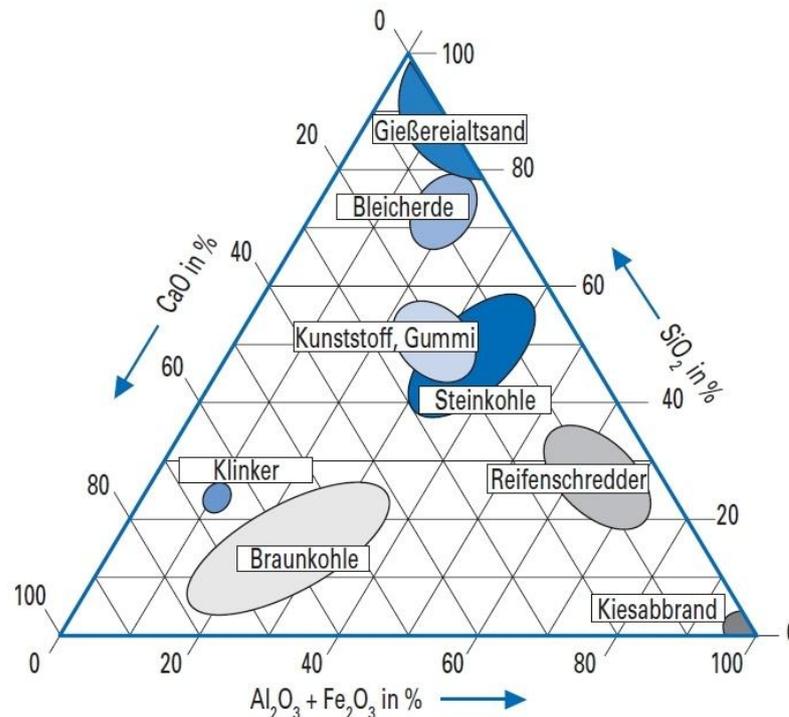


Abbildung 14: Dreistoffdiagramm von Klinker und ausgewählten Sekundärrohstoffen. Aus [19].

Neben den Rohstoffen für die Phasenbildung sind die Energieträger die wichtigsten Rohstoffe in der Zementherstellung, wobei der Übergang allerdings fließend ist, da Aschen und Rückstände der eingesetzten Brennstoffe immer in die Klinkerphasen gelangen²² [23]. Der Energieeinsatz ist aufgrund der hohen Zieltemperatur²³ enorm und stellt einen der größten Kostenfaktoren²⁴ sowie einen großen Anteil an den Umweltbeeinträchtigungen durch die Zementindustrie dar. Zum Einsatz gelangen überwiegend fossile Rohstoffe wie Braun- und Steinkohle, Petrolkoks, Heizöle und Gase. Wie auch bei den mineralischen Rohstoffen wird jedoch durch den Einsatz von

²² Bestes Beispiel hierfür ist der Einsatz von Ölschiefer, der gleichzeitig als mineralischer Rohstoff und als Energieträger fungiert. (Vgl. Punkt 3.3.3)

²³ Brennraumtemperatur typischerweise $>2000^\circ\text{C}$

²⁴ Der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung lag 1999 in Deutschland bei 26%, was einen der höchsten Werte aller Industriezweige darstellt [32].

„Sekundärrohstoffen“ wie Altreifen und Altöl sowie anderen brennbaren Abfällen (Kunststoff, Holz, Tiermehle und -fette [26; 27]) versucht, den Aufwand zu minimieren.

b) Klinkerbrennprozess

Nach dem Gewinnen der Rohstoffe -im meist unmittelbar dem Zementwerk angegliederten Steinbruch- werden diese gebrochen, homogenisiert und gemahlen. Bereits während des Mahlvorgangs wird das Rohmaterial (meist durch Abwärme aus dem Brennprozess) getrocknet, wobei zum Erreichen der gewünschten Klinkerqualität laufend Proben entnommen und je nach Analyseergebnis die Mischungszusammensetzung der Komponenten eingestellt werden kann. Anschließend wird das Rohmehl dem Ofen zugeführt.

Die Brennöfen neuerer Bauart in der Zementindustrie sind *Drehofenanlagen mit Zyklonvorwärmer und Kalzinator*. Das bedeutet, dass das ofenfertige Rohmehl zunächst im Abgasstrom des Ofens schwebend stufenweise erhitzt und der enthaltene Kalkstein bereits teilweise entsäuert wird, bevor jenes weiter in den *Kalzinator* gelangt. Hier erfolgt ebenfalls durch die heißen Ofenabgase und die Zugabe von Brennstoffen²⁵ die Umwandlung von Kalziumkarbonat in Calciumoxid. Dieser endotherme chemische Prozess erfordert einen Großteil des Energieaufwands in der Zementherstellung. Im nächsten Schritt, den das Rohmehl im tatsächlichen Eintrag in den Drehrohröfen erfährt, wird bei Gastemperaturen bis zu 2000 °C das Material auf ca. 1450 °C erhitzt. Diese Temperatur ermöglicht einen *Sinterprozess*, der für die Eigenschaften des Zements von herausragender Bedeutung ist.

Den letzten Schritt im Brennprozess bildet die Kühlung des Klinkers, der anschließend zwischengelagert wird. Die Kühlung des Klinkers und hier besonders die Geschwindigkeit des Abkühlvorgangs hat wesentlichen Einfluss auf die Kristallisation der Schmelze. Die Größe und Struktur der entstehenden kristallinen Klinkerphasen bewirken wiederum Veränderungen in dem für nachgeschaltete Mahlprozesse erforderlichen Energieaufwand, aber auch im Wasseranspruch und bei anderen die Verarbeitung des fertigen Produkts betreffenden Parametern.

²⁵ Aufgrund des für die Entsäuerung erforderlichen Temperaturbereichs von 830 bis 950°C können hier auch heizwertärmere Sekundärrohstoffe eingesetzt werden.

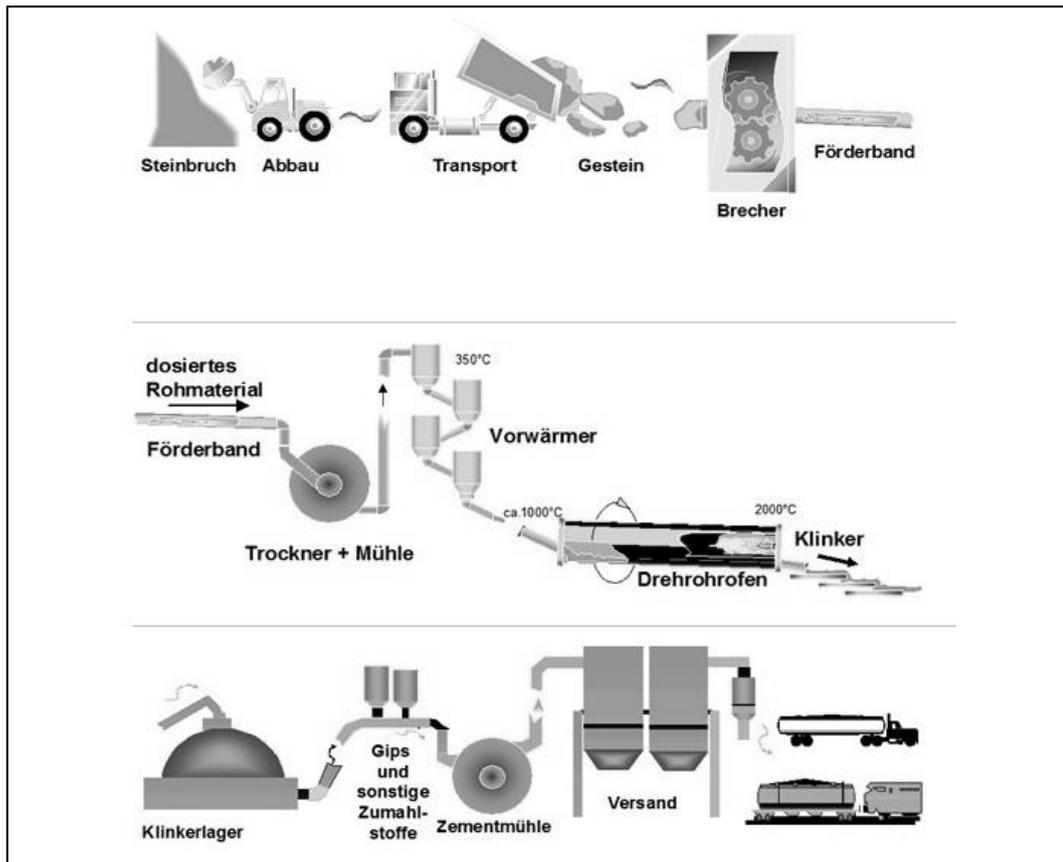


Abbildung 15: Ablauf der Zementherstellung aus Portlandzementklinker. Aus [28].

c) Reaktionen während des Brennprozesses

Die Reaktionen während des Brennprozesses sind sowohl von der Rohmaterialzusammensetzung als auch von der Art der Beschickung und Beheizung des Ofens abhängig und können deshalb weder einem Ort noch einer Zeit genau zugeordnet werden.

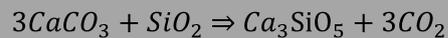
Trotzdem kann die Prozessfolge anhand der chemischen Reaktionen ungefähr festgelegt werden²⁶. Als erstes erfolgt die Verdampfung des Wassers im Rohmehl, das je nach Betriebsart bis zu 45% der Rohmehlmasse ausmachen kann. Beim heute üblichen Prozess mit Zyklonvorwärmung liegt der Wasseranteil bei nicht mehr als 1% der Masse [19; 29].

Die nächste Reaktion ist das Austreiben des adsorptiv gebundenen Wassers im Bereich von 250°C und die Zerstörung des Kristallgitters der Tonminerale (Entfernen der OH- Ionen) bei 500°C bis 700°C. In diesem Temperaturfenster,

²⁶ Vgl. Abbildung 16

genauer bei 550°C bis 600°C, beginnt auch die Entsäuerung des Kalksteins, d.h. Kalziumkarbonat wird unter der Abgabe von Kohlendioxid (CO₂) in Kalziumoxid (CaO) umgewandelt. Das freie Kalziumoxid reagiert unmittelbar mit anderen vorhandenen Reaktionspartnern (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃), sodass der Gehalt an freiem CaO bis zum Erreichen einer Temperatur von 800°C mit ca. 2% nahezu unverändert bleibt. Darüber steigen dann mit dem Partialdruck des entweichenden Kohlendioxids auch die Umwandlungsgeschwindigkeit und der Gehalt an freiem CaO.

Formel 9: Einfachste Reaktion im Klinkerbrennprozess. Nach [30].



Ein entscheidender Schritt im Brennprozess ist die Bildung der Klinkerschmelze, die bei einer Temperatur von etwa 1300°C beginnt, aber sehr stark von der Zusammensetzung des Rohmaterials abhängig ist. Festzuhalten ist, dass nicht das gesamte sich im Ofen befindliche Material in die Schmelzphase übergeht. Bei der Sintertemperatur (die gleichzeitig die Maximaltemperatur im Ofen darstellt) liegen je nach Prozessablauf und Phasenzusammensetzung etwa 15- 25 % der Masse als Schmelze mit teigiger Konsistenz vor. Der Schmelzvorgang begünstigt die Reaktion von Dikalziumsilikat und Kalziumoxid zu Trikalziumsilikat²⁷.

Die Bildung von Trikalziumsilikat erfolgt auch in der Sinterzone. Da das thermodynamische Gleichgewicht hier einen Höhepunkt an Gehalt von Trikalziumsilikat aufweist, muss nun eine möglichst schnelle und effiziente Abkühlung gewährleistet werden, um die Resorption von Trikalziumsilikat durch die Schmelze zu unterbinden. Bei einer schnellen Abkühlung kristallisiert die Schmelze weitgehend unabhängig von den bereits bestehenden festen Phasen, wodurch ein thermodynamisches Ungleichgewicht in der chemischen Phasenzusammensetzung fixiert wird.

Die Geschwindigkeit der Abkühlungsphase bestimmt auch die Art der Kristallisation der Kalziumaluminatferrit und Trikalziumaluminatphasen und ist daher auch für nachgeschaltete Prozesse interessant. So kann eine schnelle Abkühlung sowohl die erforderliche Mahlenergie als auch den Wasseranspruch des fertigen Produkts verringern. Andererseits kann eine schockartige Abkühlung des Klinkers z.B. durch Wasser die Eigenschaften auch wesentlich verschlechtern, da durch die amorphe

²⁷ Trikalziumsilikat (3CaO·SiO₂) ist die kalkreichste Verbindung der Kieselsäure und für die Festigkeit des Zements maßgeblich.

Erstarrung (d.h. als Glas) der Schmelzenphasen die wichtige Kristallisationsphase fast vollständig unterbunden wird.

Ähnliche Vorteile²⁸, wie sie durch eine optimale Steuerung der Klinkerkühlung sowie durch generelle Optimierungen im Prozessablauf erreicht werden und sich in den Produkteigenschaften²⁹ widerspiegeln, können auch durch die Beimischung von Zusatzstoffen in den Brennprozess erreicht werden. LOCHER [23] nennt zum Beispiel Fluoride, geringe Anteile an Phosphaten und bestimmte Schwermetalle wie Zink, Kupfer, Chrom, Titan und Molybdän.

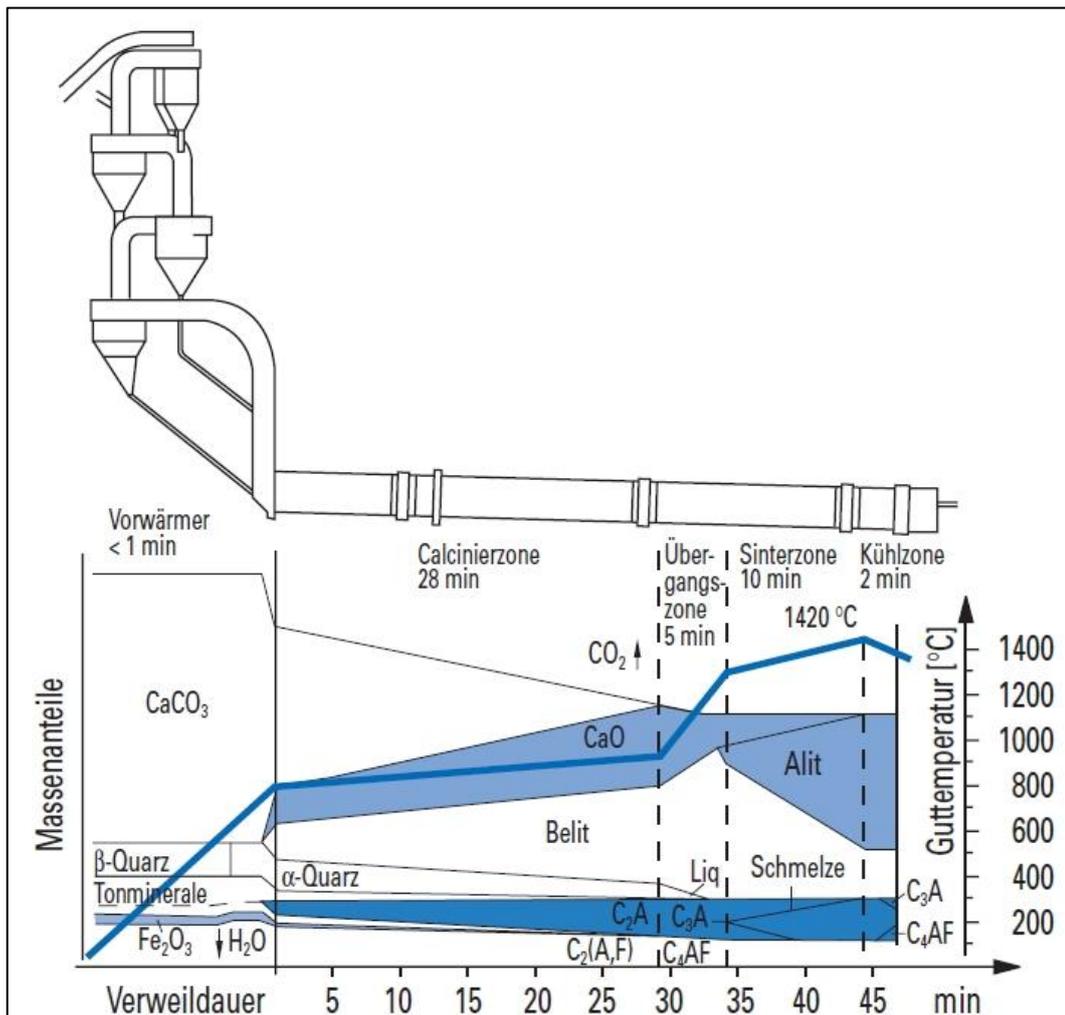


Abbildung 16: Temperaturzonen, Verweildauer und Mineralneubildungen in einer Drehofenanlage mit Zyklonvorwärmer. Aus [19].

²⁸ Verringerung des Energieaufwands, Förderung von bestimmten Klinkerphasen, Erleichterungen beim Mahlvorgang

²⁹ Zum Beispiel, was Härungsverlauf und Wasseranspruch betrifft.

3.3.2 Hüttensand (S)

Als Hüttensand wird die granuliert (d.h. durch schnelle Kühlung glasig erstarrte) Hochofenschlacke verstanden. Sie ist somit ein Nebenprodukt der Stahlerzeugung und besteht im Wesentlichen aus Gangart und Resten (Asche) der Koksverbrennung.

Hüttensand erhärtet latent-hydraulisch, d.h. in Anwesenheit eines Anregers (z.B. Gips) in „technisch nutzbarer Zeit“ [19]; der Mechanismus des „Anregens“ der hydraulischen Eigenschaften ist noch nicht vollständig geklärt [23].

Der Erhärtungsverlauf ist flacher als bei den Klinkerphasen, das bedeutet die 2-, 7- und 28-Tage-Festigkeit ist geringer. Die Nachhärtung nach dem 28. Tag kann allerdings wesentlich höher sein als bei Portlandzement. Das macht Hüttensand bzw. Zemente mit Hüttensandanteil beispielsweise für massive Bauteile besonders interessant, da auch die Wärmeabgabekurve flacher verläuft. Die Nutzung der Nachhärtung macht allerdings auch eine längere Nachbehandlungsdauer erforderlich [31].

Die Fähigkeit zur Erhärtung des Hüttensands wird auf seinen Glasanteil zurückgeführt, dessen Anteil nach LOCHER [23] zwischen 90 und 95% der Masse beträgt und dessen chemische Zusammensetzung³⁰ in den Normen festgelegt wird.

Hüttensand ist z.B. in 29% aller in Deutschland hergestellten Zemente enthalten [19] und stellt somit einen wichtigen Hauptbestandteil dar. Nahezu 70% [19], nach anderen Quellen rund 80% [32] der Hochofenschlacken werden auf diesem Weg in der Zementindustrie weiterverarbeitet³¹.

3.3.3 Gebrannter Ölschiefer (T)

Ölschiefer ist ein Sedimentgestein mit hohem Gehalt an organischen Stoffen, die dem Gestein bituminöse Eigenschaften verleihen. Nach LOCHER [23] beträgt der Anteil an organischem Material 5% bis 65%.

Ölschiefer wird beim Klinkerbrennprozess als fossiler Energieträger und als Tonkomponente eingesetzt. Aber auch eine getrennte Verbrennung zur Energiegewinnung ist üblich, in diesem Fall kommen die Rückstände, die je nach geologischem Ursprung puzzolanische und/oder hydraulische Eigenschaften besitzen, für die Zementherstellung in Frage. Durch diese Eigenschaften und durch

³⁰ z.B. das Verhältnis von CaO, MgO und SiO₂

³¹ Entspricht für 2000 einem Volumen von 4,3 Millionen Tonnen in Deutschland [32].

die teilweise enthaltenen Anteile an Anhydrit kann gebrannter Ölschiefer als gut geeigneter Rohstoff für die Zementherstellung betrachtet werden, der geeignet ist, den Energieaufwand in der Zementproduktion zu verringern [33].

Den Anteil, den Ölschieferzemente in Europa aber auch weltweit am Markt einnehmen, kann man als gering bezeichnen.

3.3.4 Natürliche und künstliche Puzzolane (P,Q), Flugaschen (W,V)

Natürliche Puzzolane sind nach VDZ [19] „*Gesteinsmehle vulkanischen Ursprungs, Trass oder Sedimentgesteine mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung*“, die mit „*gelöstem Kalziumhydroxid reagieren und erhärtungsfähige Verbindungen bilden*“. Außer den vulkanischen Gesteinen gibt es noch einen anderen erwähnenswerten - da genutzten - Bildungsvorgang für natürliche Puzzolane nämlich den durch Meteoriteneinschlag entstandenen „bayrischen Trass“ im Nördlinger Ries.

Die Abgrenzung zu den künstlichen bzw. den modifizierten Puzzolanen bildet die Verarbeitungstemperatur. Natürliche Puzzolane bedürfen nur einer Trocknung bei maximal 150 °C [23], während die synthetischen Puzzolane erst durch höheren, künstlichen Temperatureinfluss ihre gewünschten Eigenschaften erhalten.

Die nutzbaren Eigenschaften der Puzzolane beruhen auf ihrem Gehalt an reaktivem Siliziumdioxid, das mit freiem Kalziumoxid zu Kalziumsilikathydrat reagiert. Da der Gehalt an Kalziumoxid in den Puzzolanen typischerweise gering ist und sich im einstelligen Prozentbereich bewegt [23], muss dieses aus dem Zementklinker stammen. In früherer Zeit³² wurde diese Reaktion durch die Mischung mit gelöschtem Kalk erreicht.

Puzzolane, für die in der Literatur teilweise auch der Begriff „Hydraulite“ verwendet wird, weisen wie vorher bemerkt eine lange baugeschichtliche Vergangenheit auf. Heute ist ihre Anwendung auf Gebiete mit großen, wirtschaftlich nutzbaren Vorkommen beschränkt, wie diese z.B. in Italien und Griechenland auftreten. Auch im nordamerikanischen [29] und asiatischen [34] Raum werden Puzzolanzemente in nennenswertem Umfang erzeugt.

Künstliche Puzzolane, die auch als synthetische oder modifizierte Puzzolane bezeichnet werden, beziehen ihre Reaktionsfähigkeit wie erwähnt aus der

³² Die Puzzolane weisen ja eine sehr lange Nutzungsgeschichte auf und bilden eine Grundlage der Zementherstellung (vgl. Punkt 3.1 Seite - 19 -)

Einwirkung hoher Temperaturen, wodurch das notwendige reaktive Siliziumdioxid gebildet wird. Die einzige heute technisch und wirtschaftlich sinnvoll nutzbare Möglichkeit in diesem Zusammenhang stellt die Nutzung von Flugasche aus Abgasreinigungsanlagen von Kohlefeuerungsanlagen dar.

Allerdings wird die meiste auf diese Weise anfallende Flugasche in der Betonherstellung verwendet³³, wodurch z.B. die Beständigkeit des Betons durch die Ausbildung eines dichteren Gefüges erhöht werden kann [35]. In die Zementherstellung direkt fließt weltweit nur ein verschwindend geringer Teil der genutzten Flugaschen.

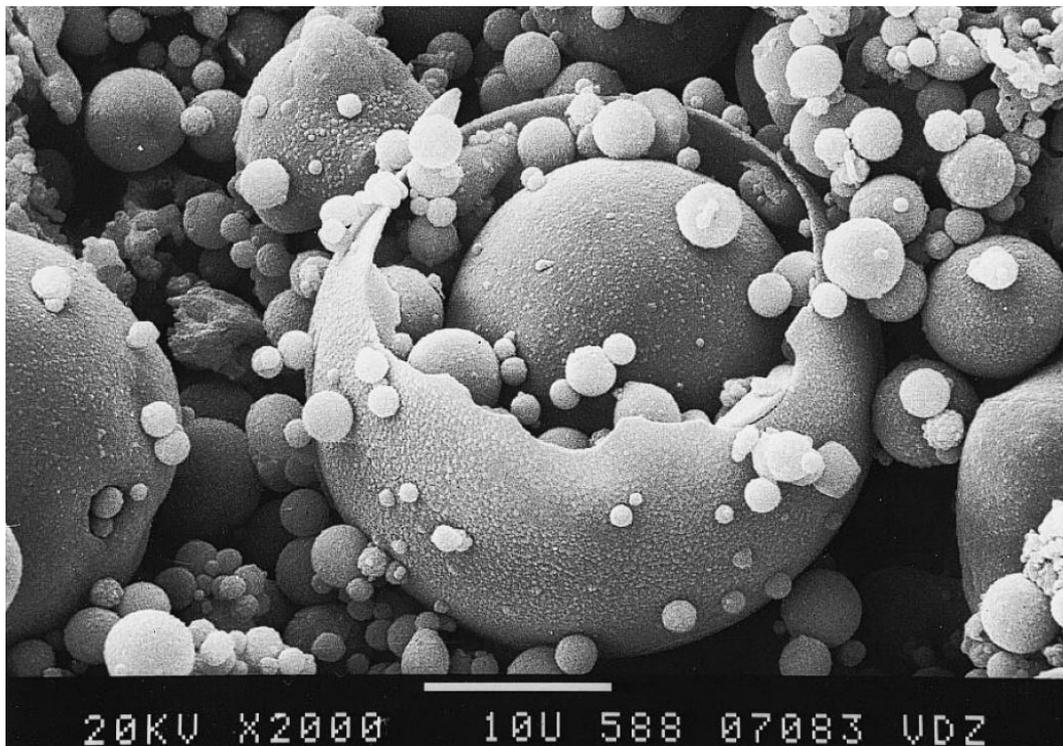


Abbildung 17: ESEM-Aufnahme von Steinkohlenflugaschepartikeln. Aus [19].

Flugaschen werden in der EN197-1 trotz ihrer puzzolanischen Eigenschaften in gesonderten Abschnitten behandelt und als Bestandteile geführt. Dabei bezeichnet (V) die kieselsäurereiche, (W) die kalkreiche Flugasche.

Ebenfalls eher theoretische Verwendungsmöglichkeiten ergeben sich für Silikastaub (D) und die Rückstände aus der Reishülsenverbrennung in Asien [23].

³³ Etwa als Mehlkornanteil

3.3.5 Kalkstein (L,LL)

Kalkstein ist nicht nur ein wichtiger Grundstoff für die Zementklinkerherstellung (vgl. Punkt 3.3.1 a), sondern wird auch dem Zement direkt zugegeben. Es wird Kalkstein mit einem maximalen Gehalt an organischer Substanz (TOC) von 0,50% (L) bzw. 0,20% (LL) unterschieden.

Der Kalkstein erhärtet nicht hydraulisch und er verändert die im Zementstein ablaufenden Reaktionen nur unwesentlich³⁴; allenfalls wird die Ettringitbildung gefördert [23; 36].

Der Grund, warum dennoch Kalkstein dem Zement zugegeben wird und Kalkstein enthaltende Kompositzemente in vielen Ländern einen großen Teil des Marktes abdecken³⁵, liegt in der Verbesserung der physikalischen Eigenschaften des Zements. Da der Zementklinker aufgrund seiner großen Härte einen hohen Energieaufwand beim Mahlen³⁶ erfordert und die Korngrößenverteilungskurve somit relativ flach beginnt, kann der verhältnismäßig weiche bzw. einfacher zu mahlende Kalkstein diese Lücke auffüllen.

Die Vorteile, die daraus resultieren, sind zum Ersten der geringere Wasseranspruch aufgrund der geringeren Abstände zwischen den Partikeln und zum Zweiten die bessere und dichtere Gefügeausbildung aufgrund der besseren Korngrößenverteilung. Kalksteinfüller im Zement wird von BONAVETTI et al. [37] in diesem Zusammenhang als „*ultrafeiner Zuschlag*“ betrachtet, der nicht unbedingt dem Zement zugerechnet werden muss und somit den „*effektiven w/z-Wert*“ erhöhen kann. Auch die Bereitstellung von Kristallisationskeimen wird verschiedentlich als positiv für die Zementhydratation angesehen [37]. Diese Effekte tragen indirekt zum Entstehen eines dichten und vollständig hydratisierten Zementsteingefüges und somit auch zur Festigkeitsentwicklung bei.

Das Fehlen von hydraulisch reaktionsfähiger Masse in Kompositzementen mit Kalksteinanteil, wird häufig mit der feineren Vermahlung dieser Zemente ausgeglichen, um die geforderten Festigkeiten nach 28 Tagen und besonders nach 2 und 7 Tagen durch schnellere Reaktion erreichen zu können.

Ein weiterer Grund für den Zusatz von Kalkstein zum Zement ist die Verminderung des spezifischen Energieeinsatzes, worauf weiter unten noch eingegangen wird.

³⁴ Vgl. Punkt 3.6.2b Seite - 42 -

³⁵ Siehe Punkt 3.8

³⁶ Vgl. Punkt 3.5.1

3.3.6 Nebenbestandteile

Bis zu 5% der Zementmasse dürfen so genannte „Nebenbestandteile“ ausmachen. Es sind dies hauptsächlich:

a) Kalziiumsulfate

Kalziumsulfat in der Form von Gips³⁷ bzw. Anhydrit³⁸ wird dem Zement in geringen Mengen zugegeben, um das Abbindeverhalten zu steuern. Gips als Sulfatträger kann die Phasenbildung verändern und damit den Abbindezeitpunkt und den Erhärtungsverlauf steuern.

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, verschiedene Modifikationen des Kalziiumsulfats gleichzeitig zu verwenden, um eine Optimierung hinsichtlich des Wasseranspruchs (Minimum) und der Zeit bis zum Erstarrungsbeginn (Maximum) zu erreichen [19].

b) Andere Nebenbestandteile

In den aktuellen Zementnormen ist auch die Zumahlung von weiteren Stoffen erlaubt, dabei sind zum einen „*Stoffe aus dem Werksbetrieb*“ [24] wie Rohmehl, und zum anderen Additive (Zusätze) wie Mahlhilfsmittel, Fließverbesserer und Farbpigmente zu unterscheiden.

In jedem Fall dürfen Zusatzmittel einen sehr geringen Massenanteil nicht überschreiten und die Eigenschaften sowohl des Zements als auch des Betons nicht verändern. Hierbei ist die mögliche Beeinträchtigung des Korrosionsschutzes der Bewehrung besonders hervorgehoben [19; 24].

3.4 Zementarten

Die 27 Produkte der Gruppe der Normalzemente werden in fünf Hauptzementarten und drei Festigkeitsklassen mit jeweils 2 Frühfestigkeiten unterteilt:

³⁷ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

³⁸ CaSO_4

Tabelle 2: Zementarten [24]

Hauptzementarten nach EN197-1	
Kürzel	Bezeichnung
CEM I	Portlandzement
CEM II	Portlandkompositzement
CEM III	Hochofenzement
CEM IV	Puzzolanzement
CEM V	Kompositzement

Tabelle 3: Zementfestigkeitsklassen [24]

Festigkeitsklassen der Normalzemente nach EN197-1					
Festigkeitsklasse	Druckfestigkeit [MPa]				Erstarrungsbeginn [min]
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit		
	2 Tage	7 Tage	28 Tage		
32,5 N	-	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≥ 75
32,5 R	≥ 10,0	-			
42,5 N	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5	≥ 60
42,5 R	≥ 20,0	-			
52,5 N	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-	≥ 45
52,5 R	≥ 30,0	-			

Außer dem Portlandzement CEM I, der außer den Nebenbestandteilen ($\leq 5\%$ der Masse) nur aus Portlandzementklinker hergestellt wird, bestehen alle anderen Hauptzementarten aus mehreren Hauptbestandteilen. Die Zementarten werden dem Gehalt anderer Hauptbestandteile entsprechend mit dem Buchstaben „A“ für geringeren Anteil bzw. dem Buchstaben „B“ für höheren Anteil und dem nur für Hochofenzement CEM III vergebenen Buchstaben „C“ für Zemente ohne bzw. mit nur geringem Anteil an Portlandzementklinker gekennzeichnet. Die weiteren Buchstaben kennzeichnen den verwendeten Hauptbestandteil.

Neben diesen „Normalzementarten“ gibt es noch eine Vielzahl von „Zementen mit besonderen Eigenschaften“ wie Schnell- und Spritzbetonzemente, Zemente mit geringer Hydratationswärmeentwicklung, sulfatbeständige Zemente, Quellzemente, Tiefbohrzement u.v.m. - teilweise mit, teilweise ohne bauaufsichtliche Zulassung. Es würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, auf diese näher einzugehen.

Tabelle 4: Zusammensetzung der Normzemente [24]

Normalzemente und ihre Zusammensetzung nach EN197-1				
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen	Hauptbestandteile (neben Klinker)	Anteil [M.-%]
CEM I	Portlandzement	CEM I	-	0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttsand (S)	6...20
		CEM II/B-S		21...35
	Portlandsilikastaubzement	CEM II/A-D	Silikastaub (D)	6...10
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	Natürliches Puzzolan (P)	6...20
				21...35
		CEM II/B-P	Künstliches Puzzolan (Q)	6...20
				21...35
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	Kieselsäurereiche Flugasche (V)	6...20
				21...35
		CEM II/B-V	Kalkreiche Flugasche (W)	6...20
				21...35
	Portlandschieferzement	CEM II/A-T	Gebrannter Schiefer (T)	6...20
		CEM II/B-T		21...35
	Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	Kalkstein (L)	6...20
				21...35
		CEM II/A-LL	Kalkstein (LL)	6...20
21...35				
Portlandkompositzement	CEM II/A-M	Alle Hauptbestand- teile sind möglich (S,D,P,Q,V,W,T,L,LL)	6...20	
	CEM II/B-M		21...35	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttsand (S)	36...65
		CEM III/B		66...80
		CEM III/C		81...95
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A	Puzzolane (P,Q)	11...35
		CEM IV/B		36...55
CEM V	Kompositzement	CEM V/A	Hüttsand (S) und Puzzolane (P,Q,V)	18...30
		CEM V/B		31...50

3.5 Zementherstellung

Die Gewinnung der Rohstoffe und deren Aufbereitung ist für den Klinker besonders aufwändig und wurde bei Punkt 3.3.1 auf Seite - 23 - bereits eingehend dargelegt. Auch die anderen Hauptbestandteile und die Nebenbestandteile von Zement müssen gewonnen und einer Aufbereitung unterworfen werden. Auf diese wird aber im Folgenden nicht weiter eingegangen.

3.5.1 Mahlen und Mischen des Zements

Zementklinker hat eine hohe, natürlichem Basalt ähnliche Festigkeit. Das Mahlen des Klinkers zu Zement erfordert deshalb nicht nur geeignete Mühlentechnologie, sondern auch entsprechenden Energieaufwand. Heute werden meist Kugelmühlen und/oder Gutbett-Walzenmühlen bzw. Vertikal-Wälzmühlen eingesetzt, die je nach Beschaffenheit des Mahlgutes ihre jeweiligen Vorteile ausspielen können [19; 23].



Abbildung 18: Kugelmühle (aus [38])

Die Mahlfeinheit, die durch die spezifische Oberfläche³⁹ beschrieben wird, wirkt sich in vielen Punkten - wie z.B. der Geschwindigkeit der Abbindereaktionen oder der Festigkeitsentwicklung [38] - auf die Eigenschaften des Zements aus.

Meistens werden alle Haupt- und Nebenbestandteile der jeweiligen Zementsorte zusammen gemahlen, da hiermit eine gute Homogenisierung der Materialien erreicht wird. Da die Korngrößenverteilung der Bestandteile bei diesem Verfahren aber nicht getrennt einstellbar ist, muss bei Zementen mit Bestandteilen von sehr unterschiedlicher Mahlbarkeit unter Umständen auch auf getrennte Mahlverfahren und anschließende Mischung zurückgegriffen werden [23].

Nach dem Mahlen ist der Prozess der Zementherstellung abgeschlossen und das Produkt zur Auslieferung bzw. Anwendung bereit.

3.6 Härtung und Hydratationsreaktionen

3.6.1 Zementklinker

Das Zementpulver reagiert beim Anmachen mit dem Zugabewasser, wodurch wasserhaltige Verbindungen entstehen. Diese Verbindungen werden als Hydratphasen bezeichnet und bewirken das Erstarren und Erhärten des Zementleims zu Zementstein [19].

Beim Portlandzement beruhen die Härtungsreaktionen überwiegend auf den während des Brennprozesses (Punkt 3.3.1b Seite - 25 -) gebildeten Klinkerphasen (Trikalziumsilikat C_3S , Dikalziumsilikat C_2S , Trikalziumaluminat C_3A und Kalziumaluminatferrit $C_2(A,F)$), welche in nach Betrag und Geschwindigkeit unterschiedlichem Ausmaß zur Festigkeitsentwicklung beitragen [19].

Kalziumsilikathydrate (CSH):

Aus den silikatischen Klinkerphasen entstehen die wichtigsten Hydratphasen (C_3S , C_2S) in einem vom Wasserzementwert abhängigen Verhältnis. Die CSH-Phasen bilden einen *faserförmigen Belag* [19] auf den Zementkörnern, der auch als *CSH-Gel* bezeichnet wird. Kalziumsilikathydrate sind die wichtigsten Phasen im Zementgel, sie tragen den wesentlichen Teil der nutzbaren Härtungsreaktionen.

³⁹ Ermittelt nach dem Blaineverfahren, typische Werte für Zement liegen bei 3000-5000 cm^2/g [38].

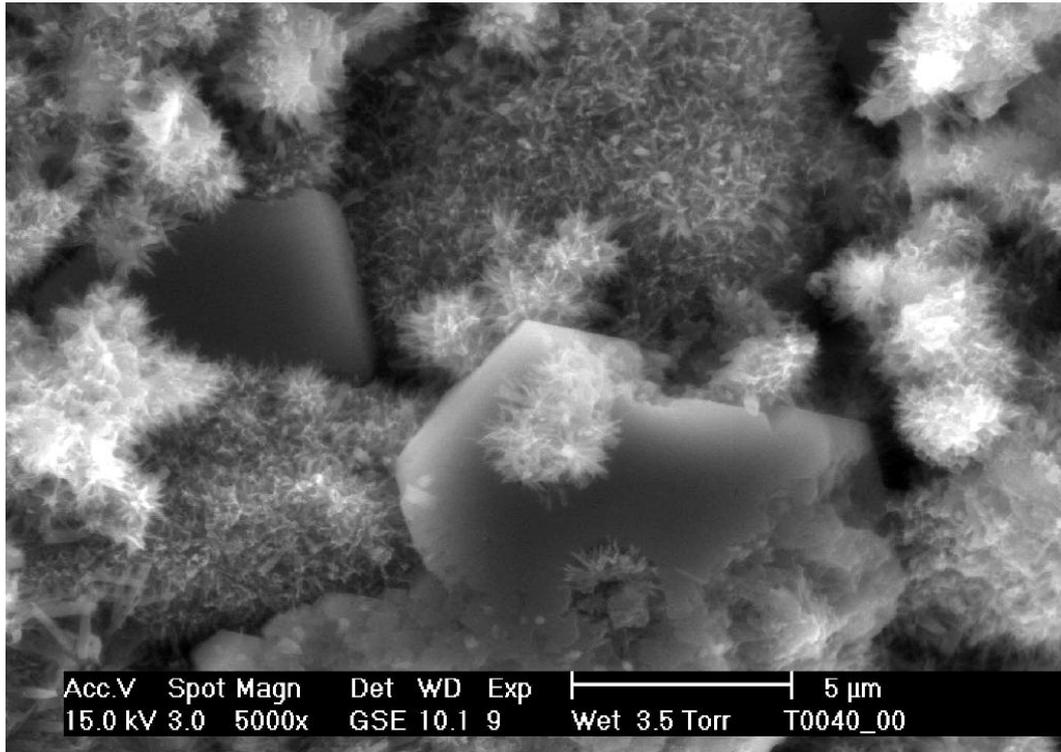


Abbildung 19: CSH-Phase nach 24 Stunden Reaktionszeit. ESEM- Aufnahme aus [19].

Kalziumhydroxid (CH):

Kalziumhydroxid fällt bei der Bildung der Kalziumsilikathydrate aus der Porenlösung aus [19], es bildet dabei Kristalle mit hexagonaler Plättchenstruktur [23].

Kalziumaluminathydrate (CA) und Kalziumaluminatferrithydrate:

Kalziumaluminatverbindungen existieren in großer Anzahl. Welche der zum Teil nur metastabilen [23] Hydrate gebildet werden, ist vom vorhandenen Kalk- und Sulfatangebot (Bildung von Kalziumaluminatsulfathydraten) ebenso abhängig wie von der zur Verfügung stehenden Feuchtigkeit [19]. Die wichtigste Erscheinungsform ist die als Ettringit bezeichnete Trikalziumaluminatsulfathydratphase⁴⁰ C_3A , die für die Verarbeitung und Erstarrung den begrenzenden Faktor darstellt.

⁴⁰ Verkürzt oft auch als *Trisulfat* bezeichnet.

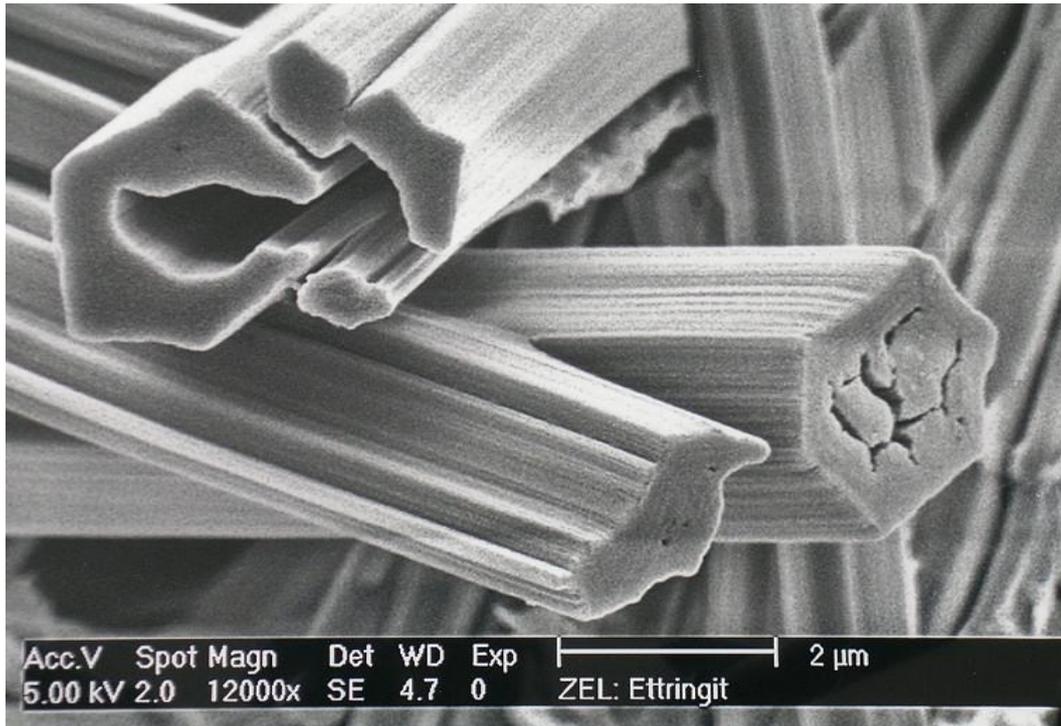


Abbildung 20: Trikalziumaluminatsulfathydrat (Ettringit). ESEM-Aufnahme aus [39].

Bei den Kalziumaluminatferriten, deren Reaktionen nach [19] ähnlich verlaufen, ist ein Teil der Aluminiumoxide durch Eisenoxide ersetzt.

a) Hydratationsablauf der Klinkerphasen

Der Zementleim durchschreitet nach dem Anmachen mit Wasser drei Stufen der Verfestigung⁴¹ und vier Phasen des Hydratationsablaufs. Es sind diese (nach [19]):

- die nach dem Kontakt mit Wasser einsetzende intensive **Prä-Induktions-Periode**, wo Kalziumsulfate und Alkalisulfate in Lösung gehen, mit Trikalziumaluminat reagieren und kurze Ettringitkristalle bilden. Diese Ettringitkristalle sitzen auf der Oberfläche der Zementpartikel und verhindern somit vorerst ein weiteres Fortschreiten der Reaktionen. Eine Ruheperiode (Induktionsperiode) setzt ein.
- Während der Induktionsperiode ist die Konsistenz des Zementleims noch wenig verändert und die Beweglichkeit der Zementpartikel zueinander nur in geringem Maße behindert, wodurch auch eine Verarbeitung des Betons nach wie vor möglich bleibt.

⁴¹ In der Norm EN 196-3 [77] nach dem Zeitpunkt als *Ansteifen*, *Erstarren* und *Erhärten* definiert

Mit der Bildung von feinen Kalziumsilikathydratkristallen nach etwa ein bis drei Stunden beginnt die Phase des Erstarrens.

- Die dritte Periode, auch „Beschleunigungsperiode“ genannt [19], bewirkt zwischen vier und 24 Stunden nach dem Anmachen eine intensive Hydratation der Klinkerphasen zu Klinkerhydratphasen und bewirkt die Ausbildung eines Grundgerüsts durch das Wachstum der Kristalle. Die CSH-Faser- und Blattstrukturen und die Ettringitkristalle überbrücken die Zwischenräume zwischen den Zementpartikeln und führen so in die Phase des Erhärtens über.

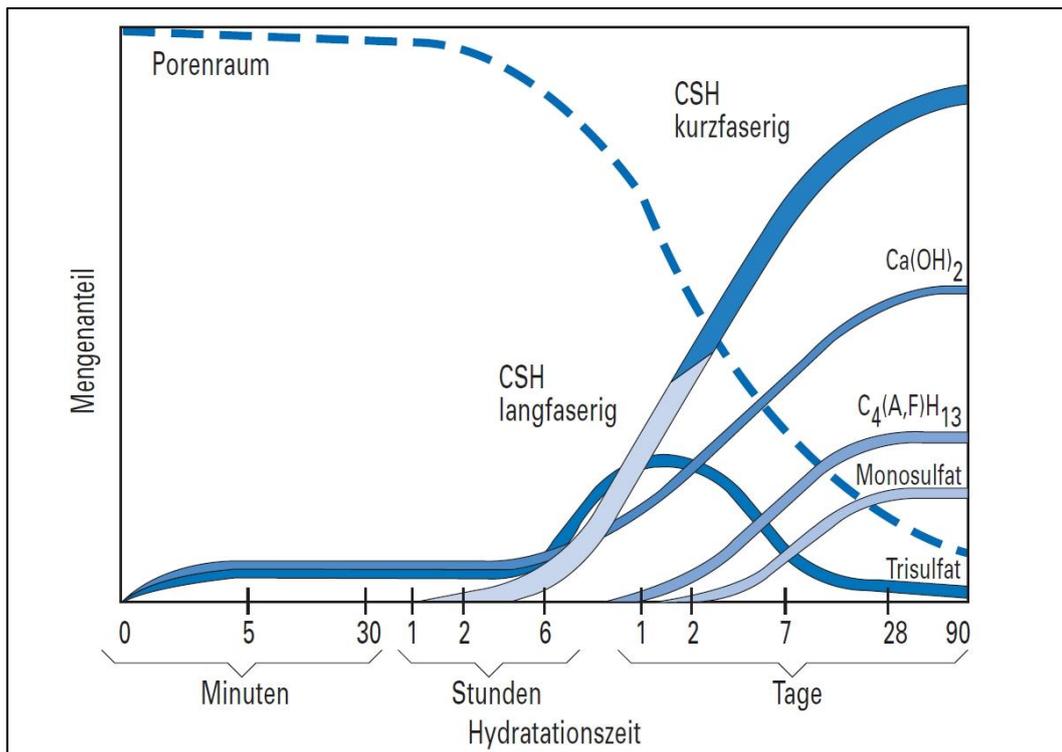


Abbildung 21: Bildung der Hydratphasen bei der Hydratation von Portlandzementklinker mit optimal angepasstem Sulfatträger. Aus [19].

Von immenser Wichtigkeit für einen optimalen Abbindeverlauf sind die Steuerung des Sulfatträgers⁴² [19], die passende Umgebungs- und Verarbeitungstemperatur [4] sowie Art und Dauer des Mischvorganges u.v.a.m.

Bei optimalen Randbedingungen ist zur vollständigen Reaktion ungefähr 40% der Zementmenge an Wasser erforderlich, was einen optimalen w/z Wert von 0,4 ergibt.

⁴² Bewährt hat sich Halbhydrat, ein Gemisch aus Gips und Anhydrit (wasserfreier Gips).

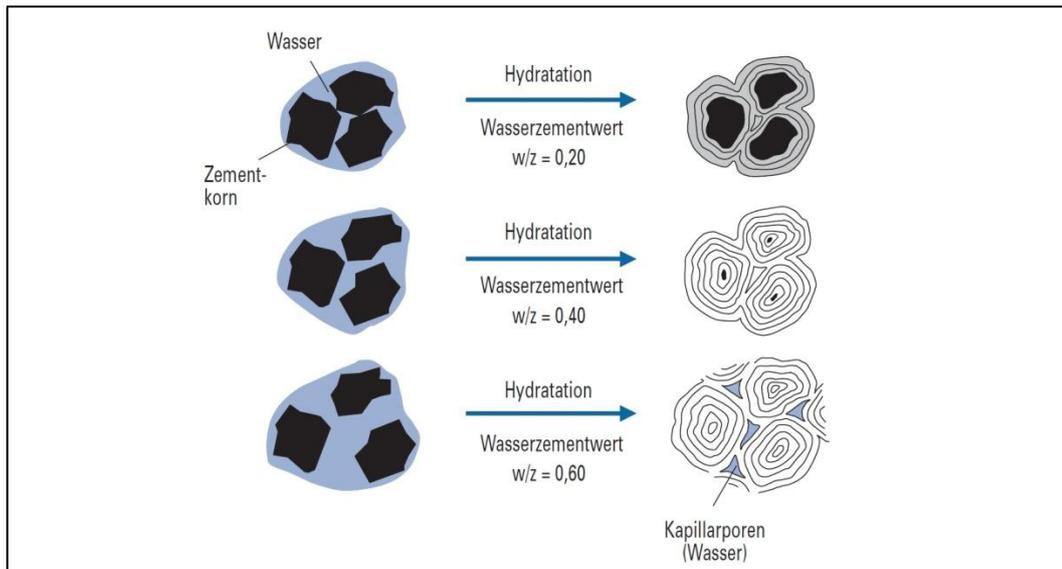


Abbildung 22: Hydratation des Zementkorns nach Wasserzementwert. Aus [19].

3.6.2 Härtung und Hydratationsreaktionen der anderen Zementhauptbestandteile

LOCHER [23] beschreibt Untersuchungen, nach welchen der Ablauf der Reaktionen bei Portlandkompositzementen mit einem zusätzlichen Hauptbestandteil sich nicht wesentlich von den Reaktionen im reinen Portlandzementleim unterscheidet. Diese Aussage findet sich in ähnlicher Form auch bei VOGLIS et al. [40], wo allenfalls von einer Beeinflussung der Reaktionsgeschwindigkeit bzw. dem stöchiometrischen Verhältnis der Reaktionsprodukte ausgegangen wird.

Auch die mechanischen Eigenschaften im Allgemeinen und die Druckfestigkeit im Besonderen, scheinen nicht oder nur sehr gering beeinflusst, wie z.B. LOTHENBACH et al. [36], MÜLLER [41] oder BERTOLDI [42] darlegen. Letzterer merkt beispielsweise an, dass man aufgrund einer Erhärtungsprüfung nicht entscheiden kann, welche Zementart vorliegt.

Diese Ergebnisse sind in Anbetracht der Normungssituation nicht verwunderlich, denn die europäische Normung unterscheidet, wie bei Punkt 3.2 (Seite - 22 -) dargestellt, bei der Festigkeitsentwicklung nicht nach der Zementart [24].

Anhand dieser Untersuchungen kann davon ausgegangen werden, dass sich der Ablauf und die Art der Hydratationsreaktionen nicht wesentlich von denen für Portlandzement dargestellten (Punkt 3.6.1) unterscheiden. Trotzdem existieren gewisse Unterschiede, welche in den folgenden Abschnitten kurz dargestellt werden sollen.

a) Hüttensand (S)

Bei der Verwendung von granulierter Hochofenschlacke als Zementbestandteil beruhen die Härtungsreaktionen auf dem Glasanteil der Schlacke [23; 43]. Der Glasanteil muss aber „angeregt“ werden. Dieser Mechanismus, der die „Depolymerisation und Separation des Glases“ [43] fördert und die daraus entstehenden Reaktionsprodukte für die Vorgänge der hydraulischen Härtung verfügbar macht, ist derzeit noch nicht vollständig erklärbar [23].

Die Zusammensetzung des Anregers beeinflusst die Phasenverteilung der Hydratationsreaktionsprodukte und wird auf dieses Ziel hin abgestimmt [43]. Generell unterscheidet sich der hydratisierte Zementstein aber nicht wesentlich vom reinen Portlandzementstein. Portlandhüttensandzement hat somit „überwiegend Portlandzementcharakter“ [42].

Die Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktionen ist etwas geringer⁴³ als bei Portlandzement, wodurch auch die Hydratationswärmeentwicklung⁴⁴ dieser Zemente hinter der von Portlandzementen zurückbleibt.

b) Kalkstein (L,LL)

Kalkstein reagiert nicht hydraulisch und beeinflusst die hydraulischen Reaktionen dementsprechend nur in geringem Maß, wenngleich Auswirkungen auf das Gleichgewicht von Monokarbonat, Ettringit und Monosulfat von einigen Autoren wie VOGLIS et al. [40] oder LOTHENBACH et al. [36] beschrieben werden. Außerdem kann der Kalkstein eine Verbindung mit den Aluminatphasen eingehen, welche nach BONAVENTI et al. [37] die Festigkeit aber nicht signifikant verändert.

Eine Besonderheit im Hydratationsverlauf von Portlandkalksteinzementen ist der zeitliche Verlauf. So steigt aufgrund der feineren Vermahlung die Festigkeit zunächst schnell an, was den Portlandkalksteinzementen hohe Frühfestigkeit verleiht, um dann –besonders im Verhältnis zu Puzzolanzementen und Hüttensandzementen– flacher zu verlaufen. Dieser Verlauf beruht überwiegend auf der feineren Vermahlung [23], aber auch auf der Wirkung, die Kalksteinpartikel als Kristallisationskeime im Zementgel entfalten [37; 31; 44].

⁴³ Forschungsergebnisse des *Vereins Deutscher Zementwerke* legen den Schluss nahe, dass die Leistungsfähigkeit dieser Zemente sogar umgekehrt proportional zur Reaktionsgeschwindigkeit ist. [26]

⁴⁴ Vgl. Punkt 3.6.3

Diese Auswirkungen sind aber nicht negativ, und so kann der Zusatz von Kalkstein seine anderen Vorteile (wie verminderter Wasser- und Energieanspruch oder geringere Nachbehandlungserfordernis) ausspielen.

c) Puzzolane

Die puzzolanische Reaktion der Inhaltsstoffe beruht auf ihrem Glasgehalt und auf der Anregung mit bei der Hydratation des Klinkeranteils frei werdendem Kalziumhydroxid. Die Reaktionsprodukte sind wie bei Portlandzement und Hüttensand hauptsächlich Kalziumsilikathydrate und Kalziumaluminathydrate. Diese entstehen allerdings deutlich langsamer, was erhöhten Nachbehandlungsbedarf mit sich bringt [19].

d) Flugasche

Der Zusatz von Flugasche ist eine Methode, um schädliche sekundäre Expansionsreaktionen aufgrund von Alkali-Silika-Reaktionen im Beton zu vermindern [31]. Ansonsten unterscheiden sich Flugaschenzemente nicht von anderen Puzzolanementen.

e) Sonderzemente

Bei Zementen mit besonderen Eigenschaften, den so genannten Sonderzementen, laufen zum Teil gänzlich andere Reaktionen ab. Sie sind hier nur der Vollständigkeit halber angeführt und auch nicht Teil der EN197-1. So beruht z.B. die Festigkeitsentwicklung bei den Schnellzementen⁴⁵ auf höherem Gehalt an Kalziumaluminaten [19]; die Zemente mit hohem Sulfatwiderstand sind oft nicht alkalisch, sondern sulfatisch angeregte Hochofenzemente; Zemente mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung enthalten Erstarrungsverzögerer.

3.6.3 Hydratationswärme und Reaktionsenthalpien

Die Hydratation des Zements ist ein exothermer Prozess [19]. Die Zusammensetzung des Zements beeinflusst den Betrag der Wärmefreisetzung, so entwickeln Hüttensandzemente und Puzzolanementen wesentlich weniger Hydratationswärme als Portlandzemente.

⁴⁵ Tonerdezemente

Tabelle 5: Hydratationswärmeentwicklung ausgewählter Zementarten. Nach [19].

Hydratationswärmeentwicklung unterschiedlicher Zementarten.	
Zementart	Hydratationswärme [J/g]
CEM I (Portlandzement)	375-525
CEM II/A-S (Portlandhüttensandzement)	355-440
CEM II/A-P (Portlandpuzzolanzement)	315-420

Auch der Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung ist durch die Wahl der Bestandteile beeinflusst, allerdings spielen hier auch die Festigkeitsklasse und die (Mahl-)Feinheit der Zementpartikel eine große Rolle.

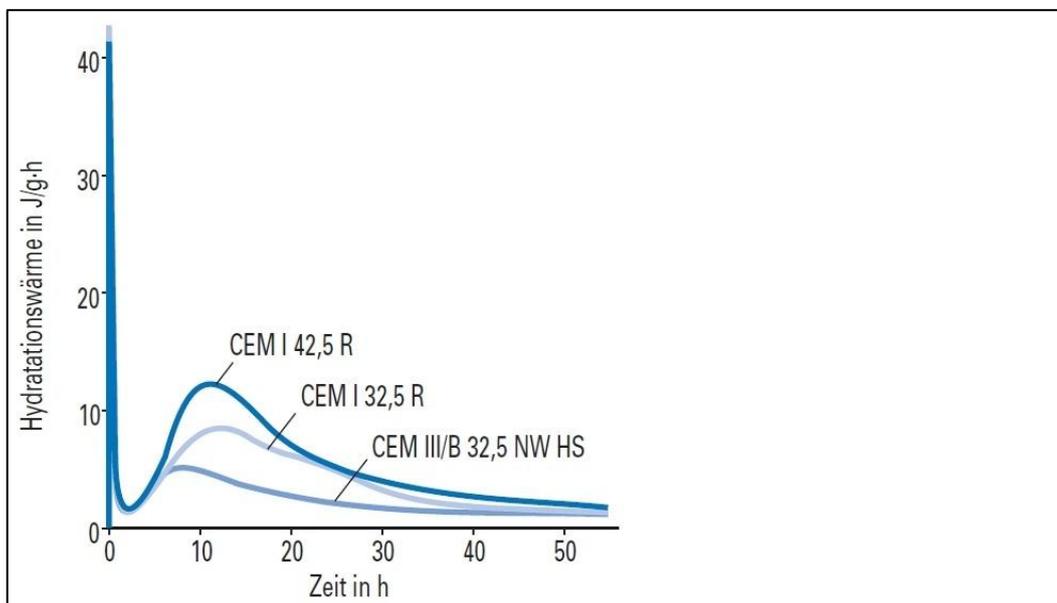


Abbildung 23: Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung ausgewählter Zementsorten⁴⁶. Aus [19].

3.6.4 Nachhärtung und weiterer zeitlicher Verlauf

Die Festigkeitszunahme von Zementstein ist nicht nach dem in der Norm festgelegten 28. Tag abgeschlossen. Besonders die latent hydraulischen Zementbestandteile können bei passenden Umgebungsbedingungen noch über sehr weit darüber hinausgehende Zeiträume Zunahmen in der Druckfestigkeit vorweisen.

⁴⁶ Die im Diagramm angeführte Zementart CEM III/B 32,5 NW HS ist eine nicht in der Norm EN197 enthaltene Variation von Hochofenzement mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung und hoher Sulfatbeständigkeit.

Diese Eigenschaften manifestieren sich in einer Veränderung des Gefüges und im Umbau der Hydratationsprodukte. Da diese bei der Härtung nur „metastabil“ sind, d.h. nicht immer und in jedem Zustand das thermodynamische Optimum repräsentieren, müssen Veränderungen immer mit Vorsicht vorgenommen werden.

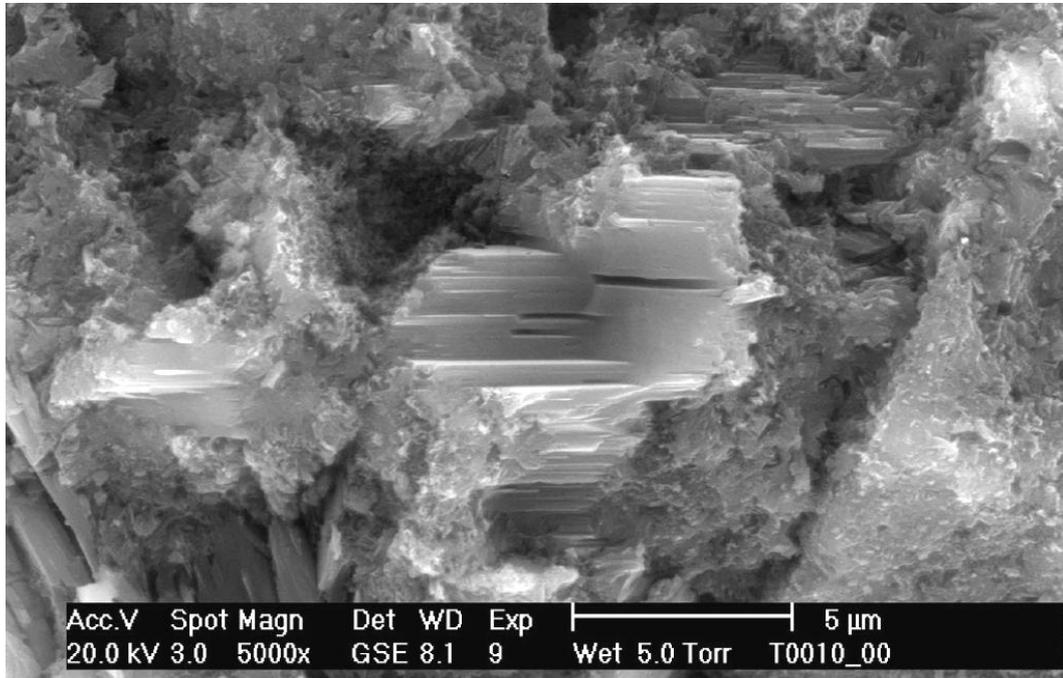


Abbildung 24: Zementstein nach 28 Tagen Hydratation. Aus [19].

3.7 Umweltauswirkungen und Energiebedarf der Zementherstellung

Zementwerke sind in Deutschland [32] und Österreich aufgrund ihrer Emissionen genehmigungspflichtige Anlagen im Sinne der Umweltgesetzgebung. Die Emissionen setzen sich aus Staub- und Lärmemissionen, Erschütterungen sowie aus dem Ausstoß von klima- und umweltrelevanten Gasen zusammen.

Die steigenden Energiepreise, die zunehmende Forderung der Gesellschaft nach Schonung der Ressourcen und auch der Weg des Gesetzgebers⁴⁷ stellt die Zementherstellung als energie- und rohstoffintensiven Industriezweig [32; 41] vor besondere Herausforderungen. Diesen Herausforderungen stellen sich die

⁴⁷ Ein europäisches Regelwerk zum Thema „nachhaltiges Bauen“ ist in Ausarbeitung; es sieht auch eine Umweltdeklaration von Bauprodukten vor. [53]

Produzenten auch im Rahmen von Selbstverpflichtungen⁴⁸, um beispielsweise die CO₂-Emissionen zu senken oder „(einen) Ausgleich zwischen Rohstoffgewinnung, Standortsicherung und Naturschutz (zu erreichen)“ [32].

3.7.1 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Zementklinkerherstellung setzt sich aus verschiedenen chemisch und verfahrenstechnisch bedingten Komponenten zusammen:

- Aus der für die Rohstoffgewinnung und die Rohmaterialaufbereitung notwendigen Energie
- Aus der für die Verdampfung des enthaltenen Wassers notwendigen Energie (je nach Prozess⁴⁹ bis zu ~3 GJ/t_{Klinker})
- Aus dem theoretischen Energiebedarf für die Bildung des Klinkers im Brennprozess (1,76 GJ/t_{Klinker} [30])
- Aus der Enthalpie der Ofen- und Kühlerabgase
- Aus der Enthalpie des Klinkers nach dem Verlassen des Kühlers
- Aus Energieverlusten von Vorheiz-, Ofen- und Kühleranlage und aus den Verlusten durch den Wirkungsgrad
- Aus dem (elektrischen) Energiebedarf der Mühlen und der technischen Anlagen (33-45 kWh/t_{Zement} in Kugelmühlen, 23-28 kWh/t_{Zement} in Vertikalwälzmühlen [29])
- Aus dem zum Transport und zur Verarbeitung des Produkts notwendigen Energieeinsatz

Der gesamte Energieeinsatz zur Herstellung einer Tonne Portlandzementklinker bewegt sich laut Darstellung verschiedener Autoren, je nach Land im Bereich von 5,5 bis 3 GJ/t⁵⁰ [30; 45; 29; 27; 26; 23]. Durch die Zumahlung weiterer Hauptbestandteile kann der spezifische Wert auch unter 3 GJ pro Tonne absinken [46]. Der Energieanspruch der Zementherstellung ist außerdem wesentlich vom gewählten Verfahren abhängig [23; 29; 30]. Er wird durch folgende Energieträger gedeckt:

- Fossile Primär- und Sekundärenergieträger (Brennstoffe)
- Sekundärrohstoffe wie brennbare Abfälle
- Elektrische Energie (für Mahlwerke usw.)

⁴⁸ Die Senkung der Emissionen ist im Bereich der Zementindustrie oft mit Möglichkeiten zur Kostensenkung verknüpft. [32]

⁴⁹ Besonders hoch im Nassverfahren älterer Anlagen.

⁵⁰ „Best Available Techniques 2001“ [26]

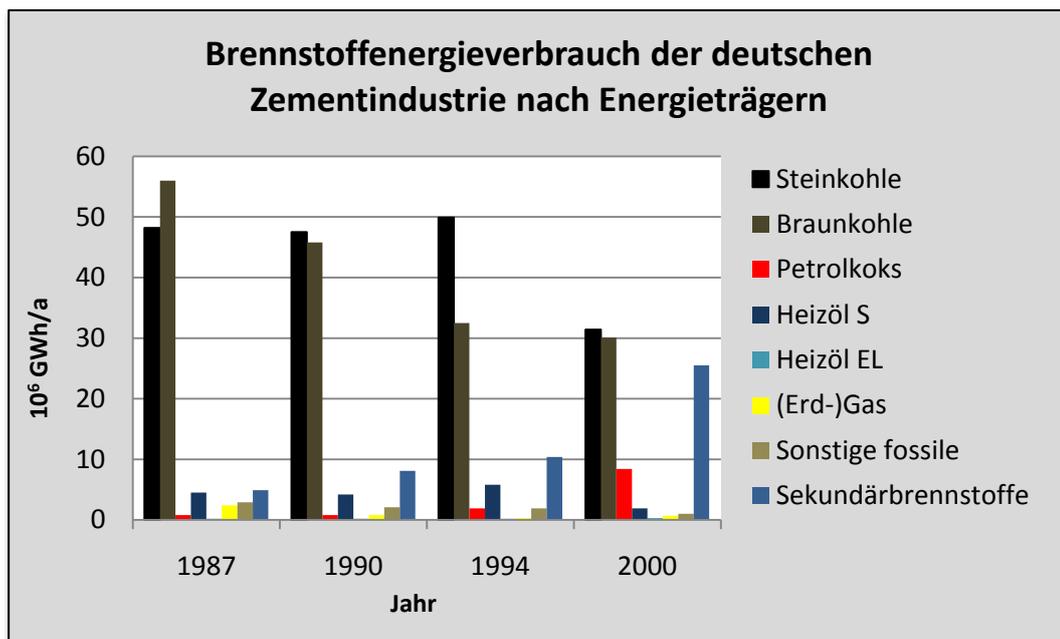


Abbildung 25: Brennstoffenergieverbrauch der Zementindustrie in Deutschland. Aus [19], verändert.

3.7.2 Emissionen klimarelevanter Gase

Der Einsatz fossiler Primärenergieträger in der Klinkerproduktion ist eine Quelle der Emission von so genannten „Treibhausgasen“ und ein großer Kostenfaktor.

Die größte Quelle⁵¹ von CO₂-Emissionen in modernen Anlagen stellt allerdings das prozessbedingte Entweichen des Treibhausgases beim Klinkerbrennprozess („Entsäuerung des Kalksteins“) dar. Das Rohmehl besteht bis zu 38% der Masse aus Kohlendioxid [23], welches beim Brennprozess entweicht⁵².

⁵¹ Nach [32] sind 28% der Emissionen von CO₂ durch die Brennstoffe, 10% durch den elektrischen Energieeinsatz und 62% der Emissionen prozessbedingt. (Vgl. auch Abbildung 26)

⁵² Zusammen mit dem ebenfalls entweichenden Wasser bedingt dieses Phänomen den Einsatz von ungefähr 1,5 kg Rohmehl pro kg Klinker [23].

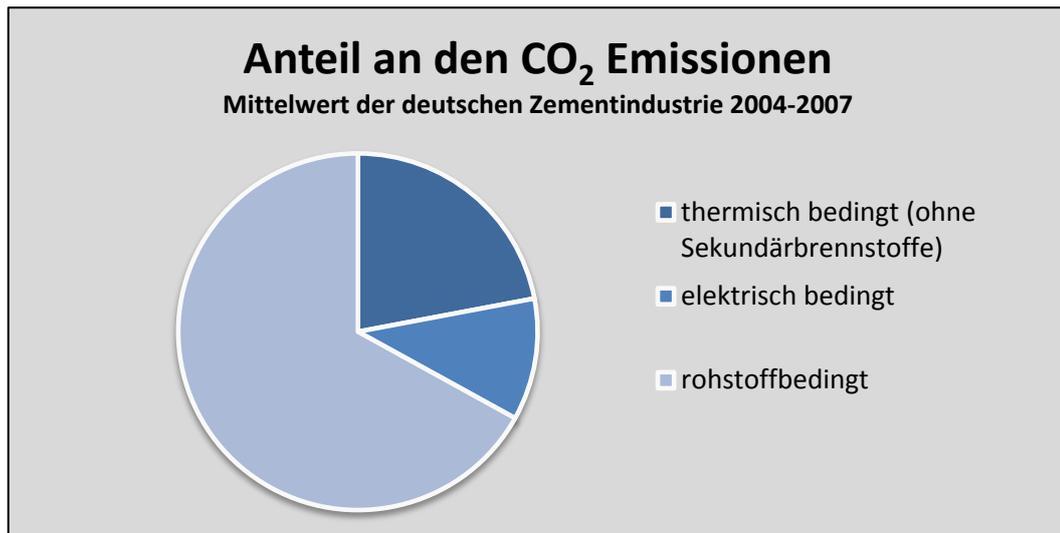


Abbildung 26: Anteil der Verfahrensschritte an der CO₂-Emission der deutschen Zementindustrie im Mittelwert von 2004-2007. Daten aus [46].

Je nach Modernisierungsgrad des Zementwerksparks und je nach auf dem jeweiligen Markt üblichem „Zementsortenmix“, ergeben sich die in Tabelle 6 dargestellten spezifischen CO₂-Emissionen bei der Zementherstellung.

Tabelle 6: Spezifische CO₂-Emissionen der Zementherstellung

Spezifische CO ₂ -Emissionen der Zementindustrien ausgewählter Länder			
Land	Jahr	Gesamte spezifische CO ₂ -Emission in t/t _{Zement}	Autor
D	1990	0,802	[26]
	2000	0,690	[32]
	2006	0,573	[47]
USA	1994	0,933 ⁵³	[29]
Kanada	1990	0,990	[45]
	1995	0,830	
	2000	0,760	
Weltweit	1994	0,815	[30]
	1999	0,873	[34]
	2000	0,810	[48]

Pro Tonne produziertem Zement werden im Mittel nach den letzten für Deutschland vorliegenden Daten (2006) 0,573 Tonnen CO₂ emittiert [47]. Noch im Jahr 2000 lag

⁵³ Umgerechneter Wert; im Original 254,4 kgC.

der Wert bei 0,69 Tonnen CO₂ pro Tonne Zement⁵⁴ [32]. Dieser Verlauf spiegelt beispielhaft auch die veränderte Produktions- und Absatzsituation und die zunehmende Verdrängung von CEM I-Zementen wider⁵⁵.

Im globalen Blickfeld ist die Zementindustrie nach [49; 30; 48] **für etwa 5% der menschlichen CO₂-Emissionen verantwortlich**, was ungefähr 3% der Treibhausgase entspricht. Andere klimarelevante Gase wie Methan (CH₄) oder Distickstoffmonoxid⁵⁶ (N₂O) spielen in der Zementindustrie keine Rolle.

3.7.3 Rohstoffverbrauch

Der Einsatz natürlicher Rohstoffe ist ebenso wie der Energiebedarf in erster Linie durch die Herstellung des Klinkers bedingt [41; 50]. Sowohl im Hinblick auf die Menge als auch auf die Qualität der Ausgangsmaterialien sind hohe Ansprüche zu erfüllen, während die anderen Hauptbestandteile entweder leichter verfügbar sind oder sogar als Abfallprodukt aus anderen Industrieprozessen hervorgehen.

3.7.4 Einsparungspotential bei Energieeinsatz, Treibhausgasemissionen und Rohstoffverbrauch

Die Verminderung des Brennstoffenergieeinsatzes und die Steigerung der Energieeffizienz⁵⁷ ist in der Zementindustrie schon aus Kostengründen seit vielen Jahren vorangetrieben worden [32; 46]. Das in der modernen europäischen Zementindustrie erreichte Niveau bewegt sich nahe des „*verfahrenstechnischen Optimums*“ [50]. Eine weitere Senkung des Energieeinsatzes ist noch durch den Austausch älterer Anlagen zu erwarten [30]. Außerdem gibt es Untersuchungen zur Nutzung von Gips an Stelle von Kalkstein, womit die rohstoffbedingten CO₂-Emissionen weitgehend entfallen würden⁵⁸ [30]. Dieser und ähnliche Ansätze sind jedoch - zumindest derzeit - nicht praxisrelevant.

⁵⁴ entspricht 2,6% der anthropogenen Gesamtemission in Deutschland im Jahr 2000 [32].

⁵⁵ Siehe hierzu auch Abbildung 28 (Seite - 52 -) und Punkt 3.8 (Seite - 53 -).

⁵⁶ Lachgas

⁵⁷ Durch die Modernisierung der Zementindustrie in den neuen deutschen Bundesländern konnte so z.B. der spezifische Energieeinsatz um über 30% gesenkt werden[32].

⁵⁸ Allerdings würde stattdessen Schwefelsäure anfallen.

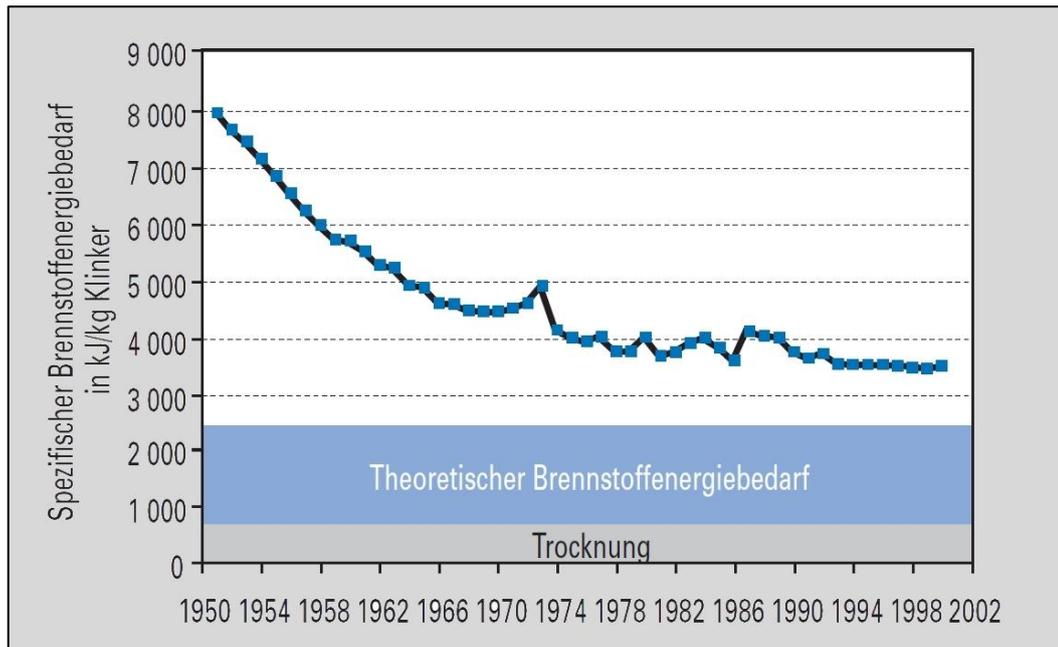


Abbildung 27: Brennstoffenergieeinsatz in der deutschen⁵⁹ Zementindustrie. Quelle: [19].

Trotz der erreichten Verminderung kommt der Schonung der Ressourcen im Hinblick auf die Treibhausgasthematik weiterhin große Bedeutung zu. Unter den gegebenen Voraussetzungen lassen sich weitere Verminderungen von Emissionen erzielen, beispielsweise durch:

- Den Einsatz von Sekundärbrennstoffen
- Den Ersatz von Portlandzementklinker
- Den Technologietransfer in Länder mit veraltetem Maschinenpark [51]
- Durch die Besteuerung bzw. Limitierung⁶⁰ von Emissionen
- Durch die Erfassung und Einlagerung emittierter Gase⁶¹

Auf die ersten beiden Punkte wird im Folgenden noch näher eingegangen, die letzten beiden Punkte sind in ihrem Nutzen umstritten.

a) Einsatz von Sekundärbrennstoffen

Da sekundäre Brennstoffe, wie die in der Zementindustrie verwerteten Fraktionen von brennbaren Abfällen aus Haushalten, Industrie, Landwirtschaft und Gewerbe bezeichnet werden, nicht in die Berechnung der CO₂-Emissionen einfließen⁶² und

⁵⁹ Ab 1990 Gesamtdeutschland, vorher nur BRD.

⁶⁰ CO₂-Zertifikatehandel

⁶¹ „Carbon Capture and Storage“ (CCS)

⁶² „CO₂-neutral“

außerdem wesentlich billiger sind als fossile Energieträger, werden sie in der Zementindustrie bereits seit vielen Jahren eingesetzt [32].

So werden in Österreich seit 1980 Altreifen in der Zementindustrie verwertet [52]. Weitere verwendete Materialien sind [52; 26; 27; 46; 32]:

- Vorsortierter Restmüll
- Klärschlamm
- Öle und Fette, Tiermehle
- Mineralölschlämme
- Lösungsmittel, Lack und Farbabfälle
- Bleicherden⁶³
- Altholz

Neben dem Einsparungspotential bietet die Verwertung in der Zementindustrie auch aus abfallwirtschaftlicher Sicht einige Vorteile. Die hohe Temperatur im Klinkerbrennprozess ist in der Lage, praktisch alle giftigen Verbindungen zu zerstören. Außerdem können durch die chemischen Verhältnisse im Ofen viele Säuren, Gase und Schwermetalle gebunden werden und es bleibt keine Schlacke zurück [52].

Der Einsatz von sekundären Brennmaterialien variiert von Land zu Land sehr stark, Werte bis zu 72% Substitution klassischer Energieträger werden beispielsweise in den Niederlanden erreicht [27].

b) Ersatz von Portlandzementklinker

Zementklinker ist der Zementbestandteil mit dem höchsten zur Herstellung notwendigen Energie- und Rohstoffeinsatz und mit dem größten Anteil an CO₂-Emissionen. Auch die Lärm- und Staubemissionen gehen hauptsächlich zu Lasten der Herstellung des Portlandzementklinkers.

Der Anteil an den energie- und rohstoffbedingten Emissionen und am Energieeinsatz für den Klinkerbrennprozess kann daher vor allem durch den Austausch von Klinker gesenkt werden [41; 50; 32; 53; 51; 29; 19; 45; 37; 48].

⁶³ Aus der Speiseölproduktion

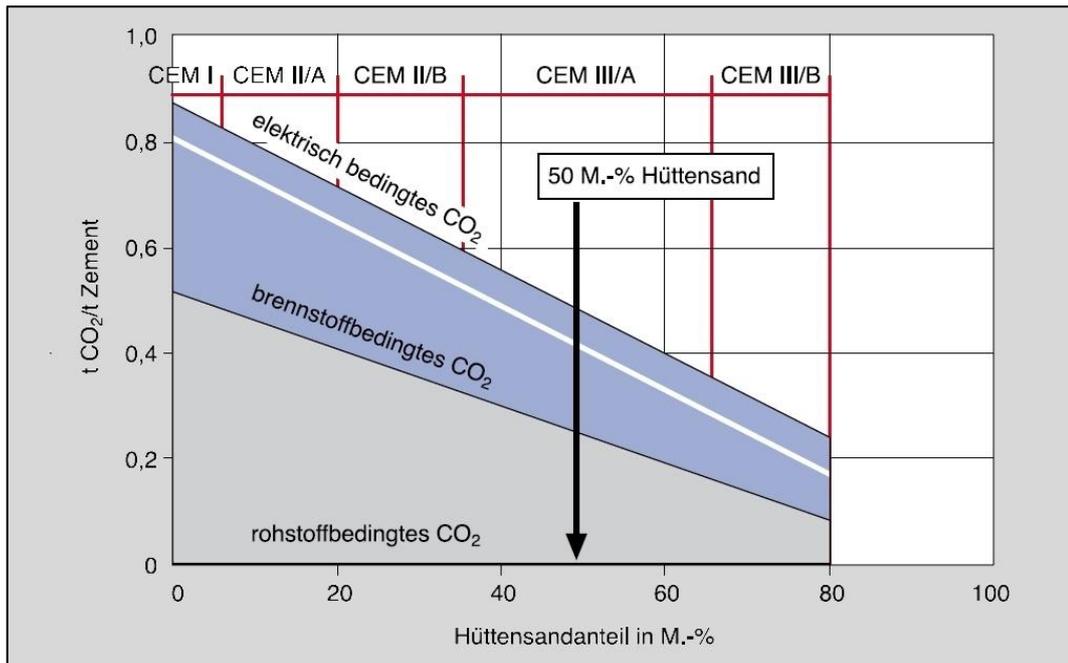


Abbildung 28: spezifische CO₂ Emissionen bei Zementen mit Hüttensandanteil. [19]

In dieser Arbeit wird, besonders bei Punkt 3.8 „Eigenschaften und Verwendung der Zementarten“ und in Teil 4 „Einflüsse des Zements auf die Beton- und Befestigungstechnik“, noch ausführlich auf die Konsequenzen des Ersatzes von Klinker durch andere Hauptbestandteile eingegangen.

Auch wenn beachtet werden muss, dass z.B. der Bedarf an elektrischer Energie durch den Einsatz weiterer Hauptbestandteile geringfügig steigen kann [29], scheint die Verminderung des Klinkereinsatzes eine vielversprechende Möglichkeit in der Erzielung weiterer Einsparungen zu sein.

Maßzahl für den Ersatz von Klinker ist der „Klinker/Zement – Faktor“, welcher in Deutschland 2005 75,9%, in Österreich 78% betragen hat [26; 53].

3.7.5 Staub

Die Staubemissionen, die laut VDZ [19] 1950 noch 3,5% der produzierten Zementmenge betragen haben, können in modernen Anlagen stark eingeschränkt werden und liegen heute unter 0,1% der produzierten Menge [32]. Besonders bei den großen Staubquellen wie den Ofen- und Mühlenabgasen kann eine nahezu vollständige Entstaubung⁶⁴ erreicht werden. Die übrigen Staubemissionen stammen

⁶⁴ Reingasstaubgehalte liegen in Deutschland heute bei 10-50 mg/m³ [19; 47].

aus diffusen Quellen wie Absaugeinrichtungen, Förderbändern und dem Werksverkehr, bei welchen eine Erfassung schwieriger ist.

Stäube aus Zementwerken enthalten je nach Rohstoffzusammensetzung unterschiedliche Gehalte an Schwermetallen und anderen Umweltgiften [19], die aufgrund von Auflagen im behördlichen Genehmigungsverfahren zum Teil kontinuierlich gemessen werden [47].

3.7.6 Abgase und Luftschadstoffe

Neben den Staubemissionen kommt den Abgasen eine zentrale Bedeutung zu. Sie enthalten die beim *Hochtemperaturprozess* „Klinkerbrennen“ entstehenden Stickstoffoxide, Schwefeloxide, Kohlenstoffoxide, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Polychlorierte Biphenyle (PCB) sowie Alkalichloride und organische Verbindungen (Dioxine und Furane).

Durch Minderungsmaßnahmen und optimierten Anlagenbetrieb ist eine Einhaltung der gesetzlichen Grenzwerte möglich. Minderungsmaßnahmen sind beispielsweise [47]:

- gleichmäßiger Ofenbetrieb (NO_x)
- Beigabe von Zusatzstoffen zur Bindung der Gase im Klinker (SO_2)
- Steuerung der Gasaufenthaltszeit im Hochtemperaturbereich (Dioxine, Furane, PCB, PAK)

3.8 Eigenschaften und Verwendung der Zementarten

3.8.1 Überblick

Zement wird erst durch die Mischung mit Wasser und Zuschlägen zu einem wirtschaftlich nutzbaren Baustoff. Der größte Teil der produzierten Zementmenge geht in die Herstellung von Beton in Transportbeton- und Fertigteilwerken. Auch die weiterverarbeitende Industrie mit Produkten wie Verbundwerkstoffen (Faserbeton), Betonbausteinen, Mörteln und Verputzen ist ein großer Abnehmer von Zement.

Die Anforderungen an die Zemente wurden in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. Die ebenfalls beschriebenen besonderen Eigenschaften der Zementinhaltsstoffe ermöglichen oftmals eine Verbesserung der Betoneigenschaften und eine gezieltere Anpassung an besondere Erfordernisse, was auch anwendungstechnisch Nutzen bringt. Generell ist aufgrund immer differenzierterer bau- und

betontechnologischer Vorgaben [41] eine Marktbewegung hin zu spezieller ausgewählten und auch zu Zementen höherer Festigkeitsklassen zu beobachten, wodurch die Angebotspalette breiter wird [54; 32]. Kein Zement stellt in allen Anwendungsfällen die optimale Lösung dar [26].

Zu Beginn der Einführung der Zementnorm EN197-1 [24] lagen noch nicht für alle Zementarten in allen Anwendungsfällen ausreichende Erfahrungen vor, weshalb bestimmte Anwendungen nach wie vor ausgeschlossen sind. Es ist aber davon auszugehen, dass die fortschreitende wissenschaftliche Forschung und die „*nachreifende Erfahrungslage*“ in den nächsten Jahren hier Änderungen mit sich bringt [50]. Beispielhaft sei eine Untersuchung von BONAVETTI et al. [37] genannt, nach welcher in hochfesten (HPC) und ultrahochfesten (UHPC) Betonen mit extrem niedrigen Wasserzementwerten gearbeitet wird. Das hat zur Folge, dass ein relativ großer Anteil des (CEM I) Zements nicht hydratisiert, d.h. unverändert im Beton verbleibt. Diese Anteile am Zement, die aufgrund der hohen Zementanteile in Betonen dieser Festigkeitsklassen verhältnismäßig große Mengen ausmachen, können ohne weiteres durch Füller –wie Kalkstein- oder andere, weniger energieintensive Hauptbestandteile, d.h. durch Portlandkompositzemente, ersetzt werden.

Bereits heute ist in Europa die Gruppe der CEM II- Zemente die am meisten verwendete Zementart [50], mit weiter steigenden Marktanteilen. Dieser Trend, der für die weltweite Situation genauso gilt (wenngleich in unterschiedlich starker Ausprägung), liegt im Wesentlichen in den geänderten ökonomischen und/oder ökologischen Anforderungen begründet. Gleichwohl muss festgehalten werden, dass Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen auch wegen der jeweiligen lokalen Rohstoffsituation bereits eine sehr lange Geschichte aufweisen [41].

Auch in Österreich wird hauptsächlich CEM II produziert - dieser hat einen durchschnittlichen Klinkeranteil von 78 % [53].

Als anderes Beispiel sei schlaglichtartig Griechenland erwähnt. In Griechenland werden Puzzolane, Flugasche, Hüttensand und Kalkstein in der Zementherstellung verwendet, um „*technische und wirtschaftliche Vorteile zu nutzen*“ [40]. Die Einführung der Norm EN197-1 und die daraus folgende Eröffnung der Möglichkeit mehrere Hauptbestandteile im Zement einzusetzen, hat den Zementmarkt in Griechenland stark verändert [40].

Es ist auch das Ziel der Zementindustrie, den Anteil an Klinker im Zement zu senken und den Markt von CEM I-Zementen Richtung CEM II-Zemente zu bewegen [32; 51; 49], besonders auch weil finanzielle Gründe dafür sprechen.

Tabelle 7: Anwendung von Zementen nach EN 197 für Beton gemäß EN 206 / DIN 1045-2. Nach [55]; verändert.

	kein Korrosionsrisiko	Bewehrungskorrosion											Betonangriff						Spannstahlverträglichkeit				
		durch Karbonatisierung				durch Chloride							Frostangriff				Chemisch aggressive Umgebung			Verschleiß			
						andere als Meerwasser			Meerwasser														
		X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2		XA3	XM1	XM2	XM3
CEM I																							
CEM II/A-S																							
CEM II/B-S																							
CEM II/A-D																							
CEM II/A-P																							
CEM II/B-P																							
CEM II/A-Q																							
CEM II/B-Q																							
CEM II/A-V																							
CEM II/B-V																							
CEM II/A-W																							
CEM II/B-W																							
CEM II/A-T																							
CEM II/B-T																							
CEM II/A-L																							
CEM II/B-L																							
CEM II/A-LL																							
CEM II/B-LL																							
CEM II/A-M																							
CEM II/B-M																							
CEM III/A																							
CEM III/B																							
CEM III/C																							
CEM IV/A																							
CEM IV/B																							
CEM V/A																							
CEM V/B																							

... geeignet

... bedingt geeignet

3.8.2 Portlandzement

Der Anteil von Portlandzement an der gesamten Menge der hergestellten Zemente ist seit einigen Jahren in allen Ländern, für welche publizierte Daten vorliegen, stark rückläufig. Besonders in Ländern wie Deutschland, wo CEM I-Zemente traditionell hohe Verwendungsraten aufwiesen, ergibt sich dadurch eine deutliche Verschiebung in den Marktanteilen.

3.8.3 Portlandkalksteinzement

Portlandkalksteinzemente sind die in Europa am weitesten verbreiteten Zementarten [36]. Die Verwendung ist in ganz Europa „übliche Praxis“, da durch den Einsatz von Kalkstein als Zementhauptbestandteil verschiedene ökonomische, technische und ökologische Vorteile genutzt werden können [37]. In Frankreich sind Portlandkalksteinzemente seit rund 30 Jahren genormt [50].

Ökonomische Vorteile sind z.B. in den geringeren Kosten pro Tonne Zement begründet (bei gleichen oder vergleichbaren Eigenschaften), ökologische Vorteile in den geringeren Emissionen und dem geringeren Rohstoffbedarf, technische Vorteile eröffnen sich aus dem geringeren Wasseranspruch, der erhöhten Frühfestigkeit und der geringeren Empfindlichkeit bei fehlender Nachbehandlung [37].

3.8.4 Portlandhüttenzemente und Hochofenzemente

Aufgrund der Hand-in-Hand laufenden Entwicklung der Stahl- und Zementindustrie ist Hochofenschlacke weltweit ein häufiger Zementbestandteil, welcher außerdem eine lange Tradition in der Nutzung vorzuweisen hat. Hüttensand ist gut für Betone geeignet, die chemischen Angriffen ausgesetzt sind [56]. Hüttensandzemente (und Puzzolanzemente) können ein sehr weit über der 28-Tage-Festigkeit gelegenes Endfestigkeitsniveau erreichen, sofern die Nachbehandlung [31] bzw. die Umgebungsbedingungen dies erlauben.

Zemente mit Hüttensand (früher Eisenportlandzement genannt) sind in Deutschland seit mehr als 100 Jahren genormt und werden seit längerem in einigen Regionen als „Regelzemente“ verwendet [50].

Auch China - als derzeit größter Zementverbraucher - hat die enormen Möglichkeiten der Kosten- und Energieeinsparungen erkannt und versucht den Anteil der hüttensandhaltigen Zemente zu steigern [43].

Tabelle 8: Marktanteile bestimmter Normzemente in ausgewählten Ländern

Marktanteile ausgewählter Zemente				
Zementart	Land	Jahr	Autor	Marktanteil [%]
„Portland cement“	USA	1997	[29]	>90
CEM I	Italien	2003	[57]	8,51
	Deutschland	1993	[32]	76,6
		2000		61,8
		2004	[47]	58,31
		2006		41,68
	Österreich	2006	[38]	11
CEM II gesamt	Österreich	2006	[38]	85
	Deutschland	2000	[32]	21,8
CEM II A/B L-LL	Italien	2003	[57]	64
	Deutschland	2000	[32]	6,8
		2004	[47]	14,75
		2006		13,21
CEM III	Österreich	2006	[38]	2
	Deutschland	1993	[32]	12,9
		2000		14,2
CEM IV	Italien	2003	[57]	10,6

3.9 Zusammenfassung

Dieser Teil der Arbeit gibt einen Überblick über den Baustoff „Zement“, der trotz seiner langjährigen Verwendung und Erforschung und trotz der engen Einordnung im Normenwesen nicht als homogenes Produkt, sondern als Stoffgemisch mit großer Variation der Eigenschaften betrachtet werden muss.

Die für die Zementproduktion verwendeten Stoffe, deren Eigenschaften und Besonderheiten wird dargestellt. Im Besonderen wird auf die Umweltauswirkungen der Zementproduktion eingegangen, wobei unter anderem durch den Vergleich der Reaktionen und der Eigenschaften des Zementsteins gezeigt werden konnte, dass bereits im Rahmen der heutigen Normen und mit der heute verfügbaren Technologie ein großes Minderungspotential erreichbar wäre. Dieses Potential, welches in manchen Teilen der Welt noch vollständig brachliegt, wird im Zuge einer nachhaltigen und ganzheitlichen Betrachtungsweise der Bauindustrie noch an Bedeutung gewinnen.

TEIL 4: PARAMETERSTUDIE - EINFLÜSSE DER ZEMENTART AUF DIE BETON- UND BEFESTIGUNGSTECHNIK

4.1 Einleitung

Die Elemente der Befestigungstechnik sind heute in vielen Anwendungsfällen bereits so ausgereift, dass die Tragfähigkeit des Untergrundes die beschränkende Komponente darstellt. Doch auch der Untergrund –in den meisten Fällen Beton– unterliegt nach wie vor einer Entwicklung, die seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert Hand in Hand mit der fortschreitenden Technisierung ging und auch heute noch nicht zum Stillstand gekommen ist.

Waren zu Beginn die Leistungsfähigkeit der Maschinen und das Verständnis der Prozesse Ansatzpunkte für die Leistungssteigerung in der Herstellung von Beton und Zement und wurde später durch Untersuchungen und Normung eine Vereinheitlichung der Produktqualitäten erreicht, so sind heute oftmals Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit das Ziel von Veränderungen und Verbesserungen.

In einer theoretischen Betrachtung werden unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Teil 3 der vorliegenden Arbeit mögliche Einflussfaktoren des Betons bzw. des Zements auf die Befestigungstechnik festgelegt und auf ihre Relevanz hin untersucht. Aufgrund dieser Rechercheergebnisse, der praktischen Gegebenheiten und der versuchstechnischen Möglichkeiten wird ein Versuchsplan für praktische Untersuchungen erstellt. Die experimentellen Untersuchungen müssen aufgrund des weiten Feldes in ihrem Umfang beschränkt bleiben.

4.2 Einfluss der Zementart auf die Druckfestigkeit und die Druckfestigkeitsentwicklung des Betons

Die Betondruckfestigkeit ist der wichtigste Parameter in der Betontechnologie, da die Erhärtung des Zementleims zu Zementstein und „*die Verkittung von Kiesgemischen zum Kunststein Beton*“ [4] die Grundlage der bautechnischen Nutzung von Beton darstellt. Die Betondruckfestigkeit ist abhängig vom Wasserzementwert, dem

Zementgehalt, dem Verbund zwischen Zementstein und Zuschlägen, der Abstufung der Sieblinie und der Größe, Form und Festigkeit der Zuschläge [58]. Außerdem steigt die Druckfestigkeit des Betons bei ansonsten unveränderten Randbedingungen mit der Normdruckfestigkeit des Zements linear an [19]. Da die Normdruckfestigkeit des Zements vorgegeben ist, hängt sie definitionsgemäß nicht von der Zementart, sondern nur von der *Festigkeitsklasse* ab.

Ein Unterschied besteht allerdings im Verlauf der Festigkeitsentwicklung. Während der Normwert der Zementdruckfestigkeit nach 2 bzw. 7 und nach 28 Tagen vorgegeben ist⁶⁵, weisen die Festigkeiten der Zemente außerhalb dieses Zeitraums zueinander beträchtliche Unterschiede auf. Das liegt an der Anforderung, die Normdruckfestigkeiten erreichen zu müssen, was durch gewisse Anpassungen, z.B. bei der Feinheit des Zementkorns möglich ist. Aus diesem Grund kann auch allgemein gesagt werden, dass Zemente mit hoher Frühfestigkeit eine geringere Fähigkeit zur Nachhärtung⁶⁶ aufweisen als Zemente mit geringer Frühfestigkeit [59]. Die Fähigkeit zur Nachhärtung ist aber auch von den Inhaltsstoffen abhängig und je nach Zementbestandteil unterschiedlich stark ausgeprägt. Hüttensandhaltige und puzzolanhaltige Zemente weisen die höchste, kalksteinhaltige Zemente die geringste Nachhärtung auf [40].

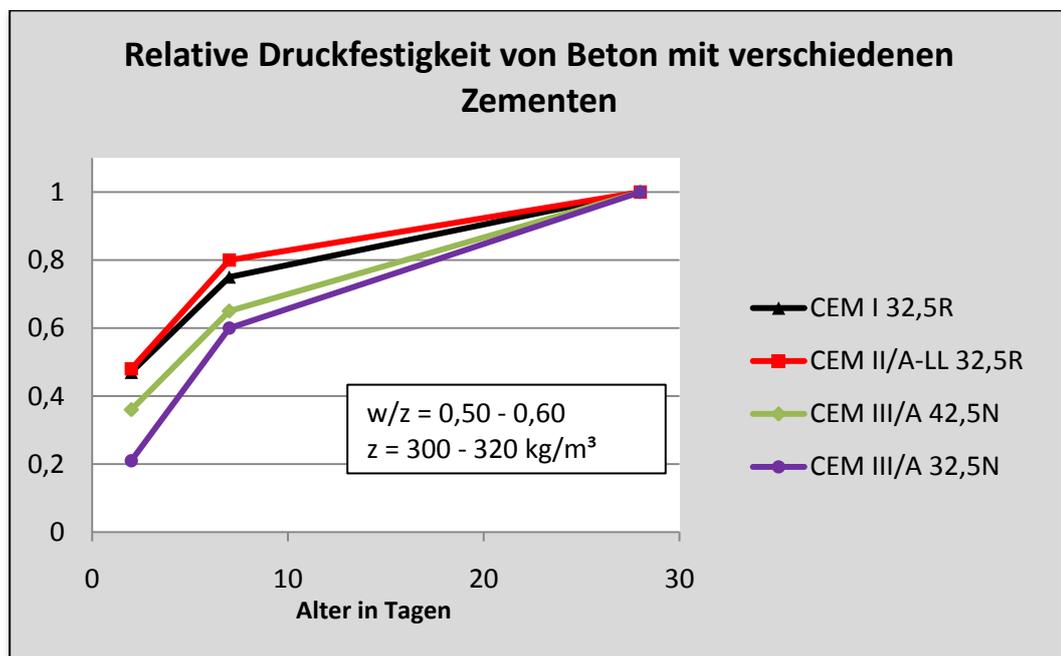


Abbildung 29: Relative Druckfestigkeit von Beton mit verschiedenen Zementen. Aus [19]; verändert.

⁶⁵ Vgl. Tabelle 3, Seite - 34 -

⁶⁶ D.h. die über den 28. Tag hinausgehende Zunahme der Druckfestigkeit

Beurteilung des Einflusses auf die Befestigungstechnik

Die Betondruckfestigkeit als wichtigster und leicht verfügbarer Parameter zur Beurteilung von Beton eignet sich auch als Ausgangspunkt für die Bemessung von Verankerungen. Wie in Punkt 2.6 gezeigt wurde, geht bei den Bemessungsformeln zumeist *nur* die Druckfestigkeit als Materialparameter in die Berechnung ein. Festgehalten werden muss, dass der Fehler durch die angenommene Korrelation zwischen den betrachteten Größen wesentlich höher ist als die Abweichung durch die verwendete Zementart.

Die Druckfestigkeit liefert daher, in Ermangelung anderer Daten, nur einen *Anhaltspunkt* für die Tragfähigkeit von Verankerungen. Da sich die Beziehungen, die aus der Druckfestigkeit abgeleitet werden, aber immer auf die Normdruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen beziehen, wird der Einfluss der Zementart noch weiter eingeschränkt. Besonders für die Gruppe der Portlandkompositzemente (CEM II-Zemente) können Auswirkungen der Zementart aufgrund der geringen Unterschiede zur „Referenzzementart“ Portlandzement (CEM I) ausgeschlossen werden.

In Hinblick auf die experimentellen Untersuchungen wird der Betondruckfestigkeit keine besondere Aufmerksamkeit geschenkt, zumal hier viele Untersuchungen vorliegen und auch bei Zulassungsprüfungen⁶⁷ mehrere Betondruckfestigkeitsklassen herangezogen werden.

Die Versuchsbetone sollen allerdings möglichst die gleiche Druckfestigkeit aufweisen, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

4.3 Einfluss der Zementart auf die (Bruch-) mechanischen Eigenschaften des Betons

In der Befestigungstechnik spielt die für die Bemessung und Beurteilung herangezogene Druckfestigkeit des Betons eigentlich nur eine untergeordnete Rolle; viel wichtiger sind Parameter wie *Zugfestigkeit* und *Bruchenergie*. Für diese Punkte liegen wesentlich weniger aussagekräftige Untersuchungen vor als für die Druckfestigkeit, allerdings besteht eine gewisse Korrelation zwischen den Parametern [60].

Das Verhältnis Biegezug- zu Druckfestigkeit nimmt mit zunehmender Druckfestigkeit ab [59] und wird daher auch von der Festigkeitsentwicklung des Zementsteins beeinflusst. Diese ist, wie weiter oben gezeigt werden konnte, von der

⁶⁷ Vgl. Punkt 2.5 ab Seite - 14 -.

Festigkeitsklasse des Zements, nicht jedoch von den Bestandteilen beeinflusst. Zudem ist auch der Einfluss der Druckfestigkeit gegenüber dem Einfluss von Korngröße und -form gering [60].

LOTHENBACH et al. [36] beschreiben Untersuchungen, nach welchen die Biegezugfestigkeit durch den Einsatz von z.B. Kalkstein als Zementhauptbestandteil gegenüber reinen Klinkerzementen nicht verändert wird.

Der Elastizitätsmodul des Zementsteins wird nach [59] von den gleichen Einflussgrößen bestimmt wie die Druckfestigkeit, wo ein Einfluss der Zementart bereits ausgeschlossen werden konnte. Zusätzlich wird der E-Modul des Zementsteins vom Hydratationsgrad und somit vom W/B-Wert und von der Nachbehandlung beeinflusst.

Für Bruchenergie und Arbeitsvermögen ist der Einfluss der Zementart im Vergleich zu anderen Parametern wie W/B-Wert oder Form und Größe des Zuschlags vernachlässigbar gering.



Abbildung 30: Dreipunkt-Biegezugversuch zur Ermittlung der Bruchenergie und Versuch zur Ermittlung des E-Moduls von Beton. Aus [61].

Beurteilung des Einflusses auf die Befestigungstechnik

Die Materialparameter Zugfestigkeit, Bruchenergie und Elastizitätsmodul spielen für das Tragverhalten von Befestigungselementen eine wichtigere Rolle als die Druckfestigkeit. Da allerdings aufgrund der schwierigen messtechnischen Erfassung⁶⁸ dieser Parameter oftmals überhaupt keine Daten vorliegen, ist es sinnvoll, den

⁶⁸ Es gibt nicht für alle Parameter genormte Versuche und die Ergebnisse streuen stärker.

Bezug auf die Druckfestigkeit beizubehalten. Wenngleich keine Hinweise auf größere Veränderungen durch die Zementart vorliegen, wären aus wissenschaftlicher Sicht hier noch spezielle Versuche wünschenswert. Im Rahmen dieser Arbeit können allerdings keine über die Befestigungstechnik hinausgehenden Versuche durchgeführt werden.

Für Schwinden und Kriechen liegen nach [59] keine Hinweise für einen Einfluss der Zementart vor, weshalb von einer Berücksichtigung im Prüfprogramm ebenfalls Abstand genommen wird.

4.4 Einfluss des Zements auf Bohrlocherstellung und Rauigkeit der Bohrlochoberfläche

Die Beschaffenheit und Rauigkeit der Bohrlochoberfläche ist im Wesentlichen nur vom gewählten Bohrverfahren abhängig [62; 5]. Die Herstellung eines Bohrlochs ist mit der Zerstörung eines Teils des Betons verbunden. Die typischen Verfahren hierzu sind das Diamantbohren und Hammerbohren [1]. Beim Diamantbohren wird der Beton abrasiv abgetragen, beim Hammerbohren durch mechanische Energieeinwirkung pulverisiert [1]. Der erforderliche Energieaufwand bzw. der erzielbare Bohrfortschritt ist eine Funktion der Betonhärte, welche allerdings –wie bereits in Punkt 4.2 gezeigt werden konnte - nicht von der verwendeten Zementart abhängig ist.

Zum Einfluss der *Betongüte* auf die Qualität der Bohrlochoberfläche existieren in der Literatur voneinander abweichende Meinungen. UNTERWEGER [63] hat bei seinen Untersuchungen der Bohrlochrauigkeiten keinen Einfluss der Betongüte feststellen können, ELIGEHAUSEN, MALLÈE und SILVA [2] gehen davon aus, dass die Bohrlochwand mit zunehmender Betonfestigkeit zwar *glatter* wird, der „*Einfluss für die meisten (Verbundanker-) Produkte aber minimal*“ ist. Auch COOK et al. [9] erachten die Auswirkungen der Betondruckfestigkeit im üblichen Bereich⁶⁹ als vernachlässigbar. SPIETH [5] wiederum verweist auf die Abhängigkeit von der verwendeten Produktart.

Beurteilung des Einflusses

Aufgrund der vorliegenden Untersuchungen muss davon ausgegangen werden, dass der Einfluss der Zementart auf die Bohrlocherstellung marginal ist und allenfalls im Hinblick auf die Betonfestigkeit ein Zusammenhang feststellbar wäre. Auf den

⁶⁹ Von 20 bis etwa 60 MPa [9].

Parameter der Bohrlocherstellung wird in den praktischen Untersuchungen deshalb kein besonderes Augenmerk gelegt. Alle Versuche werden in nach dem gleichen Verfahren und mit den gleichen Geräten hergestellten Bohrlöchern durchgeführt.

Zum Einfluss auf die *Reinigung* des Bohrloches siehe Punkt 4.5.1 weiter unten.

4.5 Einfluss auf das Tragverhalten von chemischen Verankerungssystemen

Chemische Verankerungssysteme beruhen auf der vollständigen Ausfüllung des Bereichs zwischen Anker und Bohrlochwand. Diese Systeme haben dadurch den großflächigsten Bezug zum Beton. Im Interfacebereich zwischen Beton und Verbundmörtel bzw. Verbundharz kommt es zu Wechselwirkungen verschiedenster Art, welche sich je nach Art des verwendeten Systems unterscheiden [64]. Die genaue Wirkungsweise des Verbunds und das Zusammenspiel zwischen Harz bzw. Mörtel und Beton sind in der Literatur bisher nicht bis in alle Einzelheiten befriedigend dargestellt worden. So kann nach COOK et al. [9] der Einfluss der *Betondruckfestigkeit* auf das Verhalten der Systeme vernachlässigt werden, andere Quellen [1] sehen dagegen sehr wohl einen Einfluss des Betons auf das Tragverhalten. Generell kann gesagt werden, dass der Beton nur dann für Verbundankersysteme interessant ist, wenn Betonausbruch bzw. Bruch an der Grenzfläche Beton-Verbundmörtelkörper maßgebend ist [5].

Einen weiteren wichtigen Punkt in der Betrachtung des Einflusses der Zementart stellt das verwendete Verbundmörtelsystem dar, denn es ist offensichtlich, dass Systeme, die mit dem Beton reagieren bzw. chemisch in Interaktion treten (z.B. zementhaltige Systeme), anderen Einflüssen unterliegen als beispielsweise Epoxidharzsysteme.

Einen guten Überblick über das Verhalten von eingemörtelten Systemen gibt SPIETH [5], der sich allerdings hauptsächlich auf gerippte Bewehrungsseisen bezieht. Er bezeichnet den Einfluss des Verbundmörteltyps als „*dominant*“, weitere wichtige Einflüsse erkennt er in „*Bohrlochreinigung, Umwelt- und Temperatureinflüssen, Einfluss des Stabdurchmessers und des Ringspalts, Randabstand und Verankerungslänge*“. Der Einfluss des Verbundmörteltyps und der Bohrlochreinigung werden aufgrund des Zusammenspiels mit dem Beton auch für diese Arbeit als interessant betrachtet.

Beurteilung der Relevanz für die experimentellen Untersuchungen

Das Verhalten von chemischen Verankerungssystemen in Betonen mit unterschiedlichen Zementarten wird aufgrund der vorliegenden Rechercheergebnisse in den

Prüfplan aufgenommen, wobei besonders der Grenzbereich (Interface) zwischen Beton und Verbundmasse beobachtet werden soll. Dabei sollen verschiedene Mörteltypen untersucht werden.

4.5.1 Einfluss auf die Bohrlochreinigung

Die Reinigung des Bohrlochs ist prinzipiell ebenfalls eine Funktion der Bohrlochoberfläche und des gewählten Bohrverfahrens [62; 63; 1; 5]. Zu den Unterschieden zwischen Betonen, welche mit unterschiedlichen Zementarten hergestellt wurden, liegen allerdings keine Untersuchungen vor. Auch die Unterschiede in den Eigenschaften des Bohrmehls sind nicht bekannt.

Die Reinigung ist besonders bei Verbundankern, die mit Injektionssystemen verarbeitet werden, ein kritischer Punkt. Zu geringe oder nicht den Herstellerangaben entsprechende Reinigung kann auch bei sonst optimalen Bedingungen zu einem vorzeitigen Versagen des Systems führen. Gute Ergebnisse werden mit einer Kombination aus (Hand-) *Bürsten und Druckluft* erzielt [5]; die meisten Hersteller schreiben diese Art der Reinigung vor.

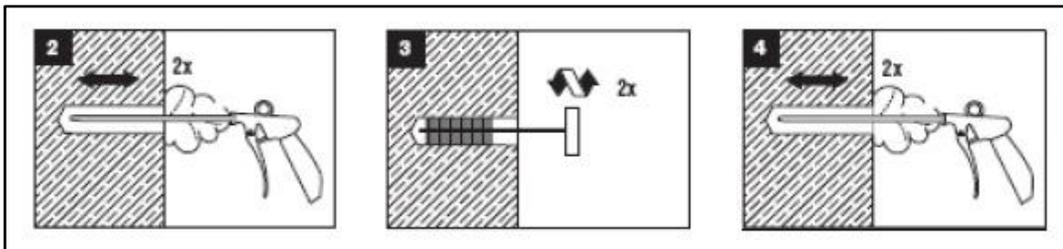


Abbildung 31: Auszug aus der ETA-07/0260 [65]: Reinigungsanleitung für das Injektionsmörtelsystem HILTI HIT-RE 500-SD

Die Reinigung hat aber nicht nur Einfluss auf die Höhe der erreichbaren Bruchlast. Auch das Last-Verschiebungs-Verhalten vor dem Erreichen der Bruchlast ist von der Reinigung abhängig, wie SPIETH in [5] darstellt. So ist das Verhalten *weicher* und die *Streuung höher*.

Beurteilung der Relevanz für die experimentellen Untersuchungen

Wenngleich aufgrund der geringen Unterschiede in den Reaktionsprodukten der Zementarten⁷⁰ davon ausgegangen werden muss, dass die Bohrlochreinigung nicht durch die verwendete Zementart beeinflusst ist, wird dieser Parameter in das Prüfprogramm aufgenommen, zumal die Durchführung keinen besonderen Aufwand erfordert.

⁷⁰ Vgl. Punkt 3.6 ab Seite - 37 -

4.5.2 Andere Einflüsse auf Verbundanker

Verbundanker sind bekanntlich empfindlich gegenüber verschiedenen Einflüssen wie beispielsweise:

- Temperatur
- Aushärtezeit
- Bohrverfahren
- Feuchtigkeit im Bohrloch
- Einbindetiefe

Es liegt kein Hinweis vor, dass einer dieser Parameter von der Zementart beeinflusst sein könnte, weshalb sie im Versuchsprogramm auch nicht berücksichtigt werden. Ihr Einfluss soll so weit wie möglich eingeschränkt werden.

4.6 Einfluss der Zementart auf die Hydratation, die Permeabilität, die Porosität und die Dauerhaftigkeit des Betons

Die Dauerhaftigkeit des Betons ist einer jener Parameter, die durch gezieltere Zusammensetzung der Zementart positiv beeinflusst werden können [50], denn die Widerstandsfähigkeit von Beton gegenüber verschiedenen Angriffen wird in erster Linie durch die Dichtigkeit der Zementsteinmatrix bestimmt [59].

Kennwerte der Dauerhaftigkeit sind nach [50] „*der Carbonatisierungswiderstand, der Widerstand gegenüber eindringenden Chloriden, der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand sowie der Widerstand gegen chemischen Angriff*“.

Die Dichtigkeit des Beton- und Zementsteins steht in untrennbarer Verbindung mit der Permeabilität und der Porosität. Es muss festgehalten werden, dass die Permeabilität nicht in linearem Zusammenhang zur Porosität steht [66]. Außerdem muss je nach Medium unterschieden werden, denn die Gaspermeabilität korreliert besser mit der Porosität als die Durchlässigkeit für Wasser und andere flüssige Medien, bei denen die Art und Beschaffenheit der Poren eine größere Rolle spielt als die Anzahl und das absolute Volumen der Poren [66]. Wichtigster Parameter für die Porosität und die Art der Poren ist der W/B-Wert⁷¹ wie in Abbildung 32 dargestellt.

⁷¹ Hier noch als w/z-Wert bezeichnet

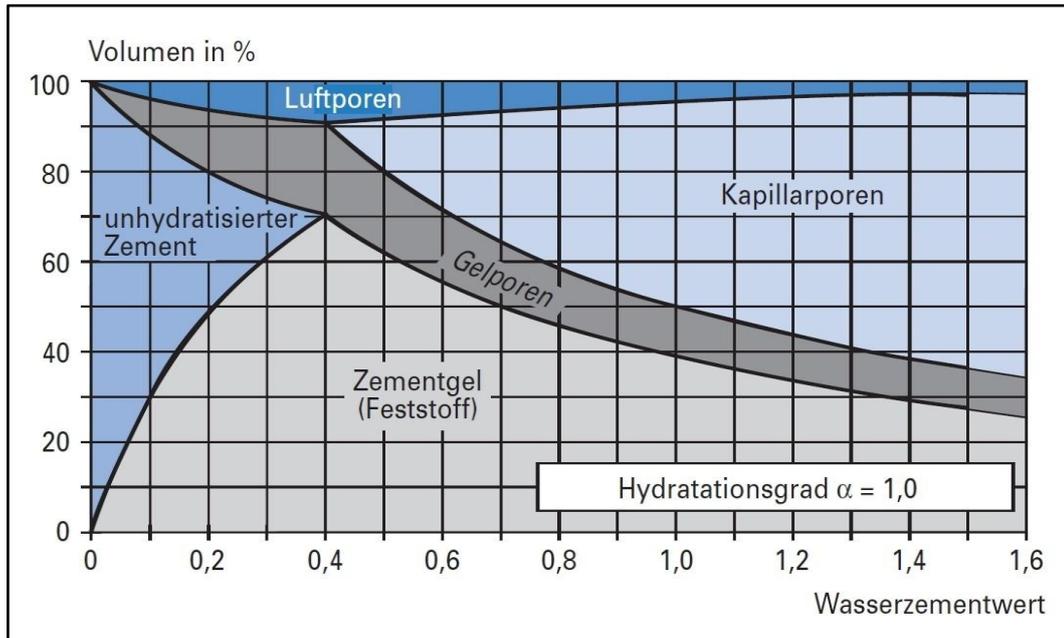


Abbildung 32: Phasenverteilung im Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert. Aus [19].

Neben diesem Anteil des Wasserzementwertes⁷² und dem wichtigen Anteil der Betonnachbehandlung [26] an der Phasenverteilung ist aber sehr wohl auch eine Beeinflussung durch die Bestandteile des Zements gegeben. Diese Einflüsse spielen sich aber vor allem im Bereich der Gelporen⁷³ ab, welche allerdings um Größenordnungen kleiner⁷⁴ sind als die Kapillarporen. Der Anteil der Zementart im Stoffgemisch Beton bleibt daher auch von diesem Gesichtspunkt aus gering.

Auch die Hydratation und Hydratationsgeschwindigkeit ist durch das Verhältnis der Zementhydratphasen und damit durch die Zementart beeinflusst, bei entsprechender Nachbehandlung⁷⁵ und optimaler Abstimmung des W/B-Wertes kann aber auch für diesen Punkt kein negativer Einfluss festgestellt werden.

Beispiele für den Einfluss von Zementbestandteilen sind die Beigabe von Hochofenschlacke oder Puzzolanen, wodurch das Gefüge verdichtet, der Porenanteil gesenkt [50] und der Verbund zwischen Zementstein und Zuschlagkorn verbessert wird [56]. Für *Portlandkalksteinzement* liegt eine Untersuchung von TSIVILIS et al. [66] vor, welche von keinem nennenswerten Einfluss auf die Permeabilität ausgeht, wengleich gewisse Veränderungen zu beobachten waren. Für die meisten Angriffe

⁷² Bestimmt den Anteil der Kapillarporen, diese werden durch nicht für die Hydratation benötigtes Wasser gebildet und gefüllt.

⁷³ Vom w/z Gehalt sind die Gelporen weitgehend unabhängig [19].

⁷⁴ Im Durchschnitt 1/1000 [19].

⁷⁵ Zum Einfluss der Nachbehandlung vgl. z.B. [76]

(Frost-Tauwechsel, Karbonatisierung usw.) auf den Beton zeigt sich deshalb auch nach LOTHENBACH et al. [36] für Portlandkalksteinzement kein anderes Verhalten als für Portlandzement. Das Phänomen, das als „*Thaumasite form of sulfate attack (TSA)*“ in der Literatur zu finden ist und einen möglichen Einfluss von Kalksteinfüller im Zement und kalkreichen Zuschlägen im Beton auf den Widerstand gegen Sulfatangriff thematisiert, wird derzeit noch untersucht [67]. Nach den vorliegenden Quellen ist aber kein negativer Einfluss von Kalkstein als Zementbestandteil bei ansonsten richtig angepassten Randbedingungen gegeben [68].

Für die anderen Zementhauptbestandteile gilt sinngemäß Ähnliches. Es bestehen gewisse Unterschiede, z.B. in Form einer schnelleren Karbonatisierung bei kalkarmen Zementen⁷⁶ [59]. Die Einschränkungen in der Verwendung, wie sie derzeit bestehen⁷⁷, sind aber nicht immer gerechtfertigt und aufgrund neuerer Forschungsergebnisse zu überdenken [26].

Beurteilung des Einflusses

Für die Befestigungstechnik ergeben sich aus der Permeabilität und der Porosität allenfalls sekundäre Fragestellungen. Da die entsprechenden Parameter außerdem neben der Verdichtung, der Art des verwendeten Zuschlagkorns usw. nur gering von der Zementart beeinflusst scheinen, wird eine Berücksichtigung in den praktischen Untersuchungen als nicht notwendig bzw. nicht sinnvoll erachtet.

Für das Eindringverhalten von Verbundharzen in die Betonsteinmatrix ergeben sich durch die relativ große Zähigkeit dieser Stoffe, verbunden mit der geringen Porengröße, keinerlei Auswirkungen.

4.7 Einfluss der Zementart auf die Eigenschaften des Frischbetons

Für die Eigenschaften des Frischbetons ist der *Wasseranspruch* ausschlaggebend. Dieser hängt stark von der Partikelgrößenverteilung ab [19], welche, wie in Teil 3 verschiedentlich aufgezeigt wurde, sehr wohl von der Zementart abhängig ist. Die Beimengung von anderen Zementhauptbestandteilen als Klinker kann bei ansonsten gut eingestellten Randbedingungen zu einer Verbesserung der Korngrößenverteilung und somit zu Zementleim mit besseren Verarbeitungseigenschaften führen. Allerdings sind auch Verschlechterungen möglich, hier haben allerdings die Mahl-

⁷⁶ z.B. Hüttensand- oder Flugaschezemente

⁷⁷ Vgl. Tabelle 7 Seite - 55 -

technologie und die Zementherstellung einen wesentlich größeren Einfluss als die chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Zementhauptbestandteile [19].

Allgemein muss festgestellt werden, dass die Anwendung von Zement zur Herstellung von Beton immer eine Optimierungsfrage darstellt [26] und somit nicht von einer generellen Verbesserung oder Verschlechterung ausgegangen werden kann.

Beurteilung des Einflusses auf die Befestigungstechnik

Die Befestigungstechnik befasst sich mit dem Baustoff Beton erst im gehärteten Zustand, weshalb die Eigenschaften des Frischbetons in dieser Arbeit nur am Rande interessieren. Es kann aber festgehalten werden, dass es auch für diesen Parameter keinen Grund zu geben scheint, der eine Anwendung von verschiedenen Zementhauptbestandteilen von vornherein ausschließt.

4.8 Andere Einflüsse

Vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Einfluss der Zementart auf die in der Befestigungstechnik wichtigen Eigenschaften des Betons. Die Auswirkungen sind -wie bei den verschiedenen Punkten gezeigt werden konnte- sehr gering.

Es sei darauf hingewiesen, dass andere Parameter, beispielsweise die Veränderungen der Betoneigenschaften durch Fließmittel, Nachbehandlungsmittel, Trennöle usw. unberücksichtigt bleiben.

Heute werden beispielsweise in Deutschland 90% der Betone mit Zusatzmitteln hergestellt [26]. Es scheint hier noch größeren Forschungsbedarf zu geben als im Zementbereich, da kaum Untersuchungen zu den Auswirkungen von Zusatzmitteln vorliegen.

4.9 Programm für experimentelle Untersuchungen

Bei den experimentellen Untersuchungen können aufgrund des verhältnismäßig großen Aufwandes nur eine Zementart und eine Referenzzementart herangezogen werden. Die Versuche sollen in ungerissenen Montageplatten durchgeführt werden. Um externe Einflüsse soweit wie möglich auszuschließen, werden diese beim gleichen Hersteller bestellt, zusammen transportiert und unter gleichen Bedingungen gelagert. Die Versuche in den beiden Platten sollen möglichst gleichzeitig durchgeführt werden.

Die Dübel und Verbundanker sind handelsübliche Produkte mit mittleren Durchmessern.

4.9.1 Versuche mit Betonausbruch

Das Ausbrechen eines Betonkegels „*concrete cone failure*“ ist bei vielen Verankerungssystemen maßgebende Versagensart⁷⁸, gleichzeitig kann ein System nie mehr als die Betonbruchlast verankern. Aus diesem Grund und aus dem Gedanken, dass ein Versagen des Betons den Einfluss der Zementart am unmittelbarsten wiedergibt, muss ein Versuch zur Betonkapazität als Referenzwert Ausgangspunkt einer derartigen Untersuchung sein [69].

Bei der Suche nach einem geeigneten System gelangt man zwangsläufig zu einem Hinterschnittdübel, der die Last durch Formschluss überträgt und somit -vorausgesetzt es gibt kein Stahlversagen- immer zu einem Betonausbruch führt.

Die Versuche werden mit weiter Abstützung durchgeführt, auch der Rand und die Bewehrung des Prüfkörpers sollen keinen Einfluss auf den Bruchkegel haben.

Es werden zwei Serien mit jeweils fünf Versuchen vorgesehen.

4.9.2 Versuche mit Verbundankern

Bei den Verbundankersystemen wird aufgrund des *dominanten Einflusses des Verbundmörtels* [5] auf das Tragverhalten die Untersuchung von zwei Systemen angestrebt. Auch verschiedene Reinigungsgrade sollen untersucht werden. Um Versagen an den Grenzflächen zu erzwingen, werden die Versuche mit enger Abstützung⁷⁹ durchgeführt.

Es werden folgende Versuche vorgesehen:

- eine Serie mit zwei Systemen mit Reinigung laut Herstellerangaben
- eine Serie mit halber Reinigung
- eine Serie mit keinerlei Reinigung
- eine Serie mit über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung

4.9.3 Anpassung des Versuchsprogramms

Beim Versuchsprogramm werden die zur Verfügung stehenden Ressourcen an Zeit und Material bewusst nicht voll ausgenutzt, um bei hohen Streuungen oder interessanten Ergebnissen noch Versuchsserien einschieben zu können.

⁷⁸ Vgl. auch Kapitel 2.3 ab Seite - 8 -

⁷⁹ „confined tests“

4.10 Zusammenfassung

Vorliegendes Kapitel der Arbeit befasst sich mit den Auswirkungen der in Teil 3 beschriebenen Zemente und Zementbestandteile auf die in Teil 2 genannten Elemente und Bauteile der Befestigungstechnik. Dabei konnten keine großen Veränderungen und Abweichungen festgestellt werden. Es scheint, als ob die Befestigungselemente so flexibel seien, dass sie in Untergründen mit gewisser Variation der Eigenschaften mit ausreichender Sicherheit funktionieren können. Um bei Punkten, bei welchen die Informationslage in der Literatur als nicht ausreichend angesehen wurde, Klarheit zu schaffen, wird ein Versuchsprogramm erstellt. Das Versuchsprogramm wird in den folgenden Kapiteln ausgeführt und die Ergebnisse beleuchtet.

Allerdings muss festgehalten werden, dass der Zement im Baustoff Beton einen relativ gesehen konstanten Faktor darstellt. Zuschläge und Zusatzstoffe variieren in ihren Eigenschaften wesentlich stärker; hier besteht sicherlich noch Forschungsbedarf.

TEIL 5: EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN - DURCHFÜHRUNG

5.1 Einleitung

Anhand der in Teil 4 festgelegten Ziele werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur in Wien stehen dazu geeignete Einrichtungen zur Verfügung. Das Institut ist durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit für die Durchführung von Prüfungen an Metallankern nach ETAG 001, ACI 355.2 und ICC ES AC308 und für die Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit nach EN 12390-3 akkreditiert und bei der europäischen Kommission zur Bauproduktenrichtlinie notifiziert⁸⁰.

Diese Stellung des Instituts setzt „Know-How“ und Gerätschaften voraus, die dem Autor aufgrund seiner mehrjährigen Tätigkeit in der entsprechenden Arbeitsgruppe des Instituts in vollem Umfang für die Durchführung von Versuchen zur Verfügung standen.

5.2 Beschreibung der verwendeten Materialien

5.2.1 Betonprüfkörper

Die für die Versuche erforderlichen Betonprüfkörper der Festigkeitsklassen C20/25 werden von einem Fertigteilwerk hergestellt und geliefert, der Beton unterliegt dabei einer Qualitätskontrolle nach DIN 1084 [70]. Die Versuchskörper werden liegend in einer starren Schalung gefertigt und erreichen zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung ein Betonalter von mindestens 28 Tagen. Die Betondruckfestigkeiten werden an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Prüfkörper weisen die Abmessungen 190x190x30cm auf und haben eine Ringbewehrung am Rand.

Es wurden je Zementart zwei Prüfkörper und sechs Würfel angefertigt.

⁸⁰ *Accredited testing laboratory & notified body*

Tabelle 9: Betonzusammensetzung der Prüfkörper [70]

Betonzusammensetzung für 1m ³ Frischbeton [kg]			
Beton		C20/25 CEM I	C20/25 CEM II
Zement		240 CEM I 32,5 R	240 CEM II/A-LL 32,5 R
Zugabewasser		160	160
w/z		0,67	0,67
Zuschlag	0-2	790	783
	2-8	504	500
	8-16	738	750

5.2.2 Zement

Zementtyp 1 ist ein Portlandzement CEM I 32,5R [70]. Er enthält 95-100 Massenprozent Portlandzementklinker und bis zu 5% anorganische Nebenbestandteile.

Zementtyp 2 ist ein Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL 32,5R [70]. Es handelt sich hierbei um einen Zement, dem nach dem Sintervorgang (80-94% Portlandzementklinker) noch 6-20 („A“) Massenprozent Kalkstein mit bis zu 0,2 Massenprozent organischer Substanz („LL“) zugemahlen werden. Auch dieser Zementtyp kann bis zu 5% Nebenbestandteile enthalten.

Die exakte Zusammensetzung kann innerhalb der Grenzen schwanken und ist zudem Betriebsgeheimnis der Hersteller (war also nicht in Erfahrung zu bringen).

5.2.3 Hinterschnittanker

Für die Versuche kommt ein Hinterschnittanker in der Gewindegröße M12 zur Anwendung (Hülsendurchmesser 18 mm). Es handelt sich um einen Stahldübel, der in ein hinterschnittenes Bohrloch formschlüssig gesetzt und wegkontrolliert verankert wird. Dazu wird die Spreizhülse des Dübels über einen Gewindebolzen, welcher am unteren Ende eine konische Aufweitung aufweist, geschlagen. Bei erfolgreichem Setzvorgang wird dabei eine Markierung sichtbar.

Der Anker kann nur mit einem entsprechenden Bohrer und einem abgestimmten Setzgerät verwendet werden.

5.2.4 Verbunddübel

Für die Versuche werden Gewindestangen M12 der Festigkeitsklasse 12.9 verwendet, um Stahlversagen auszuschließen.

Tabelle 10: Eigenschaften und Parameter der verwendeten Gewindestangen

Eigenschaften der Gewindestangen M12 12.9			
Länge	l	[mm]	140
Nenndurchmesser	\varnothing	[mm]	12
Spannungsquerschnitt	A_S	[mm ²]	84,3
Streckgrenze	$f_{y,k}$	[N/mm ²]	1080
Kraft bei Streckgrenze	$F_{y,k}=f_{y,k} \cdot A_S$	[kN]	91
Zugfestigkeit	$f_{u,k}$	[N/mm ²]	1200
Bruchlast	$F_{u,k}=f_{u,k} \cdot A_S$	[kN]	101

Die Gewindestangen werden über eine effektive Verankerungslänge von 96 mm eingebunden, was $8 \cdot d_s$ entspricht. Die Verbundwirkung entsteht durch die folgenden Mörtelsysteme:

a) Injektionsmörtel Typ A

Es handelt sich hierbei um ein Injektionsmörtel-Hybridsystem mit Harz, Härter und Zement-Wasser-Komponente. Die Komponenten sind in einem Foliengebilde verpackt, und werden mit einem Auspressgerät über einen Statikmischer in das Bohrloch verfüllt.

Die Zeit bis zur vollen Belastbarkeit wird in den Herstellerangaben bei 20°C mit 50 Minuten angegeben.

b) Injektionsmörtel Typ B

Es handelt sich hierbei um ein Injektionsmörtel-Epoxydharzsystem mit Zement, Wasser und Sand. Das System wird in einem Foliengebilde verpackt geliefert. Mit einem passenden Auspressgerät wird das System über einen Statikmischer in das Bohrloch verfüllt und anschließend der Anker in den frischen Mörtel gesetzt.

Die Zeit bis zur vollständigen Aushärtung beträgt bei 20°C 12 Stunden.

5.3 Beschreibung der verwendeten Geräte

5.3.1 Prüfmaschine IKI-02

Die Anlage „IKI-02“ besteht aus einem rechteckigen, auf Rollen verschiebbaren Prüfrahmen, an dessen Horizontale und Vertikale sich jeweils ein Hydraulikzylinder mit einem Lastbereich von bis zu 630kN befindet. Zusätzlich hat die Anlage in der horizontalen Ebene einen zweiten Zylinder, der Lasten bis zu 2000kN auf Zug aufbringen kann.

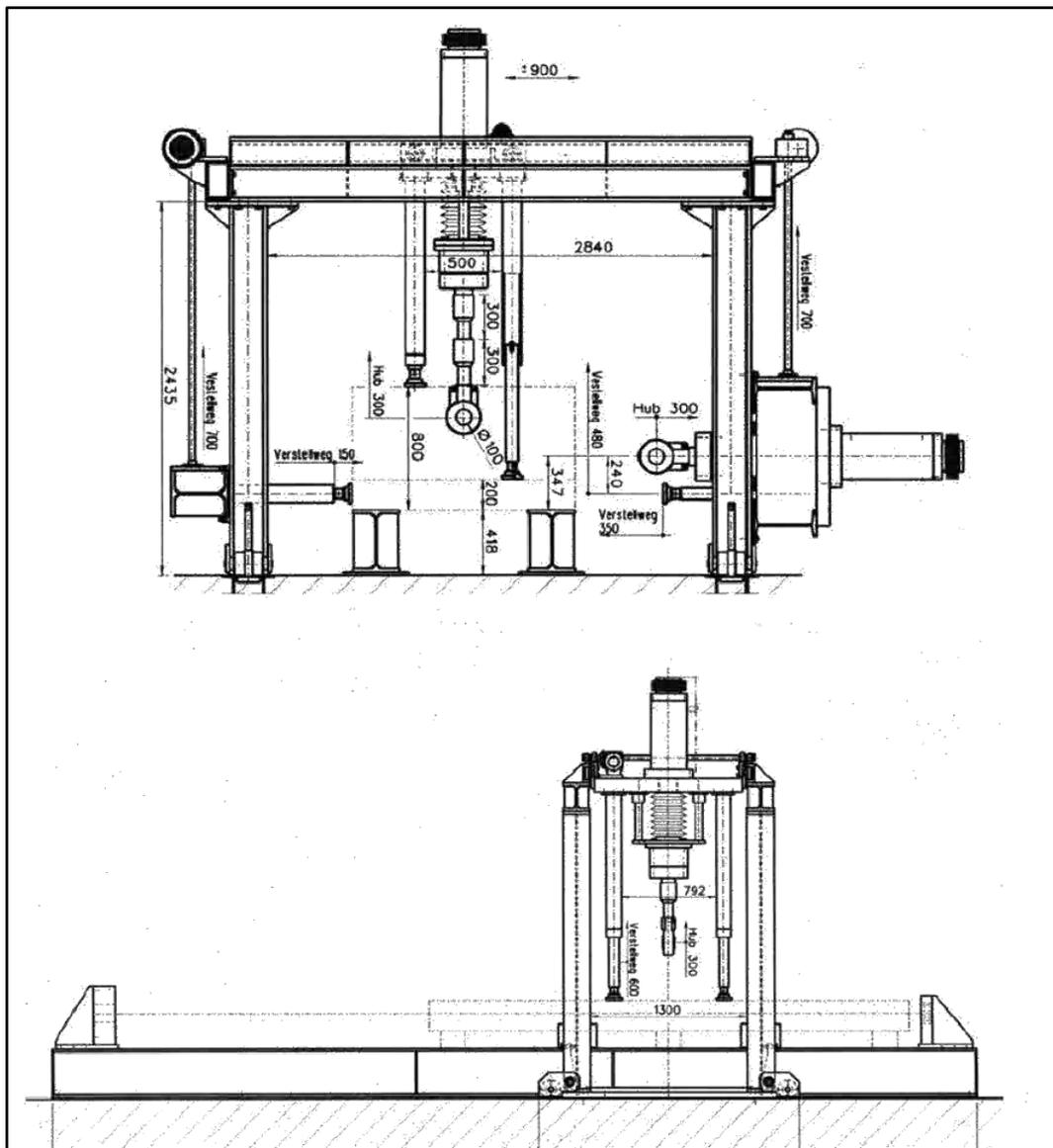


Abbildung 33: Ansicht der Prüfmaschine

Für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurde ausschließlich der vertikale Prüfzylinder („Kreis 1“) verwendet. Für die Abstützung des Zylinders gegen den Verankerungsgrund stehen vier höhenjustierbare Stempel zur Verfügung. Diese sind in der Verankerungsebene verschiebbar, sodass die Einstellung auf die von der Ankergröße abhängigen Betonausbrüche ermöglicht wird.

Die Signale werden digitalisiert, an eine zentrale Steuereinheit übertragen und dort ausgewertet, weiterverarbeitet und gespeichert. Die gesamte Messkette ist kalibriert und weist im verwendeten Bereich der Kraft eine erweiterte relative Messunsicherheit kleiner 1% auf. Für das Wegsignal beträgt die erweiterte relative Messunsicherheit weniger als 0,5 % [71].

5.3.2 Bohrmaschinen und weitere Hilfsmittel

Sämtliche Bohrlöcher für die Versuche werden mit einem Bohrhammergerät der 2 kg-Klasse mit 650 W Leistungsaufnahme und SDS-Plus Anschluss bzw. einem Kombihammergerät der 5 kg-Klasse mit 900 W Leistungsaufnahme und SDS-Max Aufnahme (Adapter auf SDS-Plus) erstellt.

Die Bohrlöcher werden, mit Ausnahme des Hinterschnitts, mit Bohrständer gebohrt. Die Durchführung des Bohrvorganges erfolgte nach den Vorgaben der Hersteller.

Für die Versuche werden außerdem noch ölfreie Druckluft, Stahldrahtbürsten zur Bohrlochreinigung, eine Betondruckprüfmaschine, verschiedene Drehmomentschlüssel und weitere Hilfsmittel verwendet.

5.4 Versuchsaufbau und Durchführung

5.4.1 Allgemein

Alle Versuche werden vor dem Hintergrund der Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den beiden verwendeten Zementarten ausgeführt. Aus diesem Grund werden die Versuche immer in beiden Zementarten unmittelbar aufeinander folgend durchgeführt und die Randbedingungen soweit wie möglich konstant gehalten, was durch die während der Versuchsreihen nebeneinander liegenden Platten (siehe Abbildung 34) erreicht wurde.

Die Durchführung der Versuche orientiert sich an den Bestimmungen der ETAG 001 Annex A [10]. So handelt es sich beim Versuch mit den Hinterschnittankern um einen Versuch laut ETAG 001 Teil 1 Punkt 5.4/1 zur Bestimmung des charakteristischen Widerstands bei Zuglasten.



Abbildung 34: Versuchsaufbau

5.4.2 Versuche mit Hinterschnittdübeln

Bei den Versuchen mit den Hinterschnittankern ist das Ziel einen ungehinderten Betonausbruch zu erreichen. Durch die Wahl der Achsabstände der Dübel ($>>3 h_{ef}$) und die großzügige Abstützweite wird diese Vorgabe erreicht.

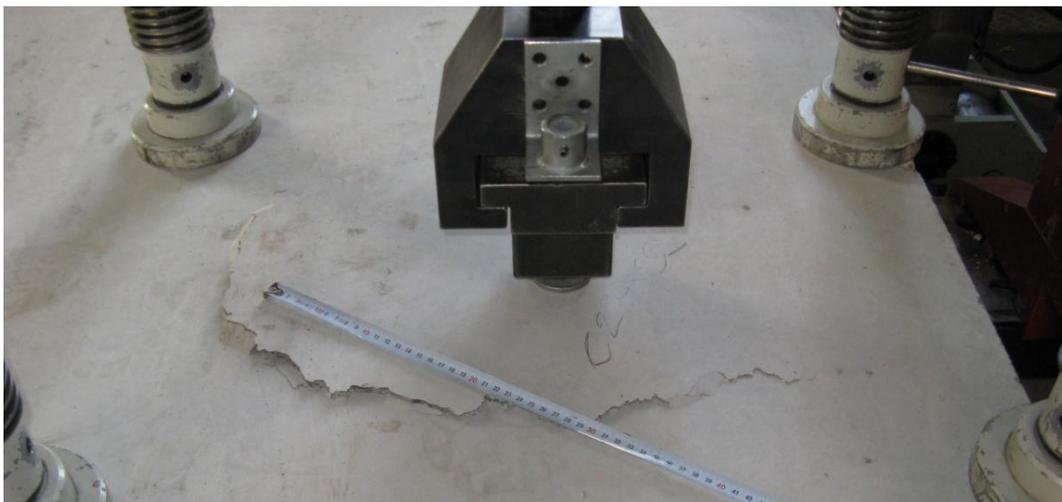


Abbildung 35: Unbehinderter Betonausbruch

Die Herstellung des Hinterschnitts erfolgte nach den Herstelleranweisungen, und stellte in der Durchführung kein Problem dar.

Die Auszugsgeschwindigkeit wird für die Hinterschnittdübel auf einen Wert von 0,08 mm/s festgelegt, womit –wie in der ETAG 001 gefordert [10]– die Höchstlast nach einer Versuchsdauer von einer bis zu drei Minuten erreicht wird.

5.4.3 Versuche mit Verbundankern

Bei den Versuchen mit den Verbundmörtelsystemen ist besonders das Verhalten an den Grenzflächen von Interesse. Aus diesem Grund werden alle Versuche „confined“ gefahren, d.h. dass eine enge Abstützung in Form eines Loches gewählt wird. Die Abmessungen des Loches werden in der ETAG 001 Part 5 [10] mit $1,5 - 2 \cdot d_0$ angegeben, die gewählte Platte hat ein Durchgangsloch von 18,4 mm, was bei Ankerstangen mit $d_s = 12\text{mm}$ den Vorgaben entspricht.

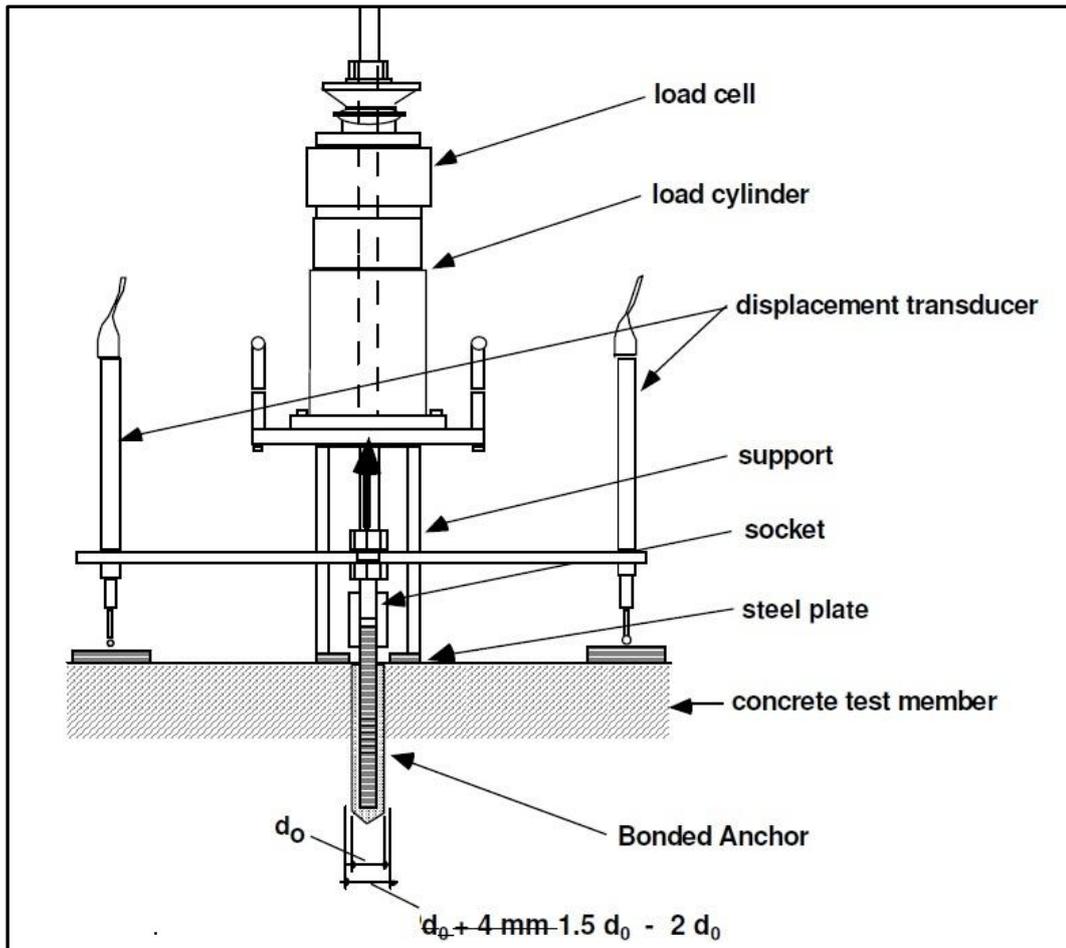


Abbildung 36: Confined Test aus ETAG 001 Part 5 [10].

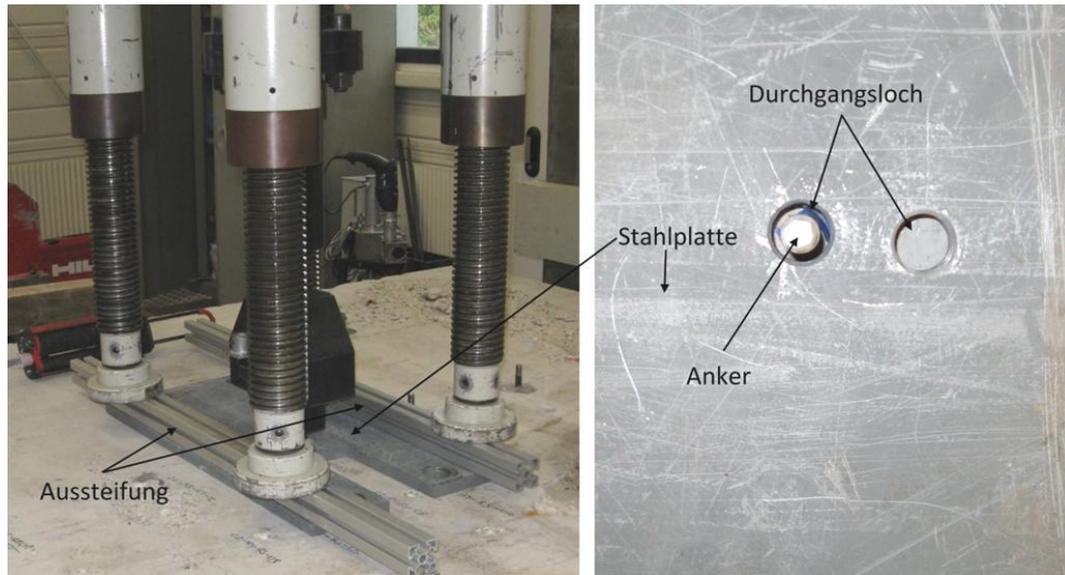


Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Versuche an den Verbunddübeln

Die Auszugsgeschwindigkeit für die Verbunddübel wird auf 0,03 bzw. 0,05 mm/s festgelegt, um die geforderte Versuchsdauer von ein bis drei Minuten (bis Bruchlast) zu erreichen (vgl. auch Punkt 5.4.2).

5.4.4 Versuche mit unterschiedlichen Reinigungsstufen

Wie im Versuchsprogramm vorgesehen werden die Versuche mit den Verbundankersystemen auch um den Parameter „Bohrlochreinigung“ erweitert. Dazu werden die Versuche zunächst mit den *Reinigungsvorgaben der Hersteller* durchgeführt. Die weiteren Reinigungsstufen sind *„Hälfte der vorgegebenen Reinigung“*, *„keine bzw. minimale Reinigung“* und *„optimale bzw. über die Herstellerangaben hinausgehende Reinigung“*.

Die Durchführung der Reinigung ist, ebenso wie die benötigten Mittel, in den Herstellerangaben angeführt. Verwendet wurde ölfreie Druckluft und eine vom Hersteller mitgelieferte Stahldrahtbürste.



Abbildung 38: Stahldrahtbürste zur Bohrlochreinigung

5.5 Betrachtung möglicher Fehler und Messabweichungen

Messungen sind grundsätzlich als fehlerbehaftet anzusehen, da es praktisch nicht möglich ist, exakt richtig zu messen [72]. Die Aufgabenstellung der vorliegenden Diplomarbeit stellt allerdings keine großen Anforderungen an die Messtechnik. Die in Kapitel 5.3.1 beschriebene Anlage genügt allen Ansprüchen.

Die zu den groben Fehlern zu zählende Beeinflussung der Versuche durch die Arbeitsweise von verschiedenen Prüfern kann ausgeschlossen werden, da alle Versuche durch den Autor selbst ausgeführt werden.

Wichtiger und für diese Arbeit jedenfalls interessanter ist die Veränderung der Messergebnisse durch Einflüsse von außen. Diese Einflüsse sind systematischer Natur, d.h. sie haben bekannte und – wenn unter Umständen auch schwierig [72] – in Betrag und Vorzeichen erfassbare Auswirkungen auf die Messergebnisse. Sie sollen möglichst ausgeschlossen werden.

Einflüsse zufälliger Natur können in mindestens einem der Merkmale *Amplitude*, *Vorzeichen* oder *Zeitpunkt des Auftretens* nicht vorhergesagt werden, sie sind daher nicht quantifizierbar, sondern lediglich (statistisch) *beschreibbar* [72].

5.5.1 Systematische Fehler

Durch die gleichzeitige Durchführung können Einflüsse aus Umgebungsfaktoren wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit weitgehend ausgeschlossen werden. Die verwendeten Maschinen und Geräte, insbesondere Bohrgeräte und Reinigungsgeräte, sind innerhalb einer Versuchsreihe in beiden Zementarten immer dieselben⁸¹. Durch diesen Umstand kann eine mögliche Abweichung vernachlässigt werden, da sie beide Versuchsserien in gleicher Weise betreffen und somit einen eventuellen Unterschied nicht verändern würde. Messabweichungen der Geräte sind durch regelmäßige Kalibrierung außerdem bekannt und durch entsprechende Wartung und Einstellung im Betrag vernachlässigbar.

Bei den Versuchen mit Verbunddübeln ist die Aushärtezeit ein wesentlicher Faktor. Durch entsprechende Planung der Setzvorgänge und der Versuchsdurchführung wird auch dieser Einfluss minimiert.

⁸¹ Siehe Kapitel 4.4 und 4.5.1.

Von den a priori bekannten Einflussgrößen variiert im Idealfall zwischen den verschiedenen Messreihen nur die Zementart, deren Einfluss ja gesucht ist und quantifiziert und bewertet werden soll. Allerdings muss festgehalten werden, dass es in der Natur der Sache einer experimentellen Untersuchung begründet liegt, dass nicht alle Einflüsse von vornherein feststehen. Es ist also auch bei großer Sorgfalt möglich, dass unerkannte, systematische Messabweichungen und Messbeeinflussungen vorliegen. Sofern solche Einflüsse im Nachhinein erkennbar werden, führt das zu einer Ablehnung⁸² der Versuchsergebnisse⁸³.

5.5.2 Zufällige Fehler

Bei der Durchführung von Messungen gibt es immer Einflüsse, welche nicht erfasst und/oder auch bei großem Aufwand nicht ausgeschlossen werden können. Sie beeinflussen das Resultat der Messung in nicht vorhersehbarer Weise.

Zufällige Abweichungen sind im Rahmen der durchgeführten Messungen vor allem folgenden Faktoren zuzuschreiben:

- Beton
- Setzvorgang
- Unbekannte Einflüsse

Beton ist im großen Maßstab ein homogener Baustoff mit isotropen Eigenschaften. Im Zusammenhang mit der Befestigungstechnik muss dieses Bild allerdings differenziert betrachtet werden. Die Art und Lage der Zuschlagskörner in der Zementsteinmatrix kann z.B. sowohl den Bohrvorgang als auch die Bohrlochreinigung und das Setzen des Dübels beeinflussen. Für diese Arbeitsschritte summiert sich dann unter Umständen der zufällige Einfluss, denn auch die Bohrlochreinigung und der Setzvorgang an sich unterliegen zufälligen Schwankungen.

⁸² Vgl. auch Kapitel 6.4 weiter unten.

⁸³ Es wäre auch eine Berücksichtigung durch einen Korrekturterm möglich, dazu müsste aber der genaue Betrag bekannt sein.

5.6 Zusammenfassung

Im Teil 5 der Arbeit wird die praktische Durchführung des in Teil 4 festgelegten Versuchsprogramms geplant und die Details werden festgelegt. Es werden Versuche mit Hinterschnittankern und mit zwei verschiedenen Verbundmörtelsystemen ausgeführt. Die Durchführung der Versuche wird erläutert und die dazu benötigten Materialien, Geräte und Maschinen werden vorgestellt. Ein Teil des Kapitels widmet sich den Unsicherheiten und Störfaktoren, die im Rahmen eines Messprogramms auftreten können.

Die Ergebnissen und ihre Interpretation werden im nun folgenden Teil 6 vorgestellt.

TEIL 6: VERSUCHSERGEBNISSE

6.1 Einleitung

Dieser Teil der Arbeit beschreibt die Ergebnisse der Versuche. Die Resultate werden auch tabellarisch und in Form von repräsentativen Kurven aufgelistet. Das Verhalten der Anker während der Versuchsdurchführung wird soweit wie möglich erfasst, wobei Besonderheiten und Auffälligkeiten vermerkt werden. Eine Interpretation der Daten wird in diesem Teil der Arbeit nicht vorgenommen.

6.2 Grundlagen der Versuchsauswertung

Den Berechnungen der statistischen Parameter wird, wo nicht anders angegeben, eine Normalverteilung der Versuchsergebnisse zugrunde gelegt. Werden bei einer Anzahl von n Versuchen die Höchstlasten $F_{u1}, F_{u2}, \dots, F_{un}$ ermittelt, berechnet man den Mittelwert $F_{u,m}$, Standardabweichung s_{Fu} , und Variationskoeffizient v folgendermaßen:

Formel 10: Berechnung Mittelwert

$$F_{u,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{ui} \text{ [kN]}$$

Formel 11: Berechnung Standardabweichung

$$s_{Fu} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{ui} - F_{u,m})^2} \text{ [kN]}$$

Formel 12: Berechnung Variationskoeffizient

$$v = \frac{s_{Fu}}{F_{u,m}} \cdot 100 \text{ [%]}$$

6.3 Nachbearbeitung von Versuchsergebnissen

Die Betonerhärtung ist auch nach dem 28. Tag nicht vollständig abgeschlossen, deshalb wurden bei den Versuchen mit Betonausbruch (Hinterschnittanker) jeweils zum Versuchszeitpunkt Betonprüfwürfel getestet und die Versuchsergebnisse mittels Formel 13 auf die Nennfestigkeit bezogen.

Formel 13: Normierung auf Betonnennfestigkeit

$$F_u = F_{u,test} \sqrt{\frac{f_{cc}}{f_{c,test}}} = F_{u,test} \sqrt{\frac{25}{f_{c,test}}}$$

Diese Methode ist auch Teil der ETAG 001 [10] und zumindest im verwendeten Bereich der Betondruckfestigkeiten gut verifiziert.

Die Maschinendaten werden, sofern notwendig⁸⁴, durch die Verwendung einer auf der Bildung eines gleitenden Durchschnitts beruhenden Methode geglättet.

Ansonsten werden die Versuchsdaten nicht bearbeitet oder in anderer Form verändert.

6.4 Ablehnung von Versuchsergebnissen

Prinzipiell werden alle Versuchsergebnisse für die Auswertung und Interpretation herangezogen.

Nicht in die weitere Beurteilung fließen allerdings Ergebnisse ein, welchen klar nachvollziehbare Fehler in der Versuchsdurchführung bzw. in der Messung zugrunde liegen. Fehler dieser Art sind:

- Überlappung der Ausbruchkegel
- Fehlstellen im Verbundmörtel⁸⁵

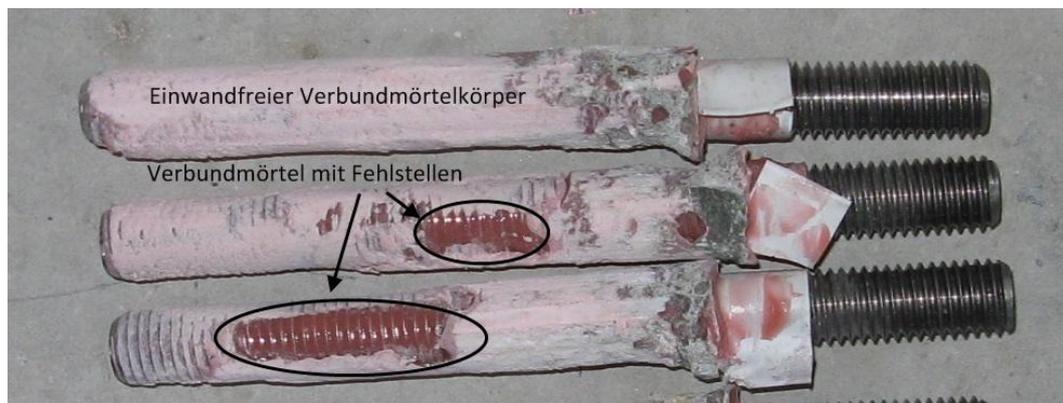


Abbildung 39: Klebefehler als Grund für die Ablehnung von Versuchsergebnissen.

Die Eliminierung von „Ausreißern“ aus den Daten ist – auch aufgrund der doch eher geringen Versuchsanzahl – nicht vorgesehen.

⁸⁴ Die Auflösung der Daten bildet auch geringes Rauschen ab, wie es z.B. aus den Schaltvorgängen der Servoventile des Ölkreislaufs der Prüfmaschine herrührt.

⁸⁵ z. B. durch einen Lufteinschluss. Nach [5] können bei einem Lufteinschluss keine Verbundspannungen übertragen werden und es liegen auch Hinweise vor, dass in der Nähe von Lufteinschlüssen eine unzureichende Erhärtung auftritt und der Verbund damit noch zusätzlich gestört wird.

6.5 Versuchsergebnisse Hinterschnittanker

6.5.1 Versagensart

Bei den Versuchen mit den Hinterschnittankern war, wie erwartet, immer Betonausbruch die Ursache des Versagens. Ein typischer Ausbruchkegel ist in Abbildung 40 dargestellt; die (sehr flachen) Neigungswinkel zur Betonoberfläche bewegten sich im Bereich von 1:5 bis 1:10 (80 cm im Durchmesser⁸⁶).



Abbildung 40: Ausbruchkegel eines Hinterschnittankers

6.5.2 Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten

Das Last-Verformungs-Verhalten der Hinterschnittanker entspricht den Erwartungen, die Höchstlast wurde bei Verschiebungen von 3,7 bis 7,5 mm erreicht. Nach der Bruchlast gibt es einen je nach Rissverlauf mehr oder weniger schnellen Abfall der Last. Es gibt kein ausgeprägtes Nachbruchverhalten.

In Abbildung 41 sind typische Last-Verformungs-Kurven dargestellt. Die Streuung der Versuchsergebnisse ist mit knapp 5% sehr gut.

⁸⁶ Entspricht $10 h_{ef}$ (!)

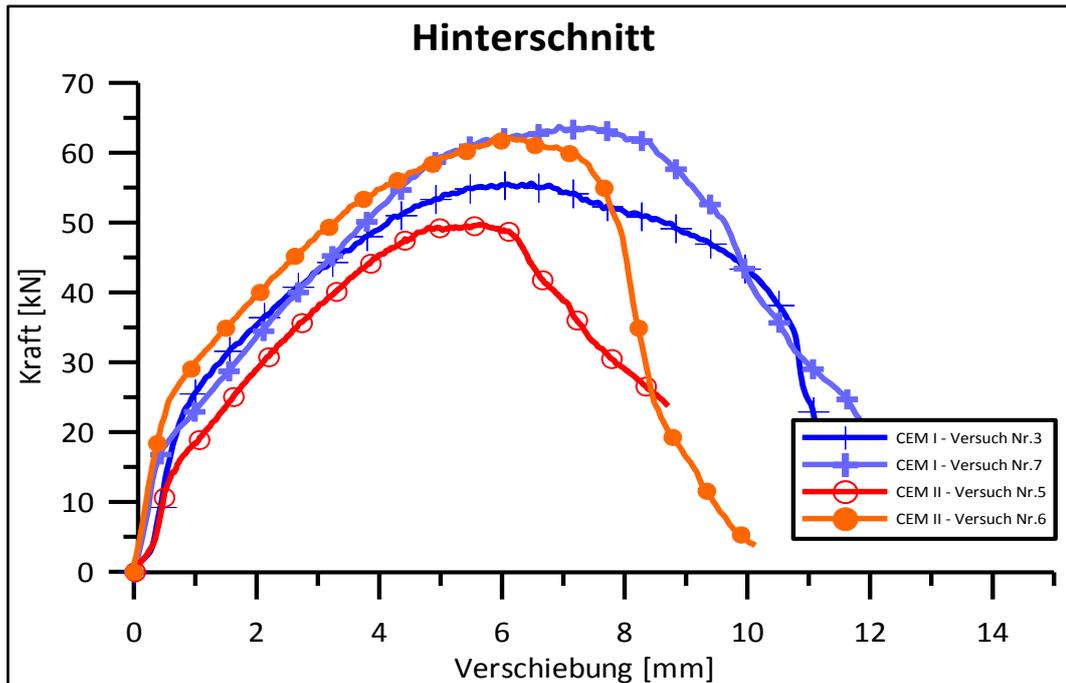


Abbildung 41: Last-Verschiebungs-Diagramm ausgewählter Versuche mit Hinterschnittankern.

Tabelle 11: Versuchsergebnisse Hinterschnittanker CEM I

Versuchsergebnisse „CEM I - Hinterschnitt“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Bruchlast normiert auf $f_{c,ref} = 25 \text{ N/mm}^2$
		[kN]	[mm]	[kN]
1	CEM I	61,47	5,61	56,01
2		56,32 (min)	6,47	51,32
3		60,37	3,67	55,01
4		61,92	4,19	56,42
5		58,10	3,96	52,94
6		69,89 (max)	4,56	60,45
7		64,18	6,94	55,51
8		62,51	5,50	54,06
9		64,87	5,50	56,11
10		61,27	5,11	52,99
Mittelwert:		62,09	5,15	55,08
CoV:			20,75%	4,56%

Tabelle 12: Versuchsergebnisse Hinterschnittanker CEM II

Versuchsergebnisse „CEM II - Hinterschnitt“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Bruchlast normiert auf $f_{c,ref} = 25 \text{ N/mm}^2$
		[kN]	[mm]	[kN]
1	CEM II	52,99	6,02	51,46
2		54,86	3,93	53,27
3		53,62	6,19	52,07
4		54,28	5,23	52,71
5		49,96 (min)	5,68	48,52
6		62,24	6,11	57,38
7		63,51 (max)	6,44	58,55
8		57,92	7,46	53,40
9		55,39	1,95	51,06
10		57,88	5,72	53,36
Mittelwert:		56,26	5,47	53,18
CoV:			27,9%	5,51%

6.5.3 Besonderheiten und Anmerkungen

Während der Versuchsdurchführung waren keine besonderen Begebenheiten zu verzeichnen. Bis auf zwei Versuche werden alle Versuchsergebnisse für die weitere Betrachtung und Untersuchung herangezogen. Bei den verworfenen Versuchen handelte es sich um einen Probeversuch, bei welchem der Setzvorgang nicht optimal verlief, und einen Versuch, der aufgrund der sich überschneidenden Ausbruchkegel für ungültig erklärt wurde. Diese beiden Versuche wurden bereits während der Durchführung ausgesondert und scheinen deshalb in obenstehenden Tabellen nicht auf. Auch auf den Versuchsprotokollen, die ab Seite A:2 im Anhang zu finden sind, sind diese Versuche nicht vermerkt.

Der auf die Betonfestigkeit normierte Mittelwert der Versuche in CEM I – Zement ist um 3,4% höher als im CEM II – Zement.

6.6 Versuchsergebnisse Verbundmörtelsysteme – Reinigung laut Herstellerangaben

6.6.1 Versagensarten

Bei den Versuchen mit dem Injektions-Verbundmörtelsystem „Typ A“ trat stets Versagen an der Grenzfläche zwischen Verbundmörtel und Gewindestange auf. Der Verbundmörtelkörper wird entlang der Gewindespitzen abgeschert und aus dem Bohrloch gezogen.



Abbildung 42: Grenzflächenversagen zwischen Gewindestange und Verbundmörtel.

Bei den Versuchen mit dem Epoxidharzsystem „Typ B“ war die Versagensursache deutlich weniger eindeutig feststellbar. Zumeist versagte das System an der Grenzfläche zwischen Beton und Verbundmörtelkörper, allerdings trat beinahe immer auch Versagen an der anderen Grenzfläche auf und auch die oberflächige Betonschicht wurde beschädigt. Aus diesem Grund kann „Mischbruch“ als vorherrschende Versagensursache angegeben werden⁸⁷.

⁸⁷ Laut ETAG 001 Teil 5 wird ein Versagen dieser Art nicht als Mischbruch definiert, sondern als „pull –out failure“. Ob Teile des „umgebenden Mörtels“ mit herausgezogen werden oder nicht, spielt in diesem Fall keine Rolle. Mischbruch laut dieser Definition wäre ein Betonausbruchkegel, der nicht an der tiefsten Stelle der Einbindung beginnt [10].



Abbildung 43: Mischbruch als Versagensursache beim verwendeten System „Typ B“

6.6.2 Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten

a) Typ A

Beim System „Typ A“ steigt die Kraft kontinuierlich bis zur Bruchlast an, der darauf folgende Abfall bis etwa zur Hälfte der Bruchlast geht sehr schnell vor sich. Auf diesem tieferen Niveau trägt das System, nunmehr ausschließlich über die Reibung im Verbundmörtel, einen Teil der Last weiterhin ab.

Die Streuung der Versuchsergebnisse ist mit wenig über 7% bzw. knapp 9% noch gut brauchbar.

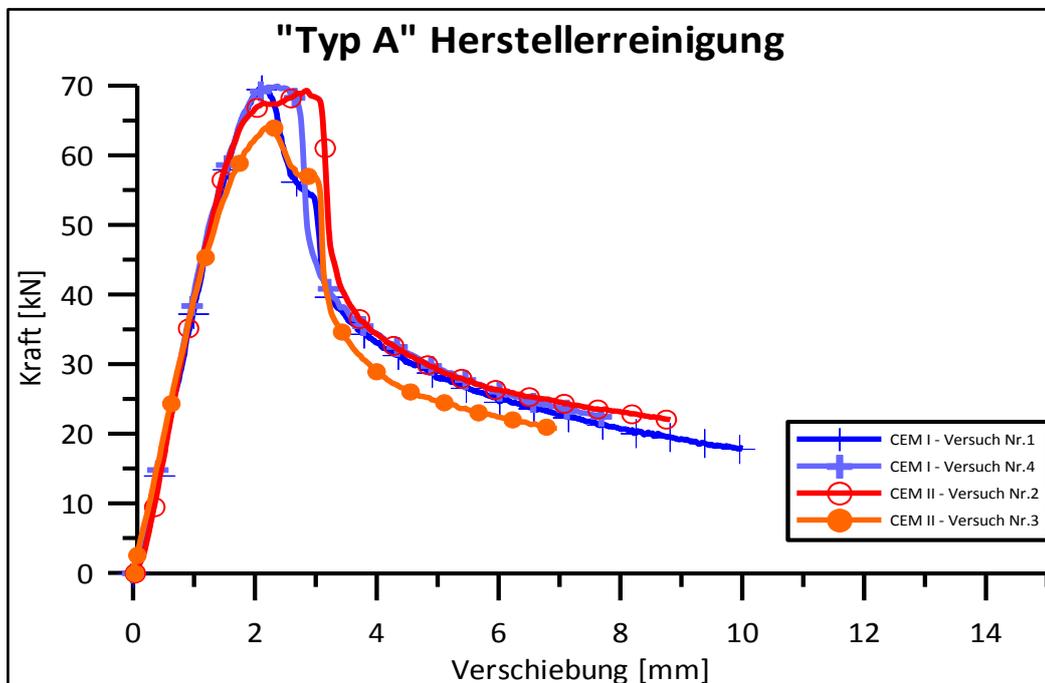


Abbildung 44: Typische Last-Verschiebungs-Kurven „Typ A“

Tabelle 13: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „Typ A“ bei Reinigung nach Herstellervorgabe

Versuchsergebnisse „Typ A Herstellerreinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
1	CEM I	69,62	2,20	19,24
2		61,84 (min)	1,76	17,09
3		69,60	2,05	19,23
4		69,94	2,37	19,32
5		75,89 (max)	2,37	20,97
Mittelwert:		69,38	2,15	19,17
CoV:		7,19%	11,9%	7,19%
1	CEM II	62,63	1,90	17,31
2		69,31	2,85	19,15
3		64,24	2,27	17,75
4		62,19 (min)	2,04	17,18
5		76,26 (max)	2,06	21,07
Mittelwert:		66,93	2,22	18,49
CoV:		8,87%	16,8%	8,87%

b) System „Typ B“

Beim System „Typ B“ ist das Verhalten nach dem Erreichen der Höchstlast von der Verteilung des Bruches zwischen Verbundmörtel und Beton-Verbund Interface abhängig. Prinzipiell ist aber ebenfalls ein durch Reibung hervorgerufenenes, relativ hohes Lastniveau auch nach dem Bruch vorhanden.

Die Streuung der Versuchsergebnisse ist <5% und damit sehr gering.

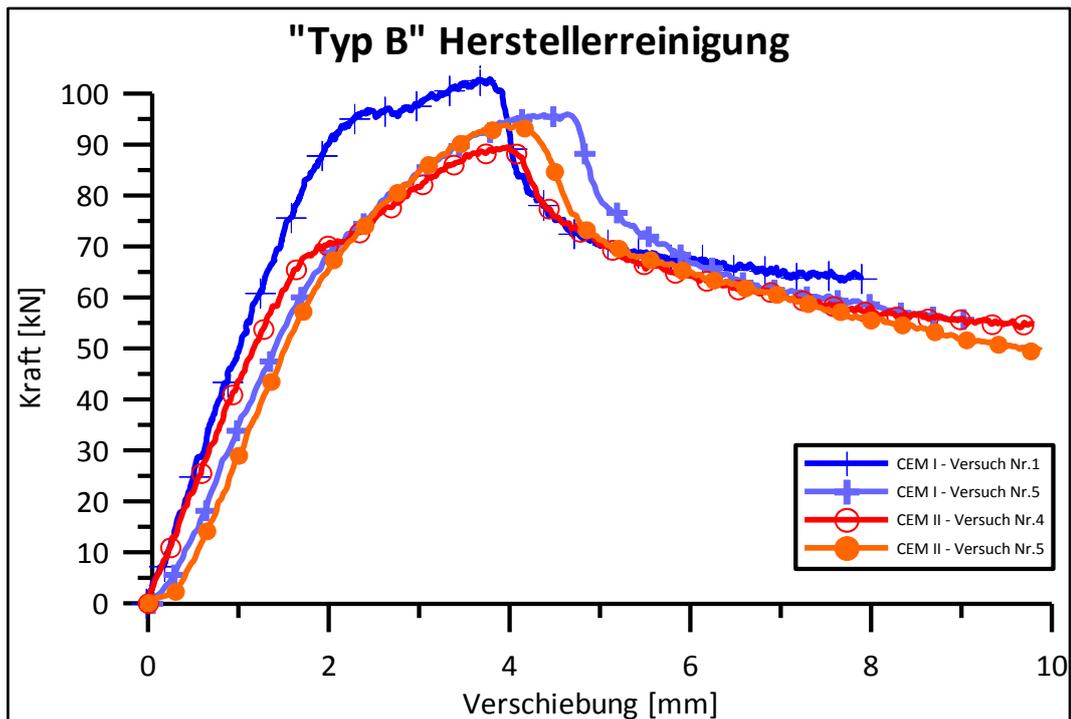


Abbildung 45: Last-Verschiebungs-Diagramme für Systemtyp „B“

Tabelle 14: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „Typ B“ bei Reinigung nach Herstellervorgabe

Versuchsergebnisse „Typ B Herstellerreinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
1	CEM I	103,02 (max)	3,60	28,46
2		93,83 (min)	4,18	25,93
4		100,41	3,55	27,74
5		96,34	4,39	26,62
Mittelwert:		98,40	3,93	27,19
CoV:		4,17%	10,71%	4,17%
1		CEM II	96,53 (max)	3,23
2	97,23		3,45	26,87
3	90,76		3,94	25,08
4	89,79 (min)		4,00	24,81
5	93,90		3,98	25,95
Mittelwert:	94,36		3,72	25,87
CoV:	3,57%		9,57%	3,57%

6.6.3 Besonderheiten und Anmerkungen

Das Verbundmörtelsystem „Typ B“ erwies sich während der Versuchsdurchführung als relativ anfällig gegenüber Setzfehlern und hier besonders gegenüber Lufteinschlüssen wie in Kapitel 6.4 beschrieben. Aus diesem Grund musste bei der Versuchsserie „CEM I – Typ B – Herstellerreinigung“ der Versuch Nr. 3 für ungültig erklärt werden.

Bei den Versuchsergebnissen ist anzumerken, dass für beide verwendeten Systeme die Bruchlasten bei CEM I – Zement leicht über den Werten für CEM II – Zement liegen. Für den Systemtyp „A“ ist außerdem die Streuung in CEM II höher. Im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen bei Hinterschnittankern kann dieses Ergebnis aber schwer direkt einer Materialeigenschaft (wie der Zugkapazität) des Betons zugeordnet werden.

Die Protokolle für die Versuchsserien finden sich im Anhang ab Seite A:6 für Typ „A“ und ab Seite A:10 für den Systemtyp „B“.

6.7 Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem mit „halber“ Reinigung

6.7.1 Versagensart

Die Versuche wurden mit dem System „Typ B“ durchgeführt. Bei den Versuchen kann ebenso wie bei der Reinigung nach Herstellerangaben kein eindeutiger Versagensmechanismus identifiziert werden. Zumeist ist ein Mischbruch maßgebend, der zum einen durch den Mörtelkörper, zum anderen auch entlang der beiden Grenzflächen verläuft.



Abbildung 46: Mischbruch des Systems „Typ B“ bei der Hälfte der vorgegebenen Reinigung

6.7.2 Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten

Auch das Last-Verschiebungs-Diagramm bei den Versuchen „Typ B halbe Reinigung“ ist mit den Versuchen mit voller Reinigung, wie sie bei Punkt 6.6.2 dargestellt wurden, vergleichbar.

Aufgrund der großen Streuung in der ersten Serie wurde eine zweite Serie durchgeführt, die das Ergebnis in diesem Punkt aber nicht verbessern konnte. Die Streuung der Versuchsergebnisse beträgt mehr als 15% bei den Versuchen im „CEM I – Beton“ und 8,6% im „CEM II – Beton“.

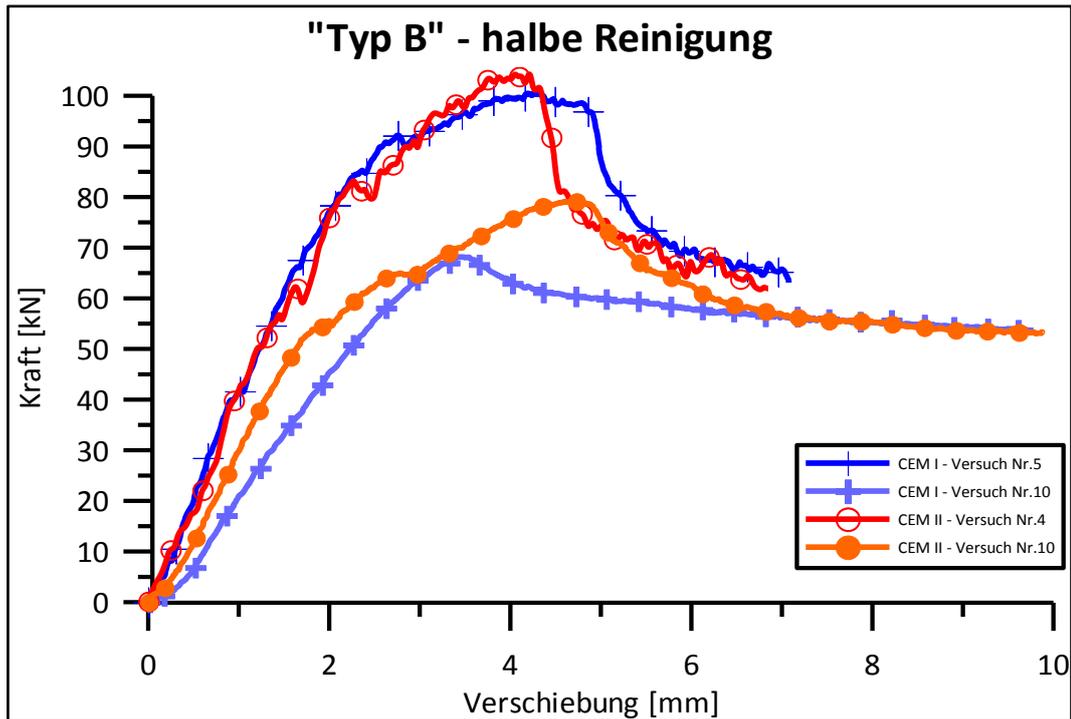


Abbildung 47: Typische Last-Verschiebungs-Diagramme „Typ B halbe Reinigung“

Tabelle 15: Versuchsergebnisse CEM I – Typ B – halbe Reinigung

Versuchsergebnisse „Typ B halbe Reinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
2	CEM I	92,67	4,27	25,61
3		94,23	2,74	26,04
4		107,66 (max)	4,21	29,75
5		100,73	4,19	27,83
6		77,95	4,33	21,54
7		78,88	5,60	21,80
8		80,42	4,34	22,22
9		76,00	4,06	21,00
10		68,26 (min)	3,43	18,86
Mittelwert:			86,31	4,13
CoV:		15,10%	18,58%	15,10%

Tabelle 16: Versuchsergebnisse CEM II – Typ B – halbe Reinigung

Versuchsergebnisse „Typ B halbe Reinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
2	CEM II	93,43	4,03	25,81
3		96,25	4,23	26,60
4		100,92	3,52	27,89
5		106,11	4,22	29,32
6		108,20 (max)	5,01	29,90
7		99,98	5,04	27,63
8		96,89	5,02	26,77
9		97,18	5,57	26,85
10		79,24 (min)	4,73	21,89
Mittelwert:			97,58	4,60
CoV:		8,56%	13,92%	8,56%

6.7.3 Besonderheiten und Anmerkungen

Bei den Ergebnissen mussten bereits während der Versuchsdurchführung die jeweils ersten Versuche in beiden Zementarten gestrichen werden, bei Versuch 01 – CEM I war ein Luftschluss der Grund, bei Versuch 01 – CEM II lag der Fehler in der Versuchsdurchführung bzw. in der Steuerung der Prüfmaschine begründet.

Die Versuchsdaten weisen in CEM I – Zement einen um ca. 20% geringeren Mittelwert als in CEM II – Zement auf. Auch die Streuung der Bruchlasten ist mit 8,5% in CEM II geringer als in CEM I – Zement mit 15%

Die Protokolle für die Versuche mit halber Reinigung finden sich im Anhang ab Seite A:14.

6.8 Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem – optimale Reinigung

6.8.1 Versagensart

Bei den mit dem Systemtyp „B“ durchgeführten Versuchen bei über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung stellte sich eine interessante Variation der Bruchbilder zwischen den beiden Zementarten ein. Bei der Zementart „CEM I“ versagten alle Anker an der Grenzfläche zwischen Beton und Verbundmörtelkörper, während bei der Zementart „CEM II“ das aus den weiter oben beschriebenen Versuchen bekannte Versagensbild des „Mischbruchs“ dominierte.

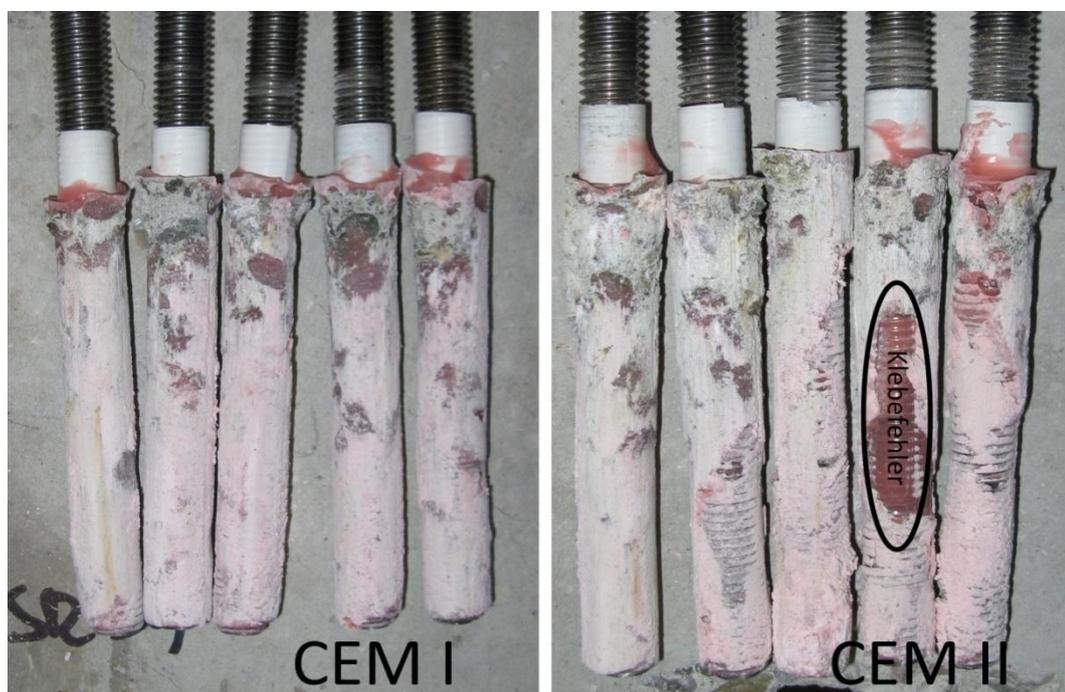


Abbildung 48: Versagensursachen beim System „Typ B“ bei optimaler Reinigung

6.8.2 Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten

Das Last-Verschiebungs-Diagramm für das Verbundmörtelsystem „Typ B“ zeigt bei den Versuchen mit vermeintlich „optimaler“, über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung einige Auffälligkeiten. Zum Ersten unterscheiden sich die Verläufe zwischen den Zementarten doch recht deutlich, zum Zweiten ist das bei beiden Zementarten zu beobachtende „Fließniveau“ deutlich unter der Höchstlast augenfällig.

Die Versuchsergebnisse weisen in beiden Zementen eine Streuung von ca. 6% auf.

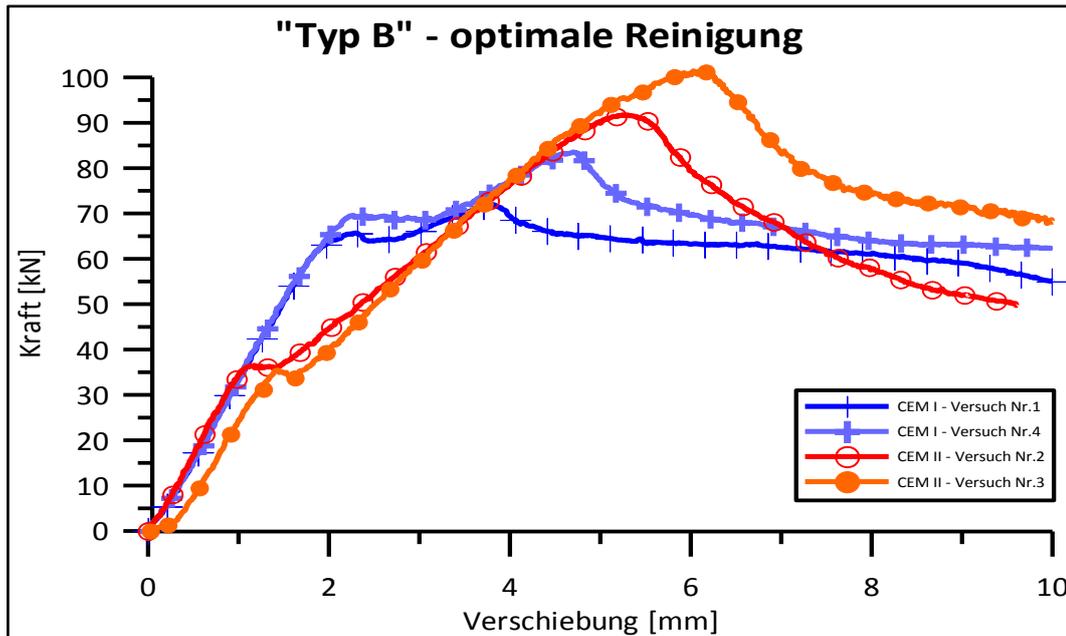


Abbildung 49: Last-Verschiebungs-Kurven bei über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung

Tabelle 17: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „B“ bei optimaler Reinigung

Versuchsergebnisse „Typ B – optimale Reinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
1	CEM I	72,15 (min)	3,80	19,94
2		82,79	4,90	22,88
3		83,43	4,99	23,05
4		83,66 (max)	4,70	23,12
5		81,29	5,09	22,46
Mittelwert:		80,66	4,70	22,29
CoV:	6,01%	11,10%	6,01%	
1	CEM II	89,19 (min)	5,62	24,64
2		91,98	5,26	25,42
3		101,54 (max)	6,02	28,06
5		94,88	6,11	26,22
Mittelwert:		94,40	5,75	26,08
CoV:		5,61%	6,80%	5,61%

6.8.3 Besonderheiten und Anmerkungen

Beim Versuch Nr. 4 in der Zementart „CEM II“ wurde nach dem Auszugsversuch ein Lufteinschluss festgestellt. Aus diesem Grund wurde das Versuchsergebnis für ungültig erklärt und für die weitere Auswertung und Betrachtung nicht mit herangezogen. Auf Abbildung 48 ist dieser Lufteinschluss sichtbar und der Ausschlussgrund nachvollziehbar.

Die Bruchlasten bei über die Vorgaben des Herstellers hinausgehender Reinigung sind in CEM II – Zement bei ähnlicher Streuung um einiges (15%) höher als in CEM I – Zement.

Die Protokolle für den Versuch finden sich im Anhang ab Seite A:18 für CEM I und ab Seite A:20 für CEM II.

6.9 Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem – keine Reinigung

6.9.1 Versagensart

Die mit dem System „Typ A“ durchgeführten Versuche zum Verhalten von Verbundmörtelsystemen bei keiner bzw. sehr schlechter Reinigung zeigten im Versuch ein stark schwankendes Bild. Aus diesem Grund wurden 3 Serien je Zementart durchgeführt und dabei auch der Parameter „Aushärtezeit“ variiert.

Die Versagensart der betrachteten Versuche ist nicht eindeutig feststellbar. Von Brüchen an entlang einer oder beider Grenzflächen bis hin zu oberflächlichem Betonausbruch und Mischbrüchen sowie Versagen wegen nicht vollständig ausgehärtetem Mörtel traten alle Versagensmechanismen im Versuch auf. Einige Versuche mit geringer Aushärtezeit müssen in ihrem Versagen auch diesem Faktor zugeordnet werden.

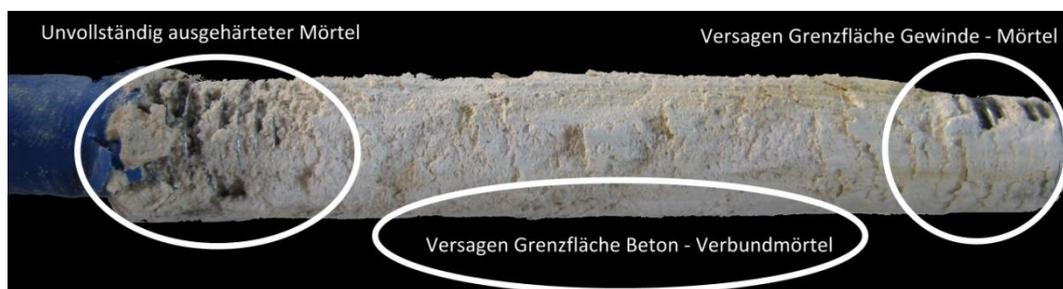


Abbildung 50: Versagensarten beim Versuch „Typ A – keine Reinigung“

6.9.2 Bruchlasten und Last-Verschiebungs-Verhalten

Die Last-Verschiebungs-Diagramme zeigen bei den Versuchen mit mangelhafter Reinigung ein uneinheitliches, den Brucharten entsprechendes Bild. Die Streuung der Versuchsergebnisse ist sehr groß, sie liegt, wenn alle drei Serien in die Betrachtung einbezogen werden, bei über 30%. Teilweise ähneln die Kurven den weiter oben dargestellten für gute Reinigungsverhältnisse, teilweise weichen sie stark davon ab und weisen mit geringen Lasten bei sehr hohen Verschiebungen auf ein nicht brauchbares Verhalten hin. Offensichtlich beeinflusst die Reinigung vor allem die Stabilität des Systems.

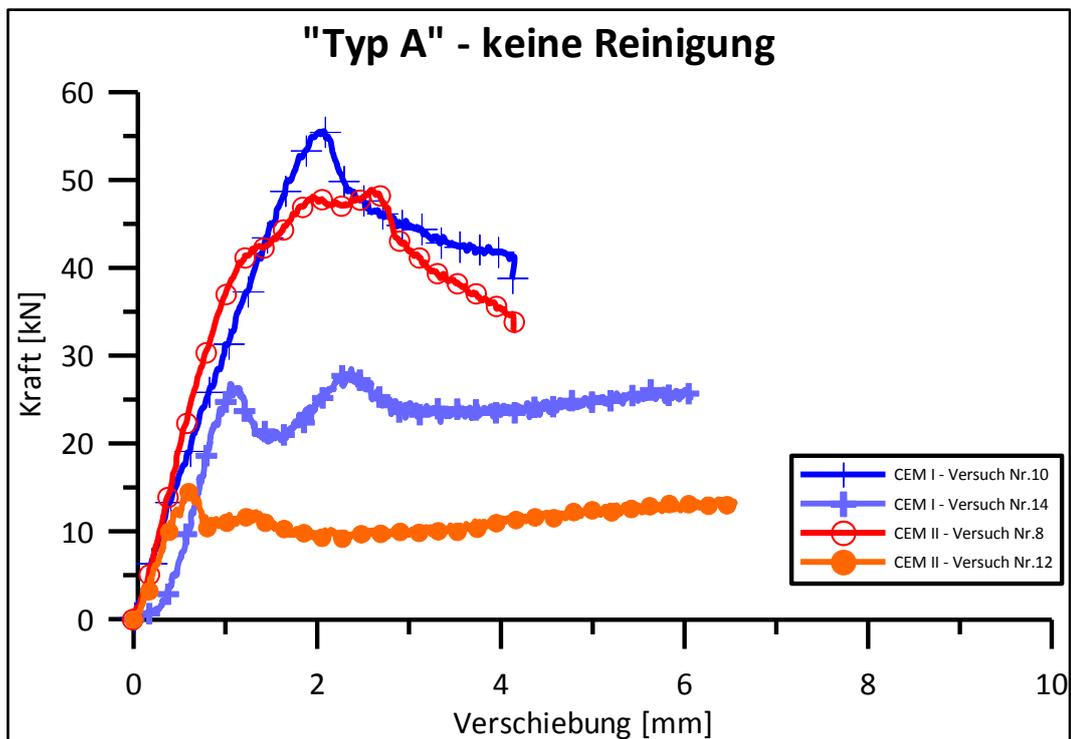


Abbildung 51: Typische Last-Verschiebungs-Kurven beim Versuch „Typ A – keine Reinigung“

Tabelle 18: Versuchsergebnisse CEM I – Typ A – keine Reinigung

Versuchsergebnisse „Typ A – keine Reinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
1	CEM I	46,37	1,64	12,81
2		44,26	1,60	12,23
3		42,48	1,48	11,74
4		49,15	2,13	13,58
5		53,56	1,84	14,80
6		42,71	1,22	11,80
7		62,30 (max)	1,66	17,21
8		55,91	1,92	15,45
9		47,58	1,80	13,15
10		55,57	2,07	15,35
11		19,18 (min)	1,02	5,30
12		19,29	0,71	5,33
13		29,08	5,37	8,03
14		28,48	2,37	7,87
15		19,28	0,86	5,33
Mittelwert:		41,01	1,85	11,33
CoV:		35,21 %	58,70 %	35,21%

Tabelle 19: Versuchsergebnisse CEM II – Typ A – keine Reinigung

Versuchsergebnisse „Typ A – keine Reinigung“				
Versuch Nr.	Zement	Bruchlast F_u	Verschiebung bei F_u	Verbundspannung
		[kN]	[mm]	[N/mm ²]
1	CEM II	33,36	1,28	9,22
2		35,12	1,57	9,70
3		38,32	1,50	10,59
4		41,54	1,84	11,48
5		50,32 (max)	1,86	13,90
6		30,83	1,53	8,52
7		42,03	1,64	11,61
8		48,88	2,58	13,51
9		43,89	2,67	12,13
10		26,53	0,92	7,33
11		23,35	7,18	6,45
12		14,89 (min)	0,61	4,11
13		25,18	9,66	6,96
14		20,74	1,16	5,73
15		22,30	1,13	6,16
Mittelwert:		33,15	2,47	9,16
CoV:		32,77%	101,75%	32,77%

6.9.3 Besonderheiten und Anmerkungen

Die Protokolle für die Versuche mit mangelhafter Reinigung finden sich im Anhang ab Seite A:22 für CEM I und ab Seite A:24 für CEM II.

Die Versuchsdaten, die für beide untersuchten Zementarten ähnliche Streuungen aufweisen, scheinen für eine Beurteilung des Einflusses der *Zementart* nicht gut geeignet zu sein.

6.10 Zusammenfassung

Dieser Teil der Arbeit listet die Ergebnisse der einzelnen Versuche auf. Weiters werden typische Last-Verformungs-Diagramme gezeigt und das Verhalten der Prüflinge während des Versuchs beschrieben, wobei Besonderheiten getrennt vermerkt werden.

Anhand der Versuchsprotokolle, auf welche an entsprechender Stelle verwiesen wird, erfolgt eine erste Auswahl der Versuchsdaten. Die gültigen Versuche bilden die Basis der Deutung der Ergebnisse im folgenden Kapitel. Die Darstellung der Versuchsdaten erlaubt aufgrund der hervorgehobenen Minima und Maxima eine Abschätzung über die Bandbreite der Ergebnisse.

TEIL 7: INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE

7.1 Einleitung

Eine Interpretation von Versuchsergebnissen ist immer von subjektivem Empfinden überlagert. Anhand der im vorhergehenden Teil 6 vorgelegten Daten soll in diesem Teil der Arbeit mit Hilfe von statistischen Werkzeugen dennoch eine möglichst objektive Aussage getroffen werden.

7.2 Statistische Grundlagen

Die Interpretation der Versuchsergebnisse beruht im Wesentlichen auf einem statistischen Hypothesentest. Herangezogen wird ein *t-Test für unabhängige Stichproben mit unbekannter, aber gleicher Standardabweichung*, der anhand der Abweichung von der zugrunde liegenden Normalverteilung zwei Serien von Testergebnissen miteinander vergleicht⁸⁸.

Das Vorhandensein der Normalverteilung wird mit einem *Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest* überprüft.

7.2.1 t-Test für unabhängige Stichproben

Die *Nullhypothese H0* wird mit „*es besteht kein Unterschied zwischen den Versuchsergebnissen der verglichenen Serien*“ definiert, die *Alternativhypothese H1* mit „*es besteht ein Unterschied zwischen den verglichenen Serien*“; das Vertrauensniveau wird bei 95 % festgelegt⁸⁹.

Die *Testgröße t* wird aus den Stichprobenmittelwerten und aus der so genannten „*gewichteten Varianz (Formel 14)*“, in welche wiederum die Stichprobenvarianzen eingehen, gemäß Formel 15 berechnet.

⁸⁸ Eigentlich wird anhand der Mittelwerte überprüft, ob die Erwartungswerte von zwei Verteilungen gleich sind.

⁸⁹ In der ETAG 001 [10] wird ein Vertrauensbereich von 90% vorgeschlagen, was konservativer ist, da zwei Stichproben „früher“ als nicht der gleichen Grundgesamtheit angehörend betrachtet werden. Unter anderem aus diesem Grund wird bei knappen Ergebnissen eine gesonderte Betrachtung durchgeführt.

Formel 14: Berechnung der gewichteten Varianz

$$s^2 = \frac{(n-1) \cdot s_x^2 + (m-1) \cdot s_y^2}{n+m-2}$$

Formel 15: Berechnung Testgröße t

$$t = \sqrt{\frac{n \cdot m}{n+m}} \cdot \frac{\bar{x} - \bar{y}}{s}$$

Wenn die Testgröße t kleiner als der Grenzwert der t-Verteilung für die gegebenen Parameter ist, kann die Nullhypothese zum gewählten Vertrauensniveau angenommen werden, andernfalls muss die Alternativhypothese H1 als richtig angesehen werden.

Formel 16: Verifizierung Nullhypothese

$$|t| < t(1-\alpha, n+m-2) \rightarrow H_0$$

Formel 17: Verifizierung Alternativhypothese

$$|t| > t(1-\alpha, n+m-2) \rightarrow H_1$$

7.2.2 Kolmogorow-Smirnow Anpassungstest

Der *Kolmogorov-Smirnow-Test* ist ein statistisches Verfahren zur Überprüfung der Übereinstimmung zweier Verteilungen. Im vorliegenden Fall wird die empirische Verteilungsfunktion der Versuchsergebnisse mit der Verteilungsfunktion der Normalverteilung verglichen.

Dazu wird für jede Beobachtung i die absolute Differenz zwischen der empirischen (S_{xi}) und der hypothetischen Verteilungsfunktion ($F_{0,xi}$) bestimmt.

Formel 18: Berechnung der Differenz zwischen empirischer und theoretischer Verteilungsfunktion

$$d_{oi} = |S_{(xi)} - F_{0(xi)}|$$

$$d_{ui} = |S_{(xi-1)} - F_{0(xi)}|$$

Die an einer Stelle auftretende maximale Differenz wird dann mit (tabellierten) Werten verglichen und zu einem gewissen Signifikanzniveau eine Aussage formuliert.

7.2.3 Einschränkungen und Grenzen der gewählten Verfahren

Der t-Test hat nur bei normalverteilten Daten eine gute Aussagekraft und ist in dieser Hinsicht empfindlicher als beispielsweise der *Wilcoxon-Rangsummentest* [73].

Trotzdem wird dieser Test gewählt und als geeignet angesehen, da es sich prinzipiell dennoch um ein robustes Verfahren handelt und andere Verfahren bei kleiner Stichprobenanzahl nicht anwendbar sind. Der zweite und wichtigere Grund für die Wahl des t-Tests zur Überprüfung der Hypothesen ist in der ETAG 001 zu finden. Hier ist für ähnliche Fragestellungen eine Empfehlung für dieses Verfahren enthalten, wobei Normalverteilung und unbekannte Standardabweichung zugrunde gelegt werden sollen [10].

Diese Empfehlung in der ETAG stützt sich auf die „current experience“ und sehr viele Versuchsergebnisse im Bereich der Dübelzulassungen. Die Annahme einer Normalverteilung wird – zumal es sich bei den durchgeführten Experimenten um vielfach erprobte Verfahren aus der Zulassungspraxis handelt – deshalb als gesichert angenommen.

Dennoch wird das Vorliegen einer Normalverteilung mit einem geeigneten Verfahren überprüft, in diesem Fall mit einem *Kolmogorow-Smirnow-Anpassungstest*.

Auch dieses Verfahren weist Schwächen auf: So neigt der Kolmogorow-Smirnow-Test bei geringer Stichprobenanzahl zur falschen Bestätigung der Nullverteilungshypothese [73]. Es wird aber davon ausgegangen, dass grobe Abweichungen von der Nullverteilung erkannt werden, leichtere Abweichungen werden aufgrund der aus anderen Gründen (siehe oben) gesichert erscheinenden Normalverteilungshypothese in Kauf genommen.

7.3 Interpretation der Ergebnisse der Versuche mit Hinterschnittankern

Für die Berechnung der statistischen Parameter werden die laut Formel 13 normierten Werte verwendet. Die Übereinstimmung der Versuchsserien innerhalb einer Zementart wurde überprüft⁹⁰. Da die Serien statistisch zusammenpassen, wurden sie gemeinsam ausgewertet; für die weiteren Berechnungen wurde eine Stichprobenanzahl von $n=10$ zugrundegelegt.

7.3.1 Statistische Parameter „Hinterschnitt“

Tabelle 20: Statistische Parameter Hinterschnitt

Statistische Parameter der Versuche mit Hinterschnittankern		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	10	10
Minimum	51,32	48,52
Maximum	60,45	58,55
Amplitude	9,13	10,04
Median	55,26	52,99
Mittelwert	55,08	53,18
Standardabweichung (n-1)	2,51	2,93
Schiefe (Pearson)	0,63	0,52
Kurtosis (Pearson)	0,33	-0,24
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,20	0,27
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,41	0,41
Normalverteilt:	Ja (P=0,786)	Ja (P=0,399)

⁹⁰ Siehe Prüfprotokolle im Anhang ab Seite A:2

7.3.2 Hypothesentest

Tabelle 21: Hypothesentest Hinterschnitt

Hypothesentest zu den Versuchen mit Hinterschnittankern	
Konfidenzintervall	0,95
Standardabweichung	2,729
Freiheitsgrade	18
Testgröße t	1,560
Grenzwert t-Verteilung	2,101
Beurteilung:	H0 erfüllt, die Mittelwerte weichen nicht signifikant voneinander ab (P=0,136)

7.3.3 Interpretation

Bezug nehmend auf die Ergebnisse der statistischen Betrachtung kann davon ausgegangen werden, dass die Versuchsergebnisse für beide Zementarten einer Normalverteilung entstammen.

Die (Normal-) Verteilungen mit aus den jeweiligen Stichproben geschätzten Parametern sind in Abbildung 52 ersichtlich.

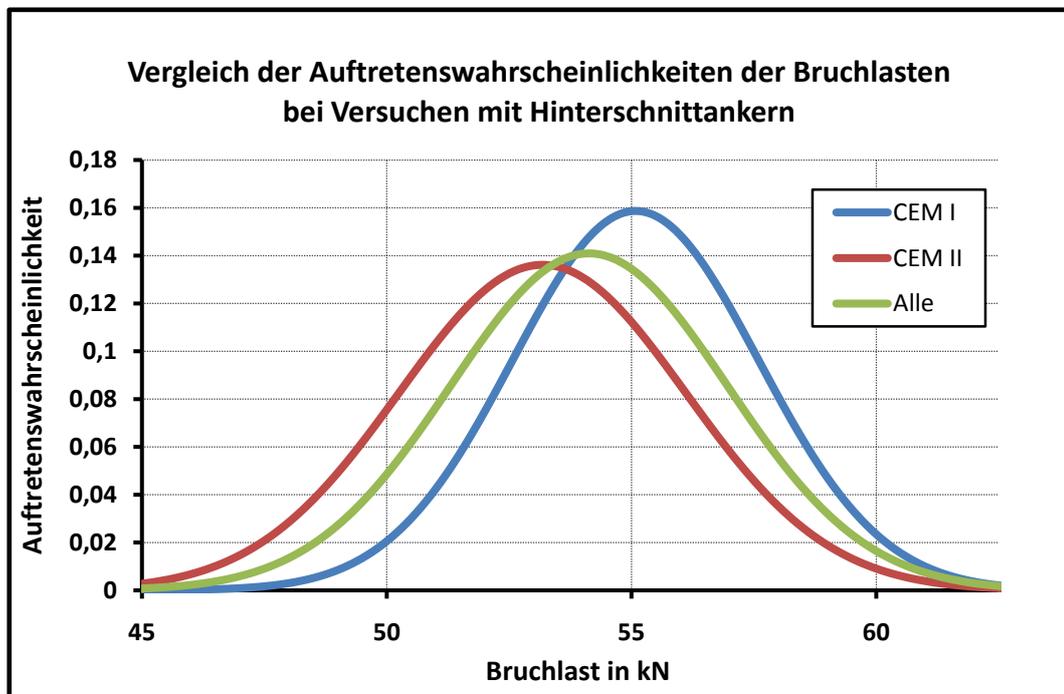


Abbildung 52: Vergleich der Auftretenswahrscheinlichkeiten für die Hinterschnitt-Versuche

Diese Annahme ermöglicht die Durchführung des *t*-Tests für *unabhängige Stichproben*, welcher in diesem Fall darauf schließen lässt, dass die Stichproben aus *der gleichen* normalverteilten Grundgesamtheit stammen. Das bedeutet, dass die „CEM II - Ergebnisse“ *nur zufällig* leicht unterhalb der „CEM I - Ergebnisse“ liegen.

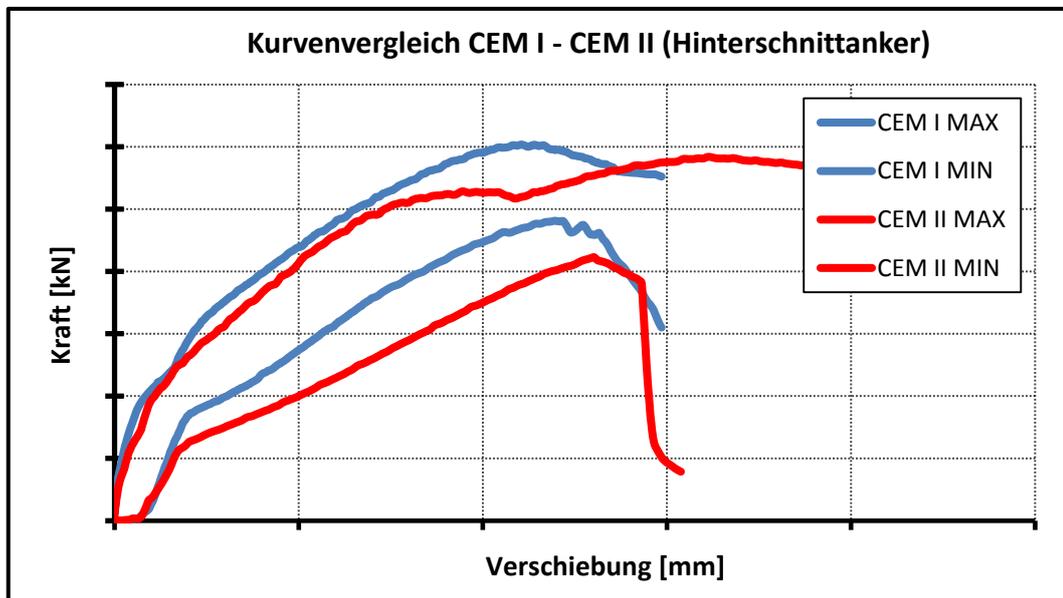


Abbildung 53: Schematischer Vergleich der normierten Last-Verschiebungs-Kurven. Innerhalb der blauen Linien liegen alle Kurven mit CEM I – Zement, innerhalb der roten alle mit CEM II – Zement.

Durch die statistisch abgesicherte Zusammengehörigkeit beider Serien von Versuchsergebnissen können diese zusammen ausgewertet werden. Wegen der dadurch größeren Stichprobenanzahl ist die empirische Verteilung, der die Versuchsergebnisse beider Zementarten zugrundeliegen, noch besser⁹¹ normalverteilt als die Verteilungsfunktionen beider Stichprobenserien allein. Dies ist auch ein Hinweis auf das Vorhandensein einer gemeinsamen Grundgesamtheit.

Beachtenswert ist auch die Übereinstimmung bzw. für beide Zementarten leichte Überschreitung der Versuchsmittelwerte mit den nach der CC-Formel (siehe Formel 8 Seite - 18 -) berechneten Werten.

Es gibt keinen statisch signifikanten Hinweis auf die Beeinflussung der Bruchlasten bei Hinterschnittankern durch die Verwendung von CEM II/A-LL Zement! Durch den Bruchmechanismus kann somit auch eine Beeinflussung der Zugkapazität des Betons ausgeschlossen werden.

⁹¹ Maximale Differenz $D=0,152$, Grenzwert bei $\alpha = 5\%$ liegt bei $0,294$

7.4 Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörteltyp „A“ bei Reinigung nach Herstellerangaben

Die Bruchlasten der Verbundanker werden über die Verbundfläche auf Verbundspannungen umgerechnet, welche die Basis der weiteren Betrachtung bilden. Aufgrund der Bruchmechanismen, welche sich -wie in Kapitel 6.6.1 beschrieben- nicht unterscheiden, können alle Versuche zusammen ausgewertet werden.

7.4.1 Statistische Parameter „Typ A - Herstellerreinigung“

Tabelle 22: Statistische Parameter „Typ A“ Herstellerreinigung

Statistische Parameter der Versuche mit „Typ A - Herstellerreinigung“		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	5	5
Minimum	17,087	17,184
Maximum	20,968	21,070
Amplitude	3,881	3,887
Median	19,237	17,751
Mittelwert	19,170	18,492
Standardabweichung (n-1)	1,379	1,639
Schiefe (Pearson)	-0,343	0,831
Kurtosis (Pearson)	-0,469	-0,855
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,318	0,274
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,565	0,565
Normalverteilt:	Ja (P=0,602)	Ja (P=0,776)

7.4.2 Hypothesentest

Tabelle 23: Hypothesentest „Typ A Herstellerreinigung“

Hypothesentest zu den Versuchen „Typ A Herstellerreinigung“	
Konfidenzintervall	0,95
Standardabweichung	1,515
Freiheitsgrade	8
Testgröße t	0,707
Grenzwert t-Verteilung	2,306
Beurteilung:	H0 erfüllt, die Mittelwerte weichen nicht signifikant voneinander ab (P=0,500)

7.4.3 Interpretation

Die statistische Betrachtung der Versuche gibt ebenso wie die Betrachtung der Bruchmechanismen und der Last-Verschiebungs-Kurven keinen Anlass, eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die verwendete Zementart zu vermuten.

Für das Verbundmörtelsystem „A“ gibt es keinen signifikanten Hinweis auf Veränderung des Tragverhaltens durch die Verwendung von CEM II/A-LL Zement.

7.5 Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörteltyp „B“ bei Reinigung nach Herstellerangaben

Die Bruchlasten der Verbundanker werden über die Verbundfläche auf Verbundspannungen umgerechnet, welche die Basis der weiteren Betrachtung bilden.

7.5.1 Statistische Parameter „Typ B Herstellerreinigung“

Tabelle 24: Statistische Parameter „Typ B Herstellerreinigung“

Statistische Parameter der Versuche mit „Typ B Herstellerreinigung“		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	4	5
Minimum	25,926	24,809
Maximum	28,464	26,866
Amplitude	2,538	2,057
Median	27,181	25,946
Mittelwert	27,188	25,875
Standardabweichung (n-1)	1,134	0,921
Schiefe (Pearson)	0,025	-0,122
Kurtosis (Pearson)	-2,619	-2,682
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,192	0,279
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,624	0,565
Normalverteilt:	Ja (P=0,995)	Ja (P=0,856)

7.5.2 Hypothesentest

Tabelle 25: Hypothesentest „Typ B Herstellerreinigung“

Hypothesentest zu den Versuchen „Typ B Herstellerreinigung“	
Konfidenzintervall	0,95
Standardabweichung	3,683
Freiheitsgrade	7
Testgröße t	1,924
Grenzwert t-Verteilung	2,365
Beurteilung:	H0 erfüllt, die Mittelwerte weichen nicht signifikant voneinander ab (P=0,096)

7.5.3 Interpretation

Der statistische Nachweis für das Vorhandensein einer gleichen Grundgesamtheit für die Versuchsergebnisse in beiden verwendeten Zementarten ist zwar erfüllt, dennoch muss hier aber eine genauere Betrachtung durchgeführt werden. Der Grenzwert der t-Verteilung für den betrachteten Fall ist mit 2,365 nur knapp größer als der Wert 1,924 für die Testgröße t. Bei einem Vertrauensintervall von 90%, wie in der ETAG 001 [10] vorgeschlagen, würde der Grenzwert mit 1,895 bereits unter dem Wert für die Testgröße liegen, was zu einer Ablehnung der Hypothese H0 führen würde.

Nun sind bei diesem Versuch unterschiedliche Bruchmechanismen zu beobachten, was allerdings in der Streuung der Versuchsergebnisse keinen Niederschlag zu finden scheint, da diese sehr gering ist. Offensichtlich ist das System bei Reinigung nach Herstellerangaben sehr gut abgestimmt; alle Versagensmöglichkeiten des Verbundmörtelkörpers liegen offenbar im Bereich ähnlicher Größenordnungen.

Im Normalfall wird bei den gemessenen Kräften außerdem bereits Stahlversagen maßgeblich sein. Die beobachteten Werte liegen auch bei den verwendeten Gewindestangen 12.9 teilweise bereits über der rechnerischen Bruchlast⁹².

Wenn die sehr kleine Streuung der Bruchlasten auf einen Wert von 5% angehoben wird, führt dies bereits zu deutlich eindeutigerer Annahme der Hypothese H0, wie auch in folgender Abbildung dargestellt:

⁹² Vgl. Tabelle 10 Seite - 74 -

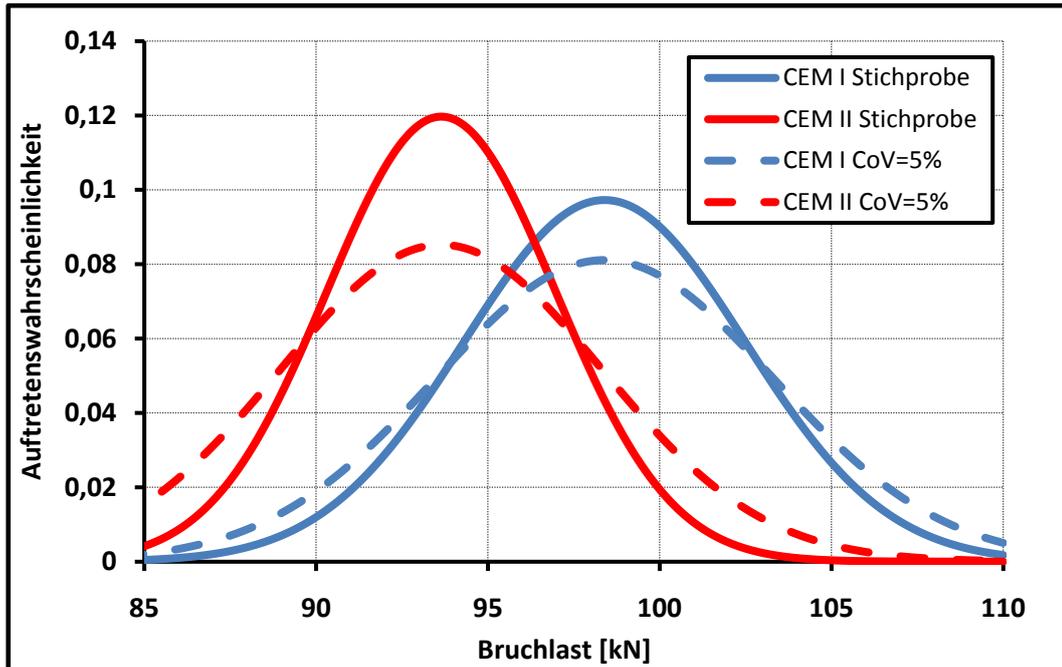


Abbildung 54: Vergleich der Verteilungsfunktionen für die Bruchlasten des Systems „Typ B“

Die durchgezogenen Linien sind Normalverteilungen mit aus der Stichprobe geschätzten Parametern, die unterbrochenen Linien stellen die Verteilung bei gleichen Mittelwerten, aber auf 5% erhöhter Streuung dar. Es ist klar erkennbar, dass der Überlappungsbereich der beiden Kurven deutlich größer ist.

Auch rechnerisch kann gezeigt werden:

1. Gleichsetzen der Dichtefunktionen

Formel 19: Dichtefunktion der Normalverteilung (Aus [73])

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

führt zu :

$x = 96,037$ für die Ursprungsverteilungen und

$x = 96,201$ für die Verteilungen mit 5% Streuung.

An diesen Stellen schneiden sich die Kurven für die Dichtefunktionen für die Ergebnisse mit CEM I bzw. CEM II Zement.

2. Berechnung der Kurvenintegrale über die Dichtefunktionen wie in Formel 20 schematisch für die ursprünglichen Kurven dargestellt:

Formel 20: Berechnung der Überlappungsfläche

$$A_{\ddot{U}} = \int_{-\infty}^{96,037} \frac{1}{\sigma_{CEM I} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{CEM I}}{\sigma_{CEM I}} \right)^2} + \int_{96,037}^{\infty} \frac{1}{\sigma_{CEM II} \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_{CEM II}}{\sigma_{CEM II}} \right)^2}$$

Die Berechnung liefert $A = 0,519$ für die ursprünglichen und $A = 0,620$ für die Flächen, denen eine Streuung von 5% zugrunde liegt.

Die Übereinstimmung der beiden Dichtefunktionen ist also bereits viel größer. Es kann davon ausgegangen werden, dass bei höherer Stichprobenanzahl die Verteilungen zusammenfallen und ein Hypothesentest das Vorhandensein einer gemeinsamen Grundgesamtheit eindeutiger bestätigen würde.

Die nur knappe Annahme der Hypothese H_0 ist wahrscheinlich auf die geringe Stichprobenanzahl zurückzuführen.

Auch bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Bruchmechanismen liegt deshalb aus statistischer Sicht kein Grund zur Annahme vor, dass die zu erwartenden Bruchlasten des Systemtyps „B“ bei Reinigung nach Herstellerangaben durch die Verwendung von CEM II/A-LL verändert werden.

7.6 Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel „Typ B“ bei „halber“ Reinigung

Die Bruchlasten der Verbundanker werden über die Mantelfläche des Mörtelzylinders auf Verbundspannungen umgerechnet, welche die Basis der weiteren Betrachtung bilden.

7.6.1 Statistische Parameter „Typ B - halbe Reinigung“

Tabelle 26: Statistische Parameter „Typ B - halbe Reinigung“

Statistische Parameter der Versuche „Typ B - halbe Reinigung“		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	9	9
Minimum	18,861	21,894
Maximum	29,747	29,897
Amplitude	10,886	8,003
Median	22,222	26,853
Mittelwert	23,849	26,962
Standardabweichung (n-1)	3,601	2,309
Schiefe (Pearson)	0,318	-0,994
Kurtosis (Pearson)	-1,132	0,798
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,230	0,215
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,432	0,432
Normalverteilt:	Ja (P=0,669)	Ja (P=0,748)

7.6.2 Hypothesentest

Tabelle 27: Hypothesentest „Typ B - halbe Reinigung“

Hypothesentest zu den Versuchen „Typ B - halbe Reinigung“	
Konfidenzintervall	0,95
Standardabweichung	3,025
Freiheitsgrade	16
Testgröße t	2,184
Grenzwert t-Verteilung	2,120
Beurteilung:	H0 muss abgelehnt werden! Es besteht Grund zu der Annahme, dass die beiden Serien nicht der gleichen Grundgesamtheit entstammen (P=0,044)

7.6.3 Interpretation

Die Interpretation des Ergebnisses des Hypothesentests gestaltet sich einigermaßen schwierig, zumal auch die in einer Zementart durchgeführten Serien statistisch zum Teil nicht zusammenpassen, wie in den Protokollen⁹³ zu sehen ist. Außerdem muss für die Untersuchung der Auswirkungen einer verminderten Reinigungsintensität auch der Referenzwert betrachtet werden, der in diesem Fall durch das Ergebnis bei Reinigung nach Herstellerangaben gebildet wird.

Ein Vergleich mittels t-Test zwischen allen Serien ist in Tabelle 28 dargestellt, besonders auffällig ist die rot umrandete Serie 2 im CEM I – Zement. Diese Serie passt mit keinem der anderen Versuchsergebnisse statistisch zusammen. In den Durchführungsprotokollen und den Daten der Versuche konnte hierfür keine plausible Erklärung gefunden werden.

Die restlichen Versuche passen untereinander und auch mit den Referenzwerten statistisch gut zusammen, die höhere Streuung der Versuchsergebnisse war vorhersehbar⁹⁴.

⁹³ im Anhang ab Seite A:14

⁹⁴ Vgl. Kapitel 4.5.1

Tabelle 28: Übersicht der P-Werte für die Versuche mit halber Reinigung

			Übersicht der P-Werte der Hypothesentests für die Versuche mit halber Reinigung					
			CEM I			CEM II		
			Hst.	Halbe Reinigung		Hst.	Halbe Reinigung	
1. Serie	2. Serie	1. Serie		2. Serie				
CEM I	Hst. Angaben		-					
	halbe R.	1. Serie	0,9188	-				
		2. Serie	0,0002	0,0006	-			
CEM II	Hst. Angaben		0,0957	0,1770	0,0002	-		
	halbe R.	1. Serie	0,8289	0,9383	0,0003	0,1046	-	
		2. Serie	0,7218	0,0003	0,0049	0,6068	0,6402	-

Die Abweichung einer Serie in CEM I – Zement kann nicht zugeordnet werden, möglicherweise liegt ein unbekannter Einfluss vor!

Die verminderte Reinigungsintensität erhöht die Streuung der Versuche, was auf eine geringere Zuverlässigkeit aufgrund der höheren Sensitivität hindeutet.

Für die Verwendung von CEM II/A-LL Zement lassen sich aus den Versuchen mit halber Reinigung für das System „Typ B“ keine statistisch signifikanten und praktisch relevanten Beschränkungen ableiten.

7.7 Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel „Typ B“ bei optimaler Reinigung

Die Bruchlasten der Verbundanker werden über die Verbundlänge und den Radius auf Verbundspannungen umgerechnet, welche die Basis der weiteren Betrachtung bilden.

7.7.1 Statistische Parameter „Typ B - optimale Reinigung“

Tabelle 29: Statistische Parameter „Typ B - optimale Reinigung“

Statistische Parameter der Versuche „Typ B - optimale Reinigung“		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	5	4
Minimum	19,935	24,644
Maximum	23,115	28,056
Amplitude	3,180	3,413
Median	22,876	25,816
Mittelwert	22,288	26,083
Standardabweichung (n-1)	1,340	1,464
Schiefe (Pearson)	-1,372	0,540
Kurtosis (Pearson)	0,062	-1,099
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,351	0,213
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,565	0,624
Normalverteilt:	Ja (P=0,473)	Ja (P=0,982)

7.7.2 Hypothesentest

Tabelle 30: Hypothesentest „Typ B - optimale Reinigung“

Hypothesentest zu den Versuchen „Typ B - optimale Reinigung“	
Konfidenzintervall	0,95
Standardabweichung	1,394
Freiheitsgrade	7
Testgröße t	4,057
Grenzwert t-Verteilung	2,365
Beurteilung:	H0 muss abgelehnt werden! Es besteht Grund zu der Annahme, dass die beiden Serien nicht der gleichen Grundgesamtheit entstammen (P=0,005)

7.7.3 Interpretation

Bei der Interpretation der Versuchsergebnisse mit optimaler Reinigung fällt zunächst der in Kapitel 6.8.1 beschriebene Unterschied in den Bruchmechanismen ins Auge. Die Versuche mit intensiver, über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung wurden ursprünglich deshalb angesetzt, weil bei anderen Versuchen der (subjektive) Eindruck bestand, dass sich beim CEM II - Beton mehr Bohrmehl aufgrund von Abrieb aus dem Bohrloch entfernen ließ. Dieser Eindruck wird durch vorliegende Daten nicht bestätigt und eher ins Gegenteil verkehrt, denn die Verbundanker im CEM I - Zement versagen an der Grenzfläche zum Beton, während sich bei den Ankern im CEM II - Beton der gewohnte Mischbruch zeigt.

Das in den Last-Verschiebungs-Diagrammen ebenfalls auffällige „Fließniveau“ bei etwa 70 kN kann durch diese Versagensart in Zusammenhang mit dem Versuchsaufbau erklärt werden. Die Verbundmörtelkörper beim Versuch in CEM I - Beton werden als Ganzes ausgezogen, was bei einem Bohrlochdurchmesser von 14 mm ($d_{\text{cut,m}} = 14,3 \text{ mm}$) einem Zylinder mit Radius $\approx 14,5 \text{ mm}$ entspricht. Zusätzlich ist noch der anhaftende oberflächliche Betonausbruch zu berücksichtigen. Das Bohrloch in der Durchgangsplatte hat zwar einen Durchmesser von 18,4 mm⁹⁵, trotzdem kann es bei nicht genau zentrischer Lage des Ankers oder eigentlich des Verbund-

⁹⁵ Vgl. Kapitel 5.4.3 ab Seite - 78 -

mörtelkörpers⁹⁶ beim Auszugsversuch zu einer Berührung mit der Abstützungsplatte kommen. Diese Erklärung wird insofern gestützt, dass dieses Phänomen bzw. dieser Kurventyp nur bei zwei Versuchen in dieser Art zu beobachten ist⁹⁷.



Abbildung 55: Auszug eines gesamten Verbundmörtelkörpers durch das Durchgangsloch

Sollte tatsächlich ein Verhalten in der Form der dargestellten Vermutung den Versuchsergebnissen zugrunde liegen, müsste allerdings davon ausgegangen werden, dass die Höchstlast ohne Berührung deutlich unter dem angegebenen Niveau liegen würde („erste Spitze“ in Abbildung 56).

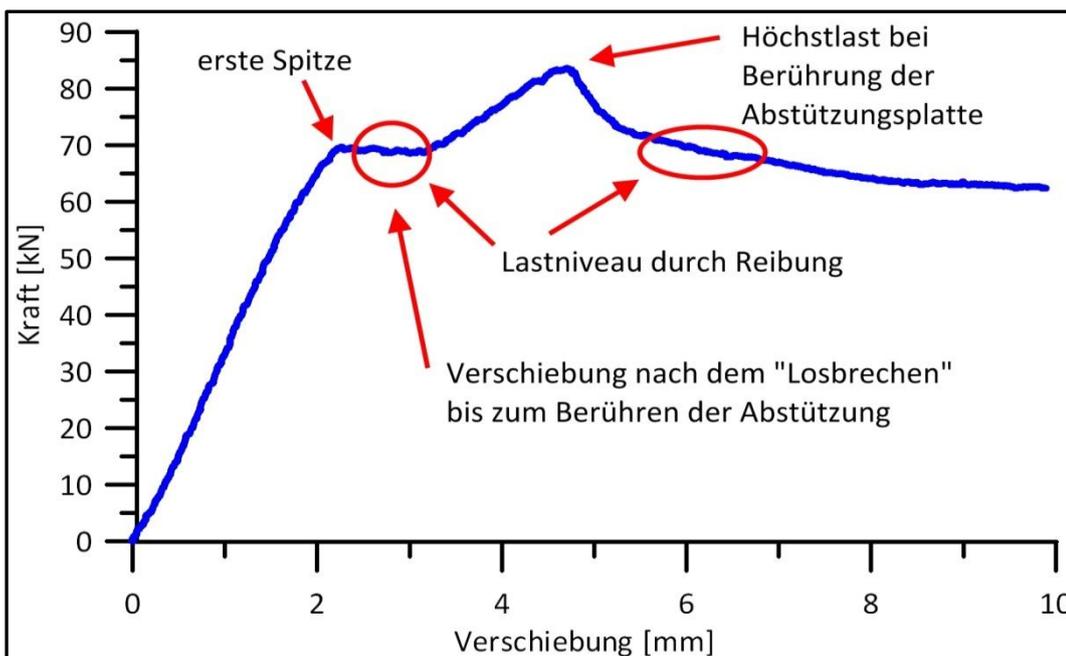


Abbildung 56: Interpretation von Versuch Nr. 4 CEM I aus Abbildung 48

⁹⁶ Es wurde auf zentrische Lage des Ankers im Durchgangsloch, nicht aber auf die Lage des Ankers im (frischen) Verbundmörtel geachtet.

⁹⁷ Vgl. Versuchsprotokoll im Anhang ab Seite A:18

Es erscheint sinnvoll, auch die Versuchsergebnisse mit optimaler Reinigung in derselben Art den aus anderen Versuchen erhaltenen Ergebnissen gegenüberzustellen wie dies bereits für die Versuche mit verminderter Reinigungsintensität gezeigt wurde.

Tabelle 31: Übersicht über die P-Werte aller Versuche mit Sytemtyp „B“

Übersicht und Vergleich der P-Werte aller Versuche mit Systemtyp „B“									
		CEM I				CEM II			
		Hst. R.	opt. R.	1/2 R. Serie 1	1/2 R. Serie 2	Hst. R.	opt. R.	1/2 R. Serie 1	1/2 R. Serie 2
CEM I	Hst. R.	-	0,0007	0,9188	0,0002	0,0957	0,2777	0,8289	0,7218
	opt. R.	0,0007	-	0,0023	0,1897	0,0011	0,0048	0,0011	0,0169
	1/2 R. Serie 1	0,9188	0,0023	-	0,0006	0,1770	0,3463	0,9383	0,6939
	1/2 R. Serie 2	0,0002	0,1897	0,0006	-	0,0002	0,0010	0,0003	0,0049
CEM II	Hst. R.	0,0957	0,0011	0,1770	0,0002	-	0,0048	0,1046	0,6068
	opt. R.	0,2777	0,0048	0,3463	0,0010	0,0048	-	0,2596	0,7545
	1/2 R. Serie 1	0,8289	0,0011	0,9383	0,0003	0,1046	0,2596	-	0,6402
	1/2 R. Serie 2	0,7218	0,0169	0,0003	0,0049	0,6068	0,7545	0,6402	-

Es bietet sich ein unausgewogenes Bild: Teilweise passen die Versuche mit optimaler Reinigung statistisch zu den Versuchen mit verminderter Reinigung aber nicht zu den Versuchen mit Reinigung laut Herstellerangaben. Die Unterschiede sind dabei teilweise beträchtlich.

Die über die Angaben des Herstellers hinausgehende Reinigung kann bei der Verwendung von Stahldrahtbürsten möglicherweise zu einer unerwünschten Glättung der Bohrlochoberfläche führen.

Durch die hohe Anhaftung des epoxidbasierten Verbundmörtels am Stahl des Gewindestabs kann es bei einem Auszug des gesamten Verbundmörtelkörpers (Versagen am Interface zum Beton) zu einer sekundären Laststeigerung kommen, wenn das Harz am Durchgangsloch des confined-Versuchs abgeschert wird.

Die statistische Übereinstimmung zu den anderen Versuchen und auch zwischen den Serien dieser Versuchsreihe ist unbefriedigend. Es muss davon ausgegangen werden, dass überlagerte Einflüsse wie der oben aufgezeigte Mechanismus beim Ausziehversuch den Einfluss der Zementart bei weitem übersteigen.

Die Verwendung von CEM II/A-LL für Versuchskörper beeinflusst Versuchsergebnisse von Verbundankersystemen wie dem System „Typ B“ nicht.

7.8 Interpretation der Versuche mit dem Injektionsmörtel „Typ A - keine Reinigung“

Die Bruchlasten der Verbundanker werden über die Verbundlänge und den Radius auf Verbundspannungen umgerechnet, welche die Basis der weiteren Betrachtung bilden.

7.8.1 Statistische Parameter „Typ A - keine Reinigung“

Tabelle 32: Statistische Parameter „Typ A - keine Reinigung“

Statistische Parameter der Versuche „Typ A - keine Reinigung“		
	CEM I	CEM II
Anzahl der Beobachtungen	15	15
Minimum	5,299	4,113
Maximum	17,215	13,905
Amplitude	11,916	9,791
Median	12,231	9,218
Mittelwert	11,332	9,160
Standardabweichung (n-1)	3,990	3,002
Schiefe (Pearson)	-0,382	0,034
Kurtosis (Pearson)	-1,152	-1,145
Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstest auf Normalverteilung		
Maximale Differenz D:	0,207	0,129
Signifikanzniveau alpha:	0,05	0,05
Grenzwert:	0,338	0,338
Normalverteilt:	Ja (P=0,492)	Ja (P=0,951)

7.8.2 Hypothesentest

Die Durchführung eines Hypothesentests ist für die vorliegenden Versuchsergebnisse für den Versuch „Typ A - keine Reinigung“ nicht sinnvoll. Bereits bei einer nur oberflächlichen Betrachtung der Daten⁹⁸ fällt deren großes Streuband auf. In Abbildung 57 sind die Höchstlasten und die entsprechende Verschiebung bei Höchstlast im Vergleich zum Mittelwert der Versuchsergebnisse bei Reinigung nach Herstellerangaben dargestellt.

Die Serien passen untereinander nicht zusammen, auch nicht innerhalb einer Zementart!

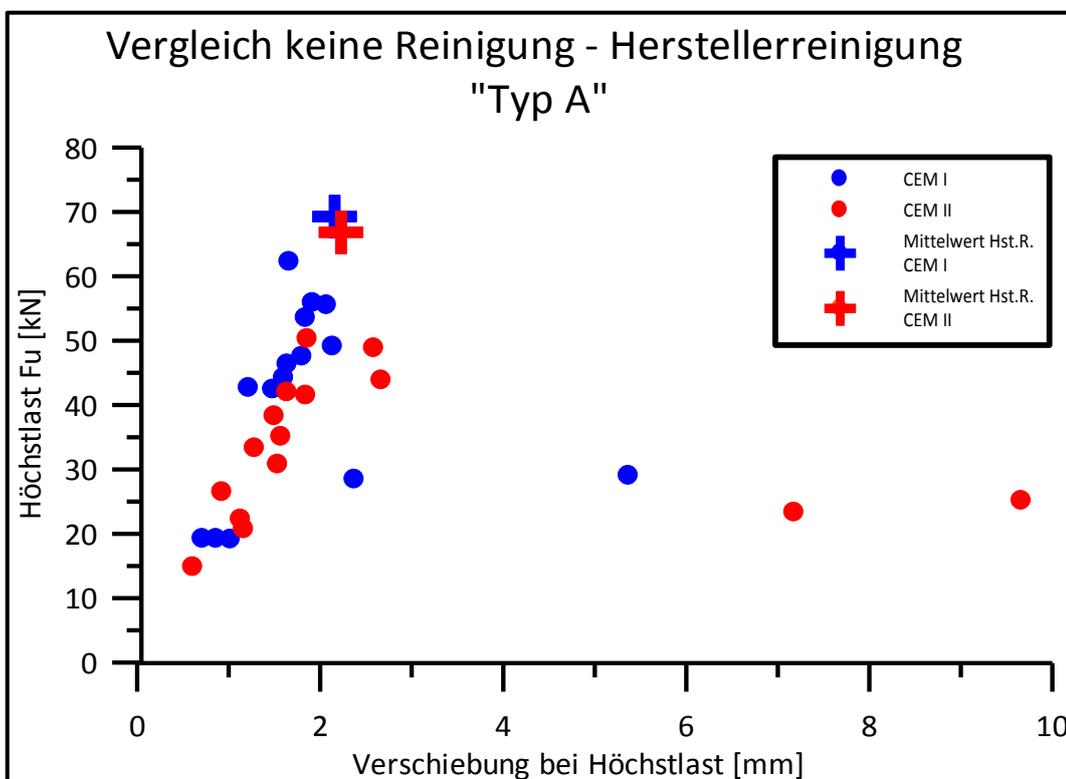


Abbildung 57: Vergleich der Versuchsergebnisse mit „Verbundmörteltyp A“ bei keiner Reinigung bzw. Reinigung nach Herstellerangaben

⁹⁸ Im Anhang ab Seite A:22

7.8.3 Interpretation

Die Beeinflussung der Versuche durch eine mangelhafte Reinigung ist beim System „Typ A“ wie auch beim in Kapitel 7.6 beschriebenen System „Typ B“ vor allem durch die Erhöhung der Streuung gekennzeichnet.

Offenbar sind die Einflüsse auf ein mit Bohrmehl verunreinigtes Bohrloch (Abbildung 58) auch bei nach subjektivem Empfinden absolut gleicher Durchführung⁹⁹ so groß, dass zwischen einer Höchstlast nahe der Referenzlast und einer absolut unbrauchbaren Last von einem Bruchteil der Referenzlast bei Verschiebungen >10 mm jedes Ergebnis erwartet werden muss.



Abbildung 58: Bohrloch nach dem Bohrvorgang. Sichtbar sind anhaftendes Bohrmehl und Abdrücke der Bohrwendel.

Die Versuche mit dem System „Typ A“ bei keiner Reinigung liefern keine aussagekräftigen und nachvollziehbaren Ergebnisse. Eine Aussage zur Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch die verwendete Zementart ist aus diesem Grund kaum möglich. Es scheint aber auch bei mangelhafter Reinigung keinen Einfluss von CEM II – Zement zu geben, und wenn ein Einfluss vorliegen würde, wäre er auf jeden Fall kleiner als die Einflüsse aus der mangelhaften Reinigung.

⁹⁹ Beispielsweise im Hinblick auf die Aushärtezeit

TEIL 8: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der Arbeit wird dargelegt, warum aufgrund der Umweltauswirkungen und besonders der CO₂-Emissionen durch die Zementindustrie die derzeitige Beschränkung auf Portlandzemente (CEM I – Zemente) in der ETAG 001 kritisch betrachtet werden sollte.

Die Einflüsse anderer Zementhauptbestandteile neben Portlandzementklinker auf die Eigenschaften des Zements und des Betons werden auf Grundlage einer umfangreichen Literaturstudie diskutiert. Besonderes Augenmerk liegt in diesem Teil der Arbeit auf den (möglichen) Beeinflussungen der Befestigungselemente. Es konnte kein Hinweis auf eine Beeinflussung oder Beeinträchtigung der Tragfähigkeit und des Tragverhaltens gefunden werden. Insbesondere dann nicht, wenn sich die Bemessung dieser Elemente in gewohnter Weise auf die Druckfestigkeit des Betons bezieht, denn die Druckfestigkeit und besonders die Druckfestigkeitsentwicklung sind sehr wohl von der Zementart beeinflusst.

Um den Eindruck, der durch die Literaturrecherche gewonnen wurde, zu verifizieren und fehlende Punkte abzudecken, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Die Auswertung der Versuchsergebnisse liefert ebenfalls keinen statistisch signifikanten und praktisch relevanten Hinweis auf das Vorhandensein einer Beeinflussung des Tragverhaltens von Befestigungselementen in Beton durch die verwendete Zementart. Diese Aussage muss aber auf die Zementart CEM II/A-LL und die verwendeten Befestigungssysteme beschränkt bleiben, auch wenn nichts auf ein anderes Ergebnis bei anderen Zementarten hinweist.

Die Untersuchungen an Verbundankersystemen mit einer nicht nach Herstellerangaben durchgeführten Bohrlochreinigung erbrachten durch die vielfältigen (aber von der Zementart unabhängigen) Einflüsse keine aussagekräftigen Ergebnisse.

Die Ergebnisse dieser Arbeit wurden am 05.05.2009 im Rahmen eines kurzen Vortrags vor der EOTA - Working Group „Metal Anchors“ in Wien vorgestellt. Die dabei abgegebene Empfehlung, die ETAG 001 im betreffenden Teil auch auf die Gruppe der CEM II – Zemente zu erweitern, fand größtenteils Unterstützung bzw. wurde auch von anderen Teilnehmern in ähnlicher Weise vorgeschlagen [74] und schließlich zur Diskussion in die „Minutes“ aufgenommen [75].

Es ist damit zu rechnen, dass die Beschränkung auf Portlandzement CEM I in Zukunft nicht mehr aufrechterhalten wird.

TEIL 9: VERZEICHNISSE

9.1 Literaturverzeichnis

1. **Unterweger, Roland; Bergmeister, Konrad.** Experimentelle und numerische Untersuchungen von Injektionsankern. *Beton- und Stahlbetonbau*. 1999, 94. Jahrgang, Heft 12. S. 524-536
2. **Eligehausen, Rolf; Mallée, Rainer und Silva, John F.** *Anchorage in Concrete Construction*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2006.
3. **Mallée, Rainer.** *Befestigungs- und Verbindungstechnik*. Wien : Institut für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität für Bodenkultur Wien, 2004.
4. **Bergmeister, Konrad.** *Vorlesungsscript zu Konstruktion VU*. Wien : Institut für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität für Bodenkultur Wien, 2006.
5. **Spieth, Hannes A.** *Tragverhalten und Bemessung von eingemörtelten Bewehrungsstäben*. Stuttgart : Dissertation am Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, 2002.
6. **Eligehausen, Rolf; Fuchs, Werner und Sippel, Thomas M.** Anchorage to Concrete. *Progress in Structural Engineering and Materials*. 1. Jahrgang, 1998, 392-403.
7. **Pregartner, Thilo; Eligehausen, Rolf.** Tragverhalten von Kunststoffdübeln in gerissenem Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 101. Jahrgang, 2006, Heft 1. S. 31-39
8. **Fuchs, Werner und Eligehausen, Rolf.** Das CC-Verfahren für die Berechnung der Betonausbruchlast (3 Teile). *Beton- und Stahlbetonbau*. Heft 1,2 und 3, 1995, 90. Jahrgang.
9. **Cook, R.A., et al.** Behavior and Design of single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete. *ACI Structural Journal*. 95. Jahrgang, 1998, No.1 January-February.
10. **EOTA - European Organisation of Technical Approvals.** *ETAG 001 - Guideline for european technical approval of metal anchors for use in concrete* . Brüssel : EOTA , 1997-2006.
11. **Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.).** Leitlinien für die europäische technische Zulassung für Metaldübel zur Verankerung im Beton. *Mitteilungen*. 28. Jahrgang, 1997, Sonderheft Nr. 16.
12. **Pusill-Wachtsmuth, Peter; Bourgund, Ulrich; Wall, Friedrich.** Zulassungen: Garantierte Sicherheit. In: *Hilti Magazin, Ausgabe 01/2008*. Schaan, Liechtenstein : Hilti Aktiengesellschaft (Hrsg.), 2008.

13. **Bergmeister, Konrad.** Der neue Sinn der Zulassungen. In: *Hilti Magazin* 02/2008. Schaan, Liechtenstein : Hilti Aktiengesellschaft (Hrsg.), 2008.
14. **Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.).** Bauproduktenrichtlinie - Anwendungsbereich. [Online] [Zitat vom: 01. Mai 2009.] <http://www.on-norm.at/publish/807.html>.
15. **Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.); Ellmer, Heimo (Verf.).** *Gegenüberstellung Bauproduktenrichtlinie mit der Construction Products Directive.* Wien : Beuth-Verlagsrepräsentanz, 1998.
16. **ACI - American Concrete Institute Comitee 355 (Hrsg.).** *Qualification of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete.* s.l. : American Concrete Institute, 2004.
17. **ICC Evaluation Service Inc. (Hrsg.).** *Acceptance Criteria for Mechanical Anchors in Concrete Elements.* s.l. : ICC Evaluation Service Inc., 2007.
18. **fischerwerke GmbH & Co. KG (Hrsg.).** *Europäische Technische Zulassung ETA-98/0004 für den fischer-Zykon-Anker FZA, FZA-D, FZA-I erteilt vom Deutschen Institut für Bautechnik am 28.01.2009.* Waldachtal : fischerwerke GmbH & Co. KG, 2009.
19. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).** *Zement-Taschenbuch 51. Auflage.* Düsseldorf : Verlag Bau+Technik, 2008.
20. **Habel, Matthias.** BILD: File: Roemerkanal Buschhoven.jpg (Freie Dokumentationslizenz). *Wikimedia commons.* [Online] [Zitat vom: 22. 03 2009.] http://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Roemerkanal_buschhoven.jpg&oldid=11231752.
21. **Vitruvius.** *De architectura libri decem.* s.a.
22. **Stifter, Franz.** Rome, Sunray in the Pantheon. *Flickr - Fotosharing!* [Online] [Zitat vom: 22. 03 2009.] <http://www.flickr.com/photos/fstifter/1414031894/>.
23. **Locher, Friedrich W.** *Cement - principles of production and use.* Düsseldorf : Verlag Bau + Technik, 2006.
24. **Deutsches Institut für Normung e.V. - Normenausschuss Bauwesen (Hrsg.).** *DIN EN 197-1:2000.* s.l. : Deutsches Institut für Normung e.V., 2001.
25. **Thielen, Gerd und Sprung, Siegbert.** *Europäische Normung am Beispiel Zement. beton.* 1999, Ausgabe 4/99.
26. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).** *Tätigkeitsbericht 2005-2007.* Düsseldorf : s.n., 2007.
27. **Genon, G und Brizio, E.** Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF. *Waste Management.* 28.Jahrgang, 2008, 2375-2385.
28. **Lafarge Perlmooser GmbH.** *Lafarge - Zement & Beton - Ausgangsstoffe - Zementherstellung.* [Online] [Zitat vom: 28. 03 2009.] http://www.lafarge.at/zement_beton/ausgangsstoffe/zementherstellung.html.

29. **Worrell, Ernst; Martin, Nathan; Price, Lynn.** Potentials for energy efficient improvement in the US cement industry. *Energy*. 25. Jahrgang, 2000, 1189-1214.
30. **Gartner, Ellis.** Industrially interesting approaches to "low-CO₂" cements. *Cement and Concrete Research*. 34. Jahrgang, 2004, 1489-1498.
31. **Yilmaz, Bülent; Olgun, Asim.** Studies on cement and mortar containing low-calcium fly ash, limestone, and dolomitic limestone. *Cement & Concrete Composites*. 30. Jahrgang, 2008, 194-201.
32. **Sozialpolitische Arbeitsgemeinschaft der Deutschen Zementindustrie, Industriegewerkschaft Bauen-Agrar-Umwelt, Industriegewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie (Hrsg.).** *Nachhaltigkeit und Zementindustrie*. Düsseldorf : Verlag Bau+Technik, 2002.
33. **Kruspan, Peter; Goessnitzer, Andreas und Batlogg, Thomas.** Die zementtechnologische Stellung von Gebranntem Ölschiefer (BOS). *Kolloquium Zement + Beton*. 2008, Ausgabe 05/08.
34. **Anad, Shalini; Vrat, Prem; Dahiya, R.P.** Application of a system dynamics approach for assessment and mitigation of CO₂ emissions from the cement industry. *Journal of Environmental Management*. 79. Jahrgang, 2006, 338-398.
35. **Bézar, Dennis.** Neue Micropuzzolane zur Verbesserung von Mörtel und Beton. *Kolloquium Zement + Beton*. 2008, Ausgabe 05/08.
36. **Lothenbach, Barbara et al.** Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*. 38. Jahrgang, 2008, 848-860.
37. **Bonavetti, V. et al.** Limestone filler in low w/c concrete: a rational use of energy. *Cement and Concrete Research*. 33. Jahrgang, 2003, 865-871.
38. **Zement+Beton Handels- und Werbeges.m.b.H (Hrsg.).** *Zement - Die Zementerzeugung in Österreich*. Wien : s.n., 2007.
39. **F.A. Finger Institut für Baustoffkunde.** Labor für Elektronenmikroskopie der Bauhaus-Universität Weimar. [Online] [Zitat vom: 11. 03 2009.] <http://www.uni-weimar.de/Bauing/remlabor/index.html>.
40. **Voglis, N. et al.** Portland-limestone cements. Their properties and hydration compared to those of other composite cements. *Cement & Concrete Composites*. 27. Jahrgang, 2005, 191-196.
41. **Müller, Christoph.** Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen im Betonbau. *Beton- und Stahlbetonbau*. 104. Jahrgang, 2009, Heft 2.
42. **Bertoldi, Gerhard A.** *Bindemittel - Grundlagen und Anwendungen*. Renningen-Malmsheim : expert-Verlag, 2001.
43. **Fu, Xinghua et al.** Studies on Portland cement with large amount of slag. *Cement and Concrete Research*. 30. Jahrgang, 2000, 645-649.

44. **Bouasker, M. et al.** Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. *Cement & Concrete Composites*. 30. Jahrgang, 2008, 13-22.
45. **Rehan, R und Nehdi, M.** Carbon dioxide emissions and climate change: policy implications for the cement industry. *Environmental Science & Policy*. 8. Jahrgang, 2005, 105-114.
46. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)**. *Verminderung der CO₂-Emissionen - Beitrag der deutschen Zementindustrie, Monitoring Bericht 2004-2007*. Düsseldorf : s.n., 2008.
47. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)**. *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2006*. Düsseldorf : s.n., 2007.
48. **Huntzinger, Deborah N. und Eatmon, Thomas D.** A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*. 17. Jahrgang, 2009, 668-675.
49. **Hoenig, V.** CO₂-Minderung aus Sicht der Zementindustrie. *Chemie Ingenieur Technik*. 76. Jahrgang, 2004, Bde. 1318-1319.
50. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)**. *CEM II- und CEM III/A- Zemente im Betonbau*. Düsseldorf : Verlag Bau+Technik, 2008.
51. **CEMBUREAU (Hrsg.)**. *Climate Change, Cement and the EU - The European Cement Industry Contribution to Emission Reduction*. Brüssel : s.n., 1998.
52. **CEMBUREAU (Hrsg.)**. *Sustainable Cement Production*. Brüssel : s.n., 2009.
53. **Schulter, Danilo**. Ökobilanz Zementgebundener Bauprodukte - Chancen und Risiken. *Kolloquium Zement + Beton*. 2008, Ausgabe 04/08.
54. **Hauer, Bruno (Forschungsinstitut der Zementindustrie - Düsseldorf)**. Über die Verwendung der Zementarten in Deutschland. *Persönliche Mitteilung per Mail vom 25.02.2009*.
55. **Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.)**. Zemente und ihre Herstellung. *Zementmerkblatt Betontechnik*. B1 1.2006, 2006.
56. **Woltron, Günther**. Hochfeste Sulfathüttenzementbetone. *Kolloquium Zement + Beton*. 2008, Ausgabe 05/08.
57. **Coppola, Luigi**. *Folien zur Vorlesung: Qualificazione di materiali e prodotti per uso strutturale secondo DM 14.01.2008*. Dalmine (BG) : Università di Bergamo - Laboratorio Prove Materiali - Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, 2008.
58. **Elices, M. und Rocco, C.G.** Effect of aggregate size on the fracture and mechanical properties of a simple concrete. *Engineering Fracture Mechanics*. 75. Jahrgang, 2008, 3839-3851.

59. **Kupfer, Herbert (Hrsg.); Grübl, Peter; Weigler, Helmut.** *Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften (erschieden in der Reihe "Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau")*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2001.
60. **Müller, H.S. und Reinhardt, H.W.** (Verf.) Beton. In: *Betonkalender 2009 - Konstruktiver Hochbau - Aktuelle Massivbaunormen*. Herausgegeben von: K.Bergmeister; F. Fingerloos; J.D. Wörner. 19. Jahrgang. Berlin : Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2009.
61. **Dellantonio, Michael; Guggenberger, Theodor.** *Ideale und reale Strukturen - Anwendung im Brückenbau - Bakkalaureatsarbeit eingereicht an der Universität für Bodenkultur, Wien*. Wien : s.n., 2007. (unveröffentlicht).
62. **Strauss, Werner.** *Modelling of Concrete Boreholes*. Wien : Diplomarbeit am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur Wien, 1998.
63. **Unterweger, Roland.** *Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von chemischen Verankerungen*. Wien : Dissertation am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Universität für Bodenkultur Wien, 1999.
64. **Unterweger, Roland; Bergmeister, Konrad.** Investigations of Concrete Boreholes for Bonded Anchors. *2nd Int, PhD Symposium in Civil Engineering, Budapest*. 1998.
65. **Hilti Aktiengesellschaft (Hrsg.).** *Europäische Technische Zulassung ETA-07/0260 für das Injektionssystem Hilti HIT-RE 500-SD für gerissenen Beton erteilt vom Deutschen Institut für Bautechnik am 08.11.2007*. Schaan (LIE) : HILTI AG, Business Unit Anchors, 2007.
66. **Tsivilis, S. et al.** The permeability of Portland limestone cement concrete. *Cement and Concrete Research*. 33. Jahrgang, 2003, 1465-1471.
67. **Kakali, G. et al.** Parameters affecting thaumasite formation in limestone cement mortar. *Cement & Concrete Composites*. 25. Jahrgang, 2003, 977-981.
68. **Lipus, Klaus; Puntke, Stefan.** Sulfatwiderstand unterschiedlich zusammengesetzter Betone. *Betontechnische Berichte*. Düsseldorf : s.n., 2003.
69. **Guggenberger, Theodor.** *Einfluss der Zementart auf das Tragverhalten von Befestigungsmitteln in Beton - Forschungsbericht (Zwischenbericht) Nr. 875-08-007*. Wien : Institut für Konstruktiven Ingenieurbau an der Universität für Bodenkultur Wien, 2008. (unveröffentlicht).
70. **Fa. Friedrich Rau GmbH & Co. KG.** *Lieferscheine und Prüfprotokolle Auftragsnr. 233-08*. Ebhausen : s.n., 2008. (unveröffentlicht).
71. **Fa. walter + bai AG.** *Kalibrier-Zertifikat Nr. F/D106928*. Löhningen (CH) : Walter + Bai AG, von der Schweizerischen Akkreditierungsstelle akkreditierte Kalibrierstelle, 2008. (unveröffentlicht).

72. **Hoffmann, Jörg (Hrsg.)**. *Taschenbuch der Messtechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2007.
73. **Stahel, Werner A.** *Statistische Datenanalyse - Eine Einführung für Naturwissenschaftler*. Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, 2008.
74. **Eligehausen, Rolf**. ETAG 001, Annex A. *doc. 702 EOTA WG "Metal Anchors"*. Stuttgart : s.n., 2009.
75. *Minutes of the Meeting of EOTA Working Group 06.01/03 - Amendment ETAG 001 "Metall Anchors" in Vienna on 05 May 2009 (doc. 706)*. **DiBt - Deutsches Institut für Bautechnik (Hrsg.)**. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2009.
76. **Adam, Thomas**. Einfluss der Nachbehandlung und verschiedener relativer Luftfeuchtigkeiten auf die Hydratation von Beton. *Beton- und Stahlbetonbau*. 100. Jahrgang, 2005.
77. **Österreichisches Normungsinstitut (Hrsg.)**. *ÖNORM EN 196-1 Prüfverfahren für Zement*. Wien : Österreichisches Normungsinstitut, 1995.

9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkungsweisen von Befestigungen: Formschluss, Kraftschluss, Stoffschluss.....	- 4 -
Abbildung 2: Wegkontrolliert spreizender Deckenabhängiger HILTI DBZ 6/35.....	- 5 -
Abbildung 3: Drehmomentkontrolliert spreizender Ankerbolzen fischer FAZ II M12.....	- 6 -
Abbildung 4: Verbundanker im Beton.....	- 6 -
Abbildung 5: Betonschraube HECO Multi-Monti-Schraubanker 10/100.....	- 7 -
Abbildung 6: Hinterschnittanker fischer FZA 18x80 (nach einem Auszugsversuch fotografiert).....	- 7 -
Abbildung 7: Betonausbruchkegel.....	- 8 -
Abbildung 8: Grenzflächenversagen bei Verbunddübeln. Oben Interface Mörtel-Gewindestange, unten Interface Mörtel-Beton.....	- 9 -
Abbildung 9: Beispiel für ein Interaktionsdiagramm aus ETAG 001 Annex C [10].....	- 10 -
Abbildung 10: Beispiel für einen Verpackungsaufdruck eines nach ETAG 001 zugelassenen Dübels.....	- 14 -
Abbildung 11: Versagenswahrscheinlichkeit.....	- 16 -
Abbildung 12: Beton im Wasserbau. Römischer Kanal bei Bonn [20], Donaukraftwerk Freudenu.	- 19 -
Abbildung 13: Kuppel des Pantheon in Rom. Leichtbeton in Kassettenschalbauweise, um 120 n.Chr. [22].....	- 20 -
Abbildung 14: Dreistoffdiagramm von Klinker und ausgewählten Sekundärrohstoffen. Aus [19].....	- 24 -
Abbildung 15: Ablauf der Zementherstellung aus Portlandzementklinker. Aus [28].....	- 26 -
Abbildung 16: Temperaturzonen, Verweildauer und Mineralneubildungen in einer Drehofenanlage mit Zyklonvorwärmer. Aus [19].....	- 28 -
Abbildung 17: ESEM-Aufnahme von Steinkohlenflugaschepartikeln. Aus [19].....	- 31 -
Abbildung 18: Kugelmühle (aus [38]).....	- 36 -
Abbildung 19: CSH-Phase nach 24 Stunden Reaktionszeit. ESEM- Aufnahme aus [19].....	- 38 -
Abbildung 20: Trikalziumaluminatsulfathydrat (Ettringit). ESEM-Aufnahme aus [39].....	- 39 -
Abbildung 21: Bildung der Hydratphasen bei der Hydratation von Portlandzementklinker mit optimal angepasstem Sulfatträger. Aus [19].....	- 40 -
Abbildung 22: Hydratation des Zementkorns nach Wasserzementwert. Aus [19].....	- 41 -
Abbildung 23: Verlauf der Hydratationswärmeentwicklung ausgewählter Zementsorten. Aus [19].....	- 44 -

Abbildung 24: Zementstein nach 28 Tagen Hydratation. Aus [19].	- 45 -
Abbildung 25: Brennstoffenergieverbrauch der Zementindustrie in Deutschland. Aus [19], verändert.	- 47 -
Abbildung 26: Anteil der Verfahrensschritte an der CO ₂ -Emission der deutschen Zementindustrie im Mittelwert von 2004-2007. Daten aus [46].	- 48 -
Abbildung 27: Brennstoffenergieeinsatz in der deutschen Zementindustrie. Quelle: [19].	- 50 -
Abbildung 28: spezifische CO ₂ Emissionen bei Zementen mit Hüttensandanteil. [19]	- 52 -
Abbildung 29: Relative Druckfestigkeit von Beton mit verschiedenen Zementen. Aus [19]; verändert.	- 60 -
Abbildung 30: Dreipunkt-Biegezugversuch zur Ermittlung der Bruchenergie und Versuch zur Ermittlung des E-Moduls von Beton. Aus [61].	- 62 -
Abbildung 31: Auszug aus der ETA-07/0260 [66]: Reinigungsanleitung für das Injektionsmörtelsystem HILTI HIT-RE 500-SD	- 65 -
Abbildung 32: Phasenverteilung im Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert. Aus [19].	- 67 -
Abbildung 33: Ansicht der Prüfmaschine	- 75 -
Abbildung 34: Versuchsaufbau	- 77 -
Abbildung 35: Unbehinderter Betonausbruch	- 77 -
Abbildung 36: Confined Test aus ETAG 001 Part 5 [10].	- 78 -
Abbildung 37: Versuchsaufbau für die Versuche an den Verbunddübeln	- 79 -
Abbildung 38: Stahldrahtbürste zur Bohrlochreinigung	- 79 -
Abbildung 39: Klebefehler als Grund für die Ablehnung von Versuchsergebnissen	- 84 -
Abbildung 40: Ausbruchkegel eines Hinterschnittankers	- 85 -
Abbildung 41: Last-Verschiebungs-Diagramm ausgewählter Versuche mit Hinterschnittankern	- 86 -
Abbildung 42: Grenzflächenversagen zwischen Gewindestange und Verbundmörtel	- 88 -
Abbildung 43: Mischbruch als Versagensursache beim verwendeten System „Typ B“	- 89 -
Abbildung 44: Typische Last-Verschiebungs-Kurven „Typ A“	- 89 -
Abbildung 45: Last-Verschiebungs-Diagramme für Systemtyp „B“	- 91 -
Abbildung 46: Mischbruch des Systems „Typ B“ bei der Hälfte der vorgegebenen Reinigung	- 93 -
Abbildung 47: Typische Last-Verschiebungs-Diagramme „Typ B halbe Reinigung“	- 94 -
Abbildung 48: Versagensursachen beim System „Typ B“ bei optimaler Reinigung	- 96 -

Abbildung 49: Last-Verschiebungs-Kurven bei über die Herstellerangaben hinausgehender Reinigung.....	- 97 -
Abbildung 50: Versagensarten beim Versuch „Typ A – keine Reinigung“	- 98 -
Abbildung 51: Typische Last-Verschiebungs-Kurven beim Versuch „Typ A – keine Reinigung“	- 99 -
Abbildung 52: Vergleich der Auftretenswahrscheinlichkeiten für die Hinterschnitt-Versuche	- 107 -
Abbildung 53: Schematischer Vergleich der normierten Last-Verschiebungskurven.....	- 108 -
Abbildung 54: Vergleich der Verteilungsfunktionen für die Bruchlasten des Systems „Typ B“	- 113 -
Abbildung 55: Auszug eines gesamten Verbundmörtelkörpers durch das Durchgangsloch	- 120 -
Abbildung 56: Interpretation von Versuch Nr. 4 CEM I aus Abbildung 48	- 120 -
Abbildung 57: Vergleich der Versuchsergebnisse mit „Verbundmörteltyp A“ bei keiner Reinigung bzw. Reinigung nach Herstellerangaben ...	- 124 -
Abbildung 58: Bohrloch nach dem Bohrvorgang. Sichtbar sind anhaftendes Bohrmehl und Abdrücke der Bohrwendel.....	- 125 -

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: fischer Zykon Anker FZA 18x80, Beiwerte für das Bemessungsverfahren A. Aus [18].....	- 17 -
Tabelle 2: Zementarten [24]	- 34 -
Tabelle 3: Zementfestigkeitsklassen [24].....	- 34 -
Tabelle 4: Zusammensetzung der Normzemente [24].....	- 35 -
Tabelle 5: Hydratationswärmeentwicklung ausgewählter Zementarten [19]....	- 44 -
Tabelle 6: Spezifische CO ₂ -Emissionen der Zementherstellung.....	- 48 -
Tabelle 7: Anwendung von Zementen nach EN 197 für Beton gemäß EN 206 / DIN 1045-2. Nach [55]; verändert.	- 55 -
Tabelle 8: Marktanteile bestimmter Normzemente in ausgewählten Ländern..	- 57 -
Tabelle 9: Betonzusammensetzung der Prüfkörper [71]	- 73 -
Tabelle 10: Eigenschaften und Parameter der verwendeten Gewindestangen	- 74 -
Tabelle 11: Versuchsergebnisse Hinterschnittanker CEM I	- 86 -
Tabelle 12: Versuchsergebnisse Hinterschnittanker CEM II.....	- 87 -
Tabelle 13: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „Typ A“ bei Reinigung nach Herstellervorgabe.....	- 90 -
Tabelle 14: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „Typ B“ bei Reinigung nach Herstellervorgabe.....	- 92 -
Tabelle 15: Versuchsergebnisse CEM I – Typ B – halbe Reinigung	- 94 -
Tabelle 16: Versuchsergebnisse CEM II – Typ B – halbe Reinigung.....	- 95 -
Tabelle 17: Versuchsergebnisse Verbundmörtelsystem „B“ bei optimaler Reinigung	- 97 -
Tabelle 18: Versuchsergebnisse CEM I – Typ A – keine Reinigung	- 100 -
Tabelle 19: Versuchsergebnisse CEM II – Typ A – keine Reinigung.....	- 101 -
Tabelle 20: Statistische Parameter Hinterschnitt.....	- 106 -
Tabelle 21: Hypothesentest Hinterschnitt.....	- 107 -
Tabelle 22: Statistische Parameter „Typ A“ Herstellerreinigung	- 109 -
Tabelle 23: Hypothesentest „Typ A Herstellerreinigung“	- 110 -
Tabelle 24: Statistische Parameter „Typ B Herstellerreinigung“	- 111 -
Tabelle 25: Hypothesentest „Typ B Herstellerreinigung“	- 112 -
Tabelle 26: Statistische Parameter „Typ B - halbe Reinigung“	- 115 -
Tabelle 27: Hypothesentest „Typ B - halbe Reinigung“	- 116 -
Tabelle 28: Übersicht der P-Werte für die Versuche mit halber Reinigung.....	- 117 -
Tabelle 29: Statistische Parameter „Typ B - optimale Reinigung“	- 118 -
Tabelle 30: Hypothesentest „Typ B - optimale Reinigung“	- 119 -
Tabelle 31: Übersicht über die P-Werte aller Versuche mit Sytemtyp „B“	- 121 -
Tabelle 32: Statistische Parameter „Typ A - keine Reinigung“	- 123 -

TEIL 10: ANHANG

10.1 Versuchsprotokolle

1.	CEM I – Hinterschnitt	A:2
2.	CEM II – Hinterschnitt.....	A:4
3.	CEM I – „Typ A“ – Herstellerreinigung	A:6
4.	CEM II – „Typ A“ – Herstellerreinigung.....	A:8
5.	CEM I – „Typ B“ – Herstellerreinigung	A:10
6.	CEM II – „Typ B“ – Herstellerreinigung.....	A:12
7.	CEM I – „Typ B“ – halbe Reinigung.....	A:14
8.	CEM II – „Typ B“ – halbe Reinigung.....	A:16
9.	CEM I – „Typ B“ – optimale Reinigung.....	A:18
10.	CEM II – „Typ B“ – optimale Reinigung.....	A:20
11.	CEM I – „Typ A“ – keine Reinigung.....	A:22
12.	CEM II – „Typ A“ – keine Reinigung.....	A:24

Department für Bautechnik + Naturverfahren



A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfart		C20/25 CEM I		CEM I HINTERSCHNITT		Blatt		1/2	
Prüfverantwortlicher	IKI-Prüfhalle, Wien		Beton	C20/25 CEM I		Bohrgerät			
Prüfer	T. Guggenberger		Probekörper	Cube 150		Bohrer			
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		Prüfkörper [cm]	190x190x30		Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]		19,04	
Auszugeschw.	0,08 mm/s		Prüfkörper-Nr.	233-08 C1		Bohrrichtung		senkrecht	
Abstützweite	> 160 mm		Herstelldatum	16.07.2008		Bohrlochreinigung		ausaugen	
Randabstand	> 120 mm		Zustand	ungerissen		Hammergewicht [g]		1500	
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I - Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton								
Dübel	Hinterschnitt								
Versuch Nr.	1 + 2		Prüfdatum	A: 26.08.2008 B: 29.10.2008					

Allgemein		Bohren und Setzen			Versagensursache				Auswertung			Bemerkungen						
Versuch Nr.	Prüfdatum	Bohrlochtiefe [mm]	Risbreite vor dem Setzen [mm]	Setzen [mm]	Hammerschläge	Verschiebung bei T _{inst} [mm]	Dübelauszug	Durchzug Konus	Stahlbruch	Spalten	Betonbruch		Bruchkörper Kegel (D,d,t) [cm]					
1	A	80	80,0	3	3	3,00						80/80/8	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]	Weg bei F _{u,m} /2 [mm]	Betonfestigkeit am Prüftag [MPa]	Bruchlast normiert auf f _{c,ref} =25 [N/mm ²]	
2	A	80	80,0	5	5	1,50						80/34/8	56,32	6,47	1,42	30,11	51,32	56,01
3	A	80	80,0	5	5	-						70/65/8	60,37	3,67	0,67	30,11	55,01	55,01
4	A	80	80,0	2	2	1,90						85/35/8	61,92	4,19	0,98	30,11	56,42	56,42
5	A	80	80,0	3	3	2,02						60/45/8	58,10	3,96	0,91	30,11	52,94	52,94
6	B	80	80,0	3	3	2,93						46/46/8	69,89	4,56	0,84	33,42	60,45	60,45
7	B	80	80,0	3	3	2,58						50/45/8	64,18	6,94	1,87	33,42	55,51	55,51
8	B	80	80,0	3	3	4,24						60/50/8	62,51	5,50	1,95	33,42	54,06	54,06
9	B	80	80,0	4	4	1,84						60/37/8	64,87	5,50	1,47	33,42	56,11	56,11
10	B	80	80,0	3	3	3,94						45/45/8	61,27	5,11	1,47	33,42	52,99	52,99

Mittelwert	Höchstlast		Verschiebung			t-Test der Serien zueinander		1. Serie		2. Serie		Grenzwert t-Verteilung
	F _{u,m} [kN]	S _{u,m,z} [mm]	s _{u,m,z} [mm]	s [mm]	v [%]	Seiten	Konfidenzintervall	Anzahl	Standardabweichung	Beurteilung		
Standardabweichung	62,09	3,75	6,04	1,30	0,43	2	0,95	5	2,160	2,859	2,306	Testgröße t
Variationskoeffizient					33,48				2,534		0,927	
Beurteilung	Serien passen statistisch zusammen											

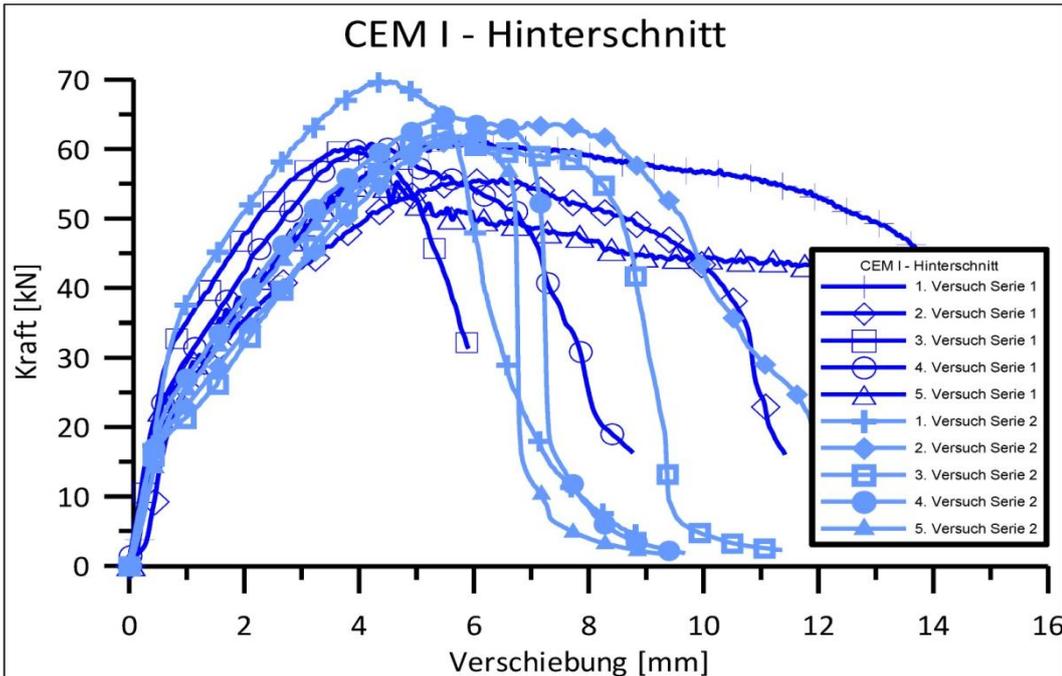


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I HINTERSCHNITT

Versuch Nr.	1 + 2	Dübel	Hinterschnitt
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 26.08.2008 B: 29.10.2008	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	siehe unten	Anzugsdrehmoment T_{inst} [Nm]	60
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]	19,04



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Versagensursache	Kegel [cm]	Bemerkungen
1	61,47	5,6	1,4	Betonbruch	80/80/8	
2	56,32	6,5	1,4	Betonbruch	80/34/8	
3	60,37	3,7	0,7	Betonbruch	70/65/8	
4	61,92	4,2	1,0	Betonbruch	85/35/8	
5	58,10	4,0	0,9	Betonbruch	60/45/8	
6	69,89	4,6	0,8	Betonbruch	46/46/8	
7	64,18	6,9	1,9	Betonbruch	50/45/8	
8	62,51	5,5	2,0	Betonbruch	60/50/8	
9	64,87	5,5	1,5	Betonbruch	60/37/8	
10	61,27	5,1	1,5	Betonbruch	45/45/8	
11						
12						



Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
Teli: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Table with 4 columns: Prüfort, Prüferantwortlicher, Prüfer, Prüfmaschine, Abstützweite, Randabstand, Versuchsbezeichnung, Dübel, Versuch Nr., and Blatt. Includes details for CEM II Hinterschnitt test.

Table with 2 columns: Versuch Nr. and Verankerungstiefe [mm]. Lists 10 test specimens.

Table with 4 columns: Bohren und Setzen (Bohrhohtiefe, Rissbreite, Setzen, Hammerschläge), Verschiebung bei Tinst, and Versagensursache (Dübelanzug, Durchzug Konus, Stahlbruch, Spalten, Betonbruch, Bruchkörper).

Table with 4 columns: Auswertung (Bruchlast Fu, Weg bei Fu, Weg bei Fu,m/2, Betonfestigkeit am Prüftag, Bruchlast normiert auf fcref=25), and Bemerkungen.

Table with 2 columns: Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient, and Beurteilung. Summary statistics for the test series.

Table with 2 columns: Höchstlast (Fum, s, v) and Verschiebung (Skum/z, s, v). Maximum load and displacement data.

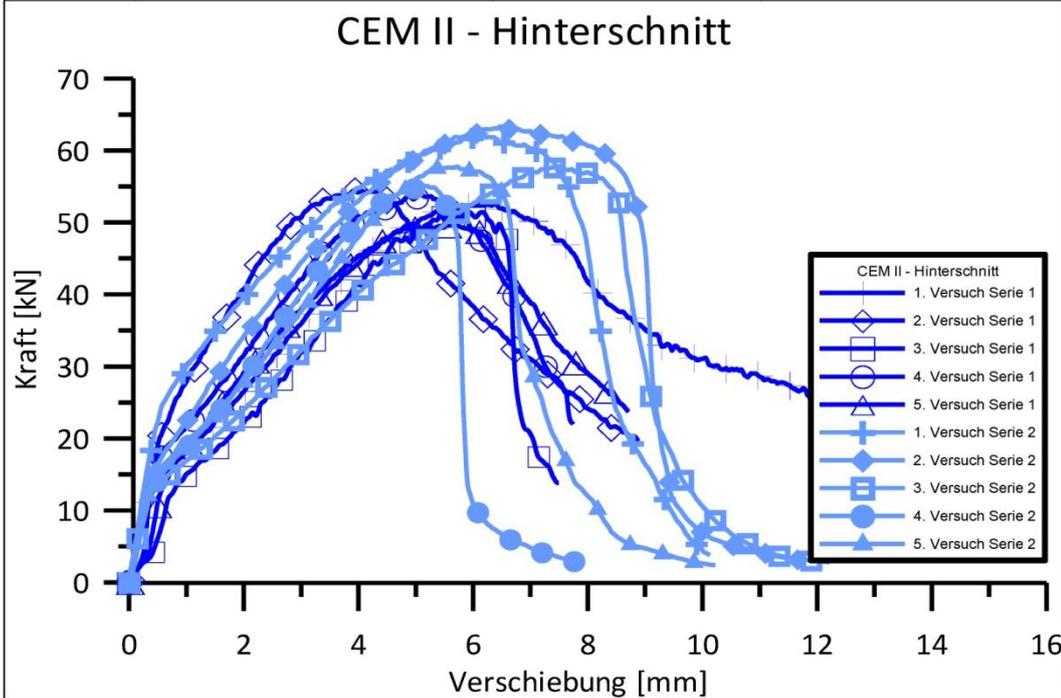
Table with 2 columns: t-Test der Serien zueinander (Seiten, Konfidenzintervall, Anzahl, Standardabweichung) and Beurteilung. Statistical analysis results.



A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Versuch Nr.	1 + 2	Dübel	Hinterschnitt
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 27.08.2008 B: 30.10.2008	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	siehe unten	Anzugsdrehmoment T_{inst} [Nm]	60
Prüfmaschine	IKI-01-ZZUG	Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]	19,04



Versuch Nr.	Bruchlast F_u [kN]	Weg bei F_u [mm]	s bei $F_{u,m}/2$ [mm]	Versagensursache	Kegel [cm]	Bemerkungen
1	52,99	6,0	2,0	Betonbruch	80/80/8	
2	54,86	3,9	0,9	Betonbruch	80/34/8	
3	53,62	6,2	2,4	Betonbruch	70/65/8	
4	54,28	5,2	1,5	Betonbruch	85/35/8	
5	49,96	5,7	1,8	Betonbruch	60/45/8	
6	62,24	6,1	1,1	Betonbruch	46/46/8	
7	63,51	6,4	1,8	Betonbruch	50/45/8	
8	57,92	7,5	2,6	Betonbruch	60/50/8	
9	55,39	2,0	2,0	Betonbruch	60/37/8	
10	57,88	5,7	2,1	Betonbruch	45/45/8	
11						
12						

Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfart	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM I	CEM I - Typ "A" - HERSTELLERREINIGUNG	Blatt	1/2
Prüferverantwortlicher	T. Guggenberger	Probekörper	Cube 150	C1 A RH	Bohrgerät	
Prüfer	T. Guggenberger	Prüfkörper [cm]	190x190x30		Bohrer	SDS 14
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Prüfkörper-Nr.	233-08 C1A		Schneidendurchmesser d _{cut} [mm]	-
Auszugschw.	0,08 mm/s	Herstelldatum	16.07.2008		Bohrrichtung	senkrecht
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen	Bohrlochreinigung	Herstellangaben	
Randabstand	> 144 mm	β_w			2x Druckluft 6 bar	
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton					
Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9					
Versuch Nr.	1	Prüfdatum	03.09.2009			

Versuch Nr.	Bohren und Setzen			Versagensursache			Auswertung					Bemerkungen		
	Bohrhöhe [m]	Zeitpunkt des Setzens	Zeitpunkt der Durchführung	Aushärtezeit [h:min]	Bruch Interface Mörtel- Gewindestange	Bruch Interface Mörtel- Beton	Betonbruch	Bruchkörper Kegel (D,d,t) [cm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [m]	Weg bei F _{u,m} /2 [m]		Prüfag [MPa]	Verbundspannung [N/mm ²]
1	18,04	11:10	8:50	21:40	X				61,84	2,20	0,93	19,24	17,09	
2	18,04	11:13	9:02	21:49	X				69,60	1,76	0,80	19,23	19,32	
3	18,04	11:17	9:11	21:54	X				69,94	2,05	1,01	19,32	20,97	
4	18,04	11:19	9:24	22:05	X				75,89	2,37	0,88	19,32		
5	18,04	11:22	9:31	22:09	X					2,37	1,01			
6														
7														
8														
9														
10														

Mittelwert	Höchstlast			Verschiebung			t-Test der Serien zueinander		Beurteilung
	F _{u,m} [kN]	s [mm]	v [%]	S _{sum/2} [mm]	s [mm]	v [%]	1. Serie	2. Serie	
	69,38	4,99	7,19	0,93	0,09	9,47			
Standardabweichung									
Variationskoeffizient									
Beurteilung									

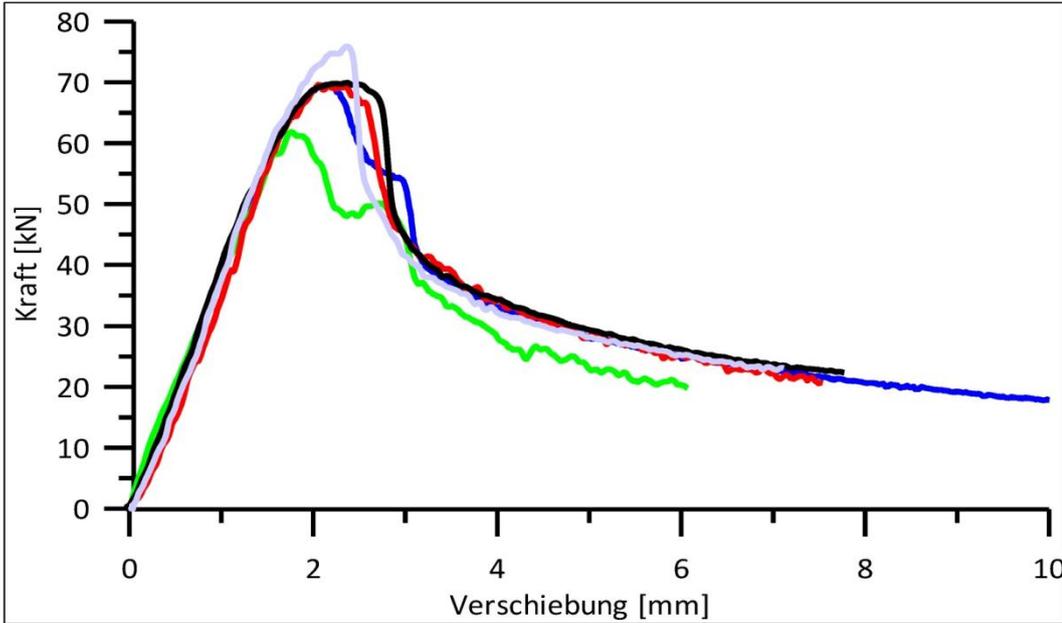


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I - Typ "A" - HERSTELLERREINIGUNG

Versuch Nr.	1	Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	03.09.2009	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	69,62	2,2	0,9	19,24	
2	61,84	1,8	0,8	17,09	
3	69,60	2,1	1,0	19,23	
4	69,94	2,4	0,9	19,32	
5	75,89	2,4	1,0	20,97	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfort	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM I
Prüferantwortlicher	T.Guggenberger	Probekörper	Cübe 150
Prüfer	T.Guggenberger	Prüfkörper [cm]	190x190x30
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Prüfkörper-Nr.	233-08 CZA
Auszuggeschw.	0,08 mm/s	Herstellidatum	15.07.2008
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen
Randabstand	> 144 mm	Bw	
Versuchsbezeichnung	DA-Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9		
Versuch Nr.	1	Prüfdatum	03.09.2009

CEM II -Typ "A" - HERSTELLERREINIGUNG	Blatt	1/2
Bohrgerät	Bohrer	
Schneiddurchmesser d_{cut} [mm]	-	
Bohrrichtung	senkrecht	
Bohrlochrreinigung	Herstellereingaben	
	2x Druckluft 6 bar	
	2x Bürsten	
	2x Druckluft 6 bar	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Bruchlast F_u [kN]	62,63	1,90	0,78
Weg bei F_u [mm]	69,31	2,85	0,89
Weg bei F_{u,m}/2 [mm]	64,24	2,27	0,82
Bruchlast F_{u,m}/2 [kN]	62,19	2,04	0,80
Bruchlast F_{u,m}/2 [mm]	76,26	2,06	0,84
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]			
Verbundspannung [N/mm²]		17,31	
Bruchlast normiert auf f_{c,ref}=25 [N/mm²]		19,15	

Mittelwert	F _{u,m} [kN]: 66,93	Verschiebung	0,83
Standardabweichung	s [kN]: 5,93	S _{ku,m/2} [mm]:	0,04
Variationskoeffizient	v [%]: 8,87	s [mm]:	5,02
		v [%]:	
Beurteilung			



Department für Bautechnik + Naturgefahren

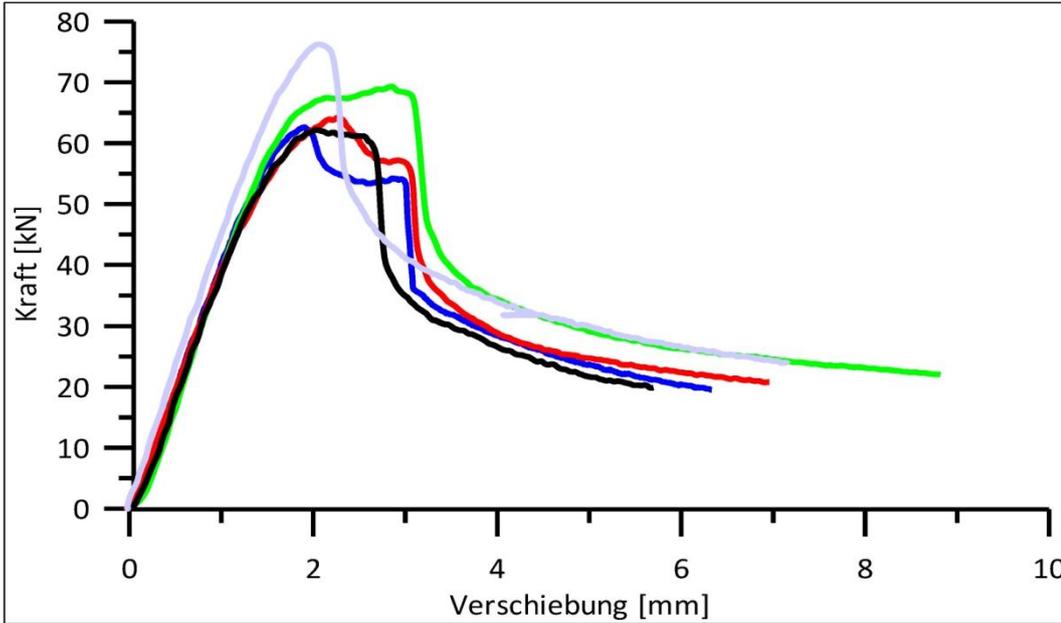
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Blatt 2/2

CEM II - Typ "A" - HERSTELLERREINIGUNG

Versuch Nr.	1	Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	03.09.2009	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	62,63	1,9	0,8	17,31	
2	69,31	2,8	0,9	19,15	
3	64,24	2,3	0,8	17,75	
4	62,19	2,0	0,8	17,18	
5	76,26	2,1	0,8	21,07	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Department für Bautechnik + Naturgefahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Teil: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfart	Beton	C20/25 CEM I
Prüfverantwortlicher	IKI-Prüfhalle, Wien	
Prüfer	T.Guggenberger	Cübe 150
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	190x190x30
Auszugsgeschw.	0,05 mm/s	233-08 C1A
Abstützweite	> 192 mm	16.07.2008
Randabstand	> 144 mm	ungerissen
Versuchsbezeichnung	DA-Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton	
Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9	
Versuch Nr.	1	29.09.2008

CEM I - Typ "B" - HERSTELLERREINIGUNG	Blatt	1/2
Bohrgerät	Bohrer	SDS 14
Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]		-
Bohrrichtung		senkrecht
Bohrlochrreinigung		Herstellereingaben
		3x Druckluft 6 bar
		3x bürsten
		3x Druckluft 6 bar

C1 B RH	
Versuch Nr.	1
Prüfdatum	29.09.2008

Versuch Nr.	Allgemein		Bohren und Setzen				Versagensursache			Auswertung				Bemerkungen		
	Bohrung confinement	Verankerungstiefe [mm]	Bohrhöhe [mm]	Zeitpunkt des Setzens	Zeitpunkt der Durchführung	Durchführungszeit [h:min]	Bruch Interface Mörtel-Gewindestange	Bruch Interface Mörtel-Beton	Betonbruch	Bruchkörper Kegel (D,d,t) [cm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]	Weg bei F _{u,m} /2 [mm]		Betonfestigkeit am Prüftag [MPa]	Verbundspannung [N/mm ²]
1	18,04	96	110,0	-	10:30	>50					103,02	3,60	1,03	28,46	28,46	
2	18,04	96	110,0	-	10:30	>50	X				93,83	4,18	1,36	25,93	25,93	
3	18,04	96	110,0	-	10:30	>50	X	X			86,35	3,33	0,94	23,86	23,86	Versuch ungültig aufgrund einer Fehlstelle im Verbundmörtel
4	18,04	96	110,0	-	10:30	>50	X	X			100,41	3,55	1,21	27,74	27,74	
5	18,04	96	110,0	-	10:30	>50	X	X			96,34	4,39	1,35	26,62	26,62	
6																
7																
8																
9																
10																

Mittelwert	Höchstlast	Verschiebung
Standardabweichung	F _{u,m} [kN]: 98,40	S _{rel,m/z} [mm]: 1,18
Variationskoeffizient	s [kN]: 4,10	s [mm]: 0,19
	v [%]: 4,17	v [%]: 16,03
Beurteilung		

t-Test der Serien zueinander	1. Serie	2. Serie
Seiten		
Konfidenzintervall		
Anzahl		
Standardabweichung		
Beurteilung		

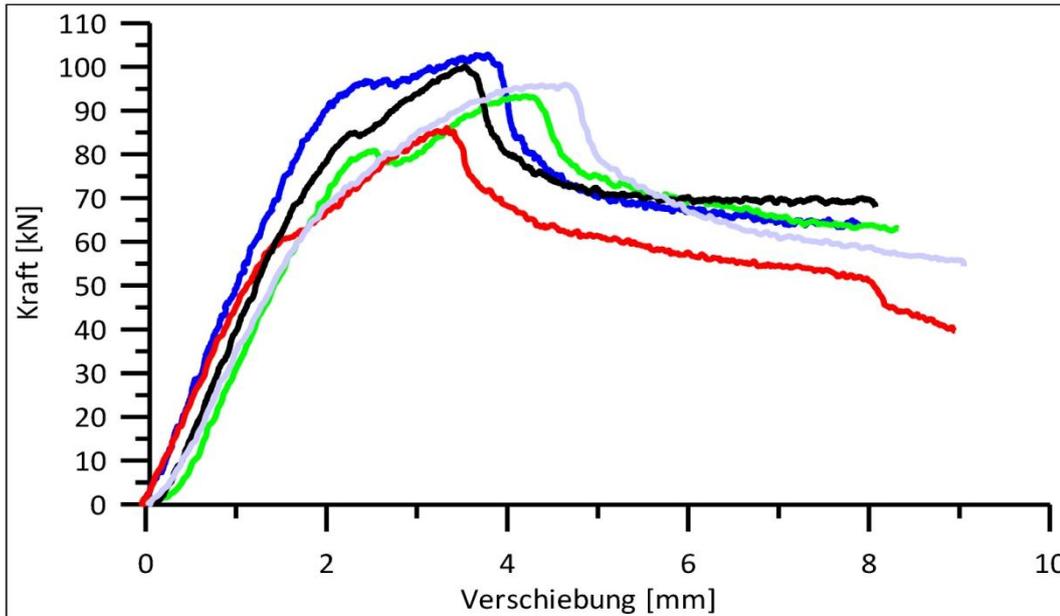


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I - Typ "B" - HERSTELLERREINIGUNG

Versuch Nr.	1	Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	29.09.2008	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	103,02	3,6	1,0	28,46	
2	93,83	4,2	1,4	25,93	
3	86,35	3,3	0,9	23,86	Versuch ungültig
4	100,41	3,5	1,2	27,74	
5	96,34	4,4	1,4	26,62	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

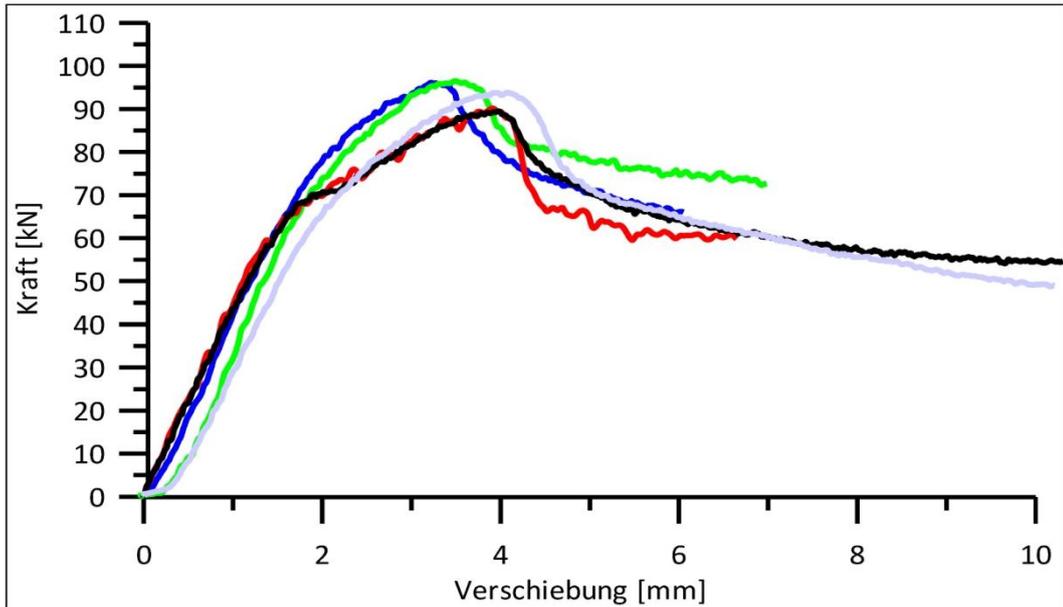


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM II - Typ "B" - HERSTELLERREINIGUNG

Versuch Nr.	1	Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	29.09.2008	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	96,53	3,2	1,2	26,67	
2	97,23	3,5	1,3	26,87	
3	90,76	3,9	1,0	25,08	
4	89,79	4,0	1,0	24,81	
5	93,90	4,0	1,4	25,95	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					



Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfort	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM II	Blatt	1/2
Prüferantwortlicher	T. Guggenberger	Probekörper	Cube 150	Bohrgerät	Bohrer SDS 14
Prüfer	T. Guggenberger	Prüfkörper [cm]	190x190x30	Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]	-
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Prüfkörper-Nr.	233-08 C1	Bohrrichtung	senkrecht
Auszuggeschw.	0,05 mm/s	Hersteldatum	16.07.2008	Bohrlochräumung	1/2 Herstellerangaben
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen		1x bürsten
Randaabstand	> 144 mm	β_w			1x Druckluft 6 bar
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton				
Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9				
Versuch Nr.	1+2	Prüfdatum	A: 24.09.2008 B: 11.10.2008		

Versuch Nr.	Allgemein		Bohren und Setzen		Versagensursache			Auswertung					Bemerkungen			
	Bohrung confinement	Verankerungstiefe [mm]	Bohrlochtiefe [mm]	Zeitpunkt des Setzens	Zeitpunkt der Durchführung 24.09 bzw. 11.10.	Aushärtezeit [h:min]	Bruch Interface Mörtel-Gewindestange	Bruch Interface Mörtel-Beton	Betonbruch	Bruchkörper Kegel (D,d,t) [cm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]		Weg bei F _{u,m} /2 [mm]	Betonfestigkeit am Prüflag [MPa]	Verbundspannung [N/mm ²]
1	18,4	96	110,0	A 15:15	A 11:30	>3d		X			82,20	2,40	1,13	22,71	22,71	Luftabschluss im Verbundmörtel
2	18,4	96	110,0	A 15:15	A 11:30	>3d		X			92,67	4,27	1,01	25,61	25,61	
3	18,4	96	110,0	A 15:15	A 11:30	>3d		X			94,23	2,74	1,00	26,04	26,04	
4	18,4	96	110,0	A 15:15	A 11:30	>3d	X				107,66	4,21	1,20	29,75	29,75	
5	18,4	96	110,0	A 15:15	A 11:30	>3d		X			100,73	4,19	1,24	27,83	27,83	
6	18,4	96	110,0	B	B 10:00	>3d		X			77,95	4,33	1,43	21,54	21,54	
7	18,4	96	110,0	B	B 10:00	>3d		X			78,88	5,60	2,69	21,80	21,80	
8	18,4	96	110,0	B	B 10:00	>3d		X			80,42	4,34	2,14	22,22	22,22	
9	18,4	96	110,0	B	B 10:00	>3d		X			76,00	4,06	1,51	21,00	21,00	
10	18,4	96	110,0	B	B 10:00	>3d		X			68,26	3,43	1,54	18,86	18,86	

Mittelwert	F _{u,m} [kN]:	86,31	S _{sum,z} [mm]:	1,49
Standardabweichung	s [kN]:	13,03	s [mm]:	0,54
Variationskoeffizient	v [%]:	15,10	v [%]:	36,19
Beurteilung	-			

t-Test der Serien zueinander	1. Serie	2. Serie
Seiten	2	2
Konfidenzintervall	0,95	Grenzwert t-Verteilung
Anzahl	4	5
Standardabweichung	1,892	1,319
	1,590	5,834
Beurteilung	Serien entstammen nicht der gleichen Grundgesamtheit	

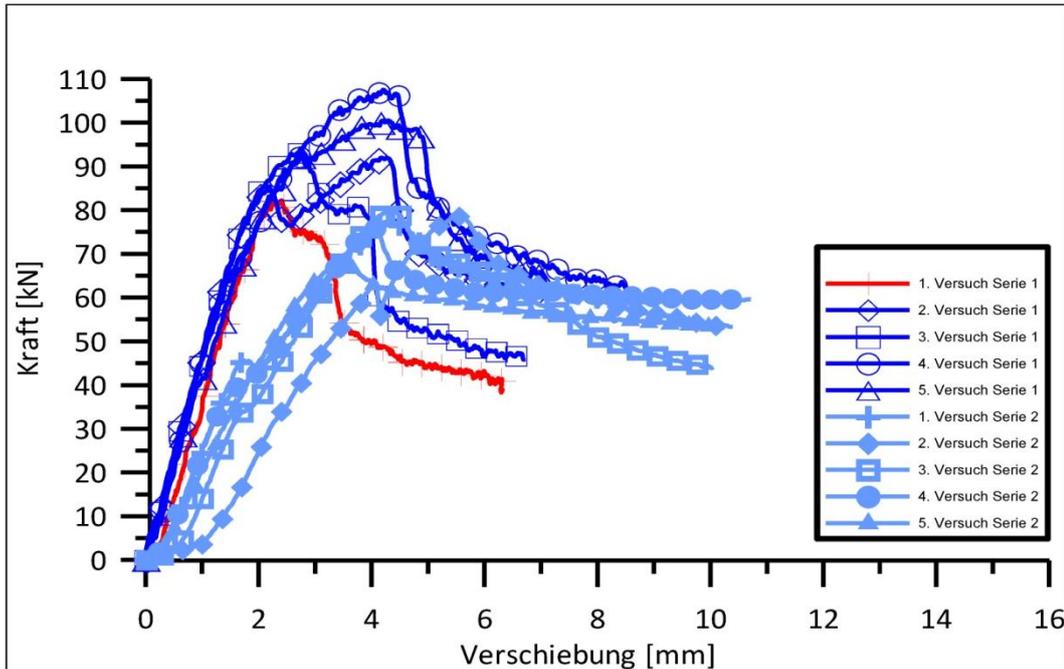


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I - Typ "B" - halbe Reinigung

Versuch Nr.	1+2	Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 24.09.2008 B: 11.10.2008	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	1/2 Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	82,20	2,4	1,1	22,71	ungünstig (Luftabschluss)
2	92,67	4,3	1,0	25,61	
3	94,23	2,7	1,0	26,04	
4	107,66	4,2	1,2	29,75	
5	100,73	4,2	1,2	27,83	
6	77,95	4,3	1,4	21,54	
7	78,88	5,6	2,7	21,80	
8	80,42	4,3	2,1	22,22	
9	76,00	4,1	1,5	21,00	
10	68,26	3,4	1,5	18,86	
11					
12					

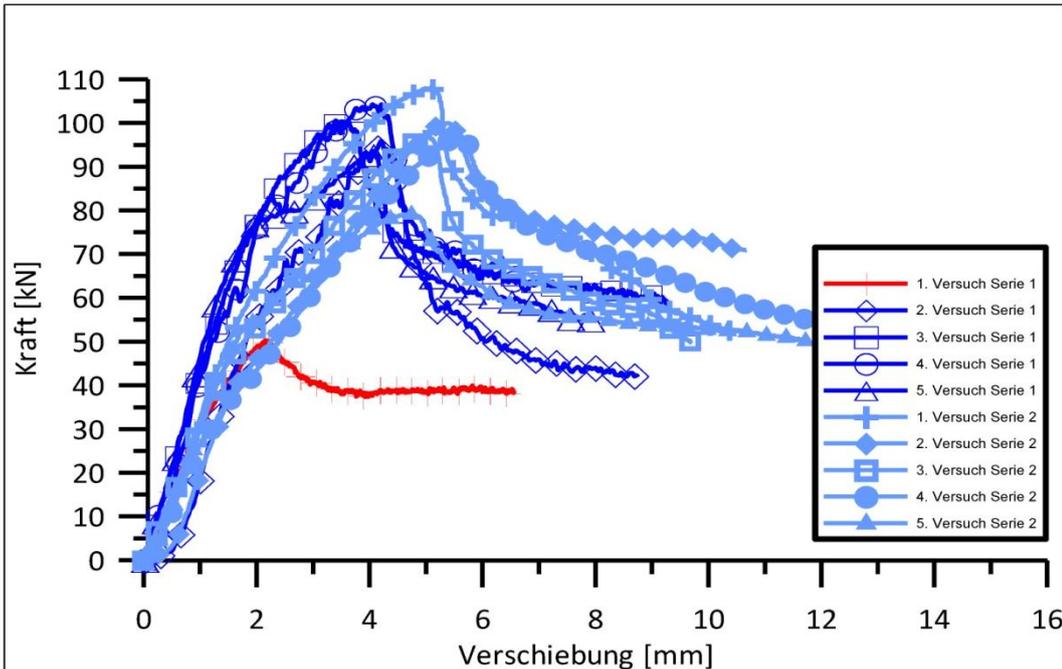


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM II - Typ "B" - halbe Reinigung

Versuch Nr.	1+2	Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 24.09.2008 B: 11.10.2008	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	1/2 Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	82,20	2,4	1,1	22,71	ungünstig (Lufteinschluss)
2	93,43	4,0	1,0	25,81	
3	96,25	4,2	1,8	26,60	
4	100,92	3,5	1,2	27,89	
5	106,11	4,2	1,3	29,32	
6	108,20	5,0	1,6	29,90	
7	99,98	5,0	2,2	27,63	
8	96,89	5,0	1,7	26,77	
9	97,18	5,6	2,3	26,85	
10	79,24	4,7	1,3	21,89	
11					
12					

Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfort	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM I	Blatt	1/2
Prüferantwortlicher	T.Guggenberger	Probekörper	Cube 150	Bohrgerät	Bohrer
Prüfer	T.Guggenberger	Prüfkörper [cm]	190x190x30		Bohrer
Prüfmaschine	IKI-02 ZZUG	Prüfkörper-Nr.	233-08 CIA		Schneiddurchmesser d _{cut} [mm]
Auszugeschw.	0,05 mm/s	Herstelldatum	16.07.2008		Bohrrichtung
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen		Bohrlochrreinigung
Randabstand	> 144 mm	B_w			>3x Bürsten
Versuchsbezeichnung	DA-Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton				
Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9				
Versuch Nr.	1	Prüfdatum	13.10.2008		>3x Druckluft 6 bar

Versuch Nr.	Allgemein		Bohren und Setzen				Versagensursache				Auswertung				Bemerkungen	
	Bohrung confinement	Verankerungstiefe [mm]	Bohrhöhe [mm]	Zeitpunkt des Setzens	Zeitpunkt der Durchführung 13.10.2008	Durchführzeit [h:min]	Aushärtezeit [h:min]	Bruch Interface Mörtel-Gewindestange	Bruch Interface Mörtel-Beton	Betonbruch	Bruchkörper Kegel (D,d,s) [cm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]	Weg bei F _{u,m} /2 [mm]		Betonfestigkeit am Prüftag [MPa]
1	18,40	96	110,0	-	-	>2d	-	X	X	X	72,15	3,80	1,09	19,94	22,88	
2	18,40	96	110,0	-	-	>2d	-	X	X	X	82,79	4,90	1,23	22,88	23,05	
3	18,40	96	110,0	-	-	>2d	-	X	X	X	83,43	4,99	1,11	23,05	23,12	
4	18,40	96	110,0	-	-	>2d	-	X	X	X	83,66	4,70	1,22	23,12	22,46	
5	18,40	96	110,0	-	-	>2d	-	X	X	X	81,29	5,09	1,42	22,46		
6																
7																
8																
9																
10																

Mittelwert	F _{u,m} [kN]:	80,66	Höchstlast	S _{rum/z} [mm]:	1,21
Standardabweichung	s [kN]:	4,85		s [mm]:	0,13
Variationskoeffizient	v [%]:	6,01		v [%]:	10,81
Beurteilung					

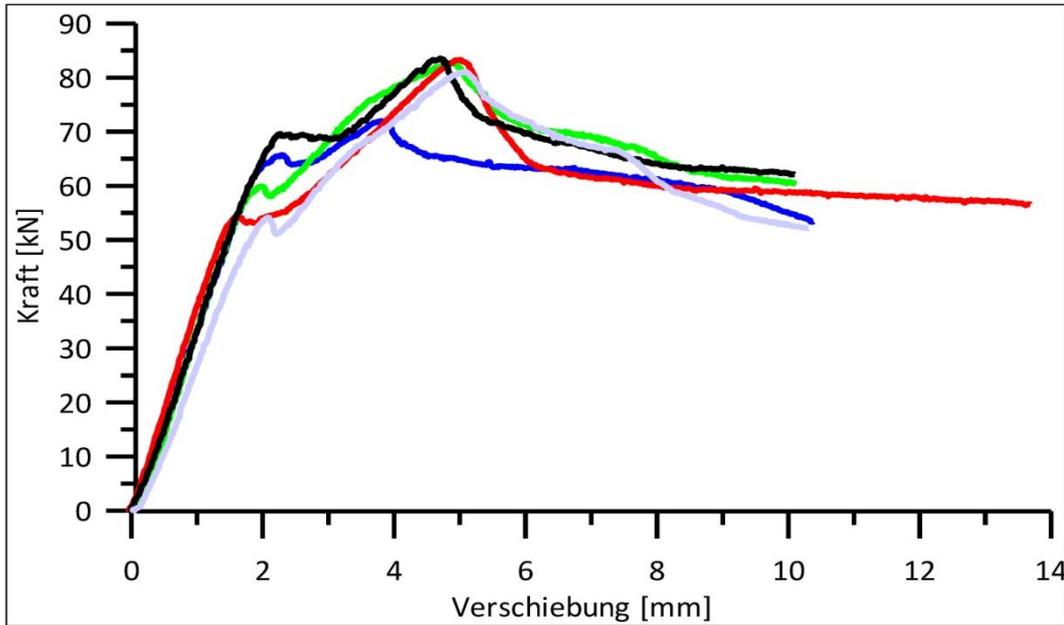


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I - Typ "B" - optimale Reinigung

Versuch Nr.	1	Dübel	"Typ B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	13.10.2008	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	> Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	72,15	3,8	1,1	19,94	
2	82,79	4,9	1,2	22,88	
3	83,43	5,0	1,1	23,05	
4	83,66	4,7	1,2	23,12	
5	81,29	5,1	1,4	22,46	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					



Department für Bautechnik + Naturverfahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfort	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM I
Prüferantwortlicher	T.Guggenberger	Probekörper	Cube 150
Prüfer	T.Guggenberger	Prüfkörper [cm]	190x190x30
Prüfmaschine	IKI-02 ZZUG	Prüfkörper-Nr.	233-08 CZA
Auszugeschw.	0,05 mm/s	Herstelldatum	15.07.2008
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen
Randabstand	> 144 mm	B _w	
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9		
Versuch Nr.	1	Prüfdatum	13.10.2008

CEM II - Typ "B" - optimale Reinigung	Blatt	1/2
C2 B SR	Bohrgerät	Bohrer
	Schneiddurchmesser d_{cut} [mm]	SDS 14
	Bohrrichtung	senkrecht
	Bohrlochreinigung	> Herstellerangaben
		>3x Druckluft 6 bar
		>3x Bürsten
		>3x Druckluft 6 bar

Versuch Nr.	Allgemein		Bohren und Setzen				Versagensursache				Auswertung				Bemerkungen	
	Bohrung confinement [m]	Verankerungstiefe [m]	Bohrhochtiefe [m]	Zeitpunkt des Setzens	Zeitpunkt der Durchführung 13.10.2008	Durchführungszeit [h:m:in]	Aushärtezeit [h:m:in]	Bruch Interface Mörtel-Gewindestange	Bruch Interface Mörtel-Beton	Betonbruch	Bruchkörper Kegel (D,d,s) [cm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]	Weg bei F _{u,m} /2 [mm]		Betonfestigkeit am Prüftag [MPa]
1	18,40	96	110,0	-	-	-	>2d	X	X		89,19	5,62	1,57	24,64	24,64	
2	18,40	96	110,0	-	-	-	>2d	X	X		91,98	5,26	2,07	25,42	25,42	
3	18,40	96	110,0	-	-	-	>2d	X	X		101,54	6,02	2,55	28,06	28,06	
4	18,40	96	110,0	-	-	-	>2d	X	X		87,56	5,09	2,33	24,19	24,19	ungültiger Versuch - Klebefehler
5	18,40	96	110,0	-	-	-	>2d	X	X		94,88	6,11	2,38	26,22	26,22	
6																
7																
8																
9																
10																

Mittelwert	F_{u,m} [kN]:	94,40	Verschiebung	S_{10m/2} [mm]:	2,18
Standardabweichung	s [kN]:	5,30	s [mm]:	0,38	
Variationskoeffizient	v [%]:	5,61	v [%]:	17,55	
Beurteilung					

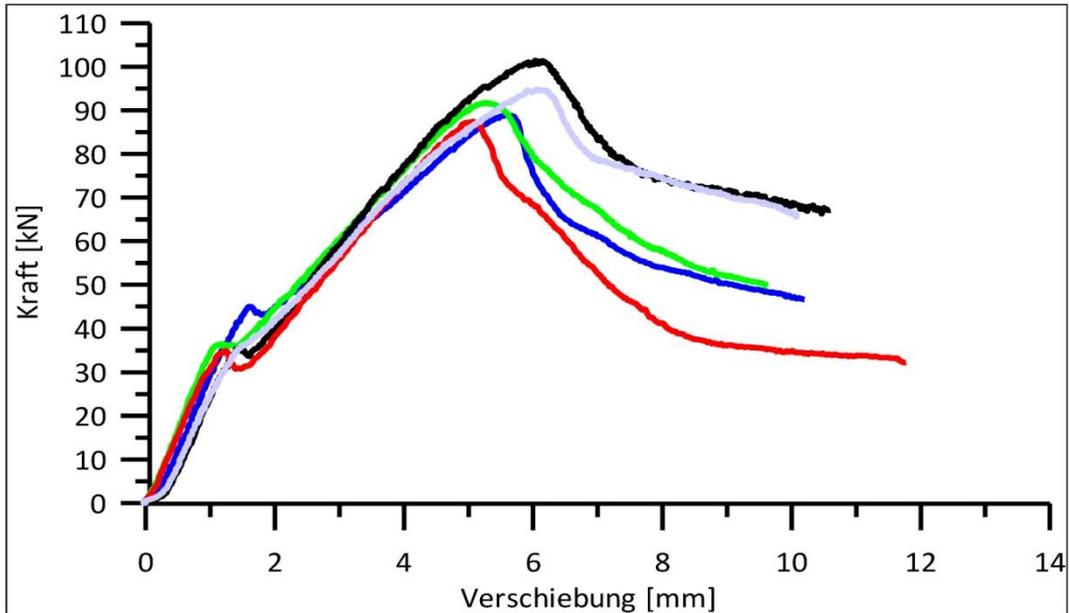
t-Test der Serien zueinander	1. Serie	2. Serie
Seiten		
Konfidenzintervall		
Anzahl		
Standardabweichung		
Beurteilung		



A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM II - Typ "B" - optimale Reinigung

Versuch Nr.	1	Dübel	Typ "B" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	13.10.2008	Prüfverantwortlicher	T.Guggenberger
$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	> Herstellerangaben
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	89,19	5,6	1,6	24,64	
2	91,98	5,3	2,1	25,42	
3	101,54	6,0	2,6	28,06	
4	87,56	5,1	2,3	24,19	ungültiger Versuch - Klebefehler
5	94,88	6,1	2,4	26,22	
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					

Department für Bautechnik + Naturgefahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

Prüfart	IKI-Prüfhalbe, Wien	Beton	C20/25 CEM I	Blatt	1/2
Prüferantwortlicher	T. Guggenberger	Probekörper	Cube 150	Bohrgerät	
Prüfer	T. Guggenberger	Probekörper [cm]	150x150x30	Bohrer	SDS 14
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Probekörper-Nr.	233-08 C1	Schneiddurchmesser d _{cut} [mm]	-
Auszugsgeschw.	0,08 mm/s	Herstelldatum	16.07.2008	Bohrrichtung	senkrecht
Abstützweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen	Bohrlochräumung	keine Reinigung
Randabstand	> 144 mm	β_w			1x saugen schwächste Stufe
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton				
Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9				
Versuch Nr.	1+2+3	Prüfdatum	A: 04.09. B: 08.09. C: 11.09.2008		

Versuch Nr.	Allgemein			Auswertung					Bemerkungen
	Bohrung confinement	Verankerungstiefe [mm]	Bohrlochtiefe [mm]	Bruchlast F _u [kN]	Weg bei F _u [mm]	Weg bei F _{u,m} /2 [mm]	Betonfestigkeit am Prüftag [MPa]	Verbundspannung [N/mm ²]	
1	18,4	96	110,0	46,37	1,64	0,66	12,81	12,81	
2	18,4	96	110,0	44,26	1,60	0,69	12,23	12,23	F _{u,m} = 47,16 kN v = 9,2 %
3	18,4	96	110,0	42,48	1,48	0,71	11,74	11,74	
4	18,4	96	110,0	49,15	2,13	0,75	13,58	13,58	
5	18,4	96	110,0	53,56	1,84	0,76	14,80	14,80	
6	18,4	96	110,0	42,71	1,22	0,49	11,80	11,80	Serien passen statistisch zusammen
7	18,4	96	110,0	62,30	1,66	0,83	17,21	17,21	
8	18,4	96	110,0	55,91	1,92	0,69	15,45	15,45	F _{u,m} = 52,81 kN v = 14,57 %
9	18,4	96	110,0	47,58	1,80	0,65	13,15	13,15	
10	18,4	96	110,0	55,57	2,07	0,89	15,35	15,35	
11	18,4	96	110,0	19,18	1,02	0,54	5,30	5,30	
12	18,4	96	110,0	19,29	0,71	0,29	5,33	5,33	
13	18,4	96	110,0	29,08	5,37	0,46	8,03	8,03	F _{u,m} = 23,06 kN v = 22,7 %
14	18,4	96	110,0	28,48	2,37	0,70	7,87	7,87	
15	18,40	96	110,0	19,28	0,86	0,41	5,33	5,33	

Mittelwert	F _{u,m} [kN]:	41,01	S _{Fu,m/2} [mm]:	0,64
Standardabweichung	s [kN]:	14,44	s [mm]:	0,16
Variationskoeffizient	v [%]:	35,21	v [%]:	25,90

t-Test der Serien zueinander	1. Serie	2. Serie
Seiten	2	2
Konfidenzintervall	0,9	0,9
Anzahl	10	5
Standardabweichung	1,825	1,444
	1,716	1,711

Beurteilung	Serie 3 entstammt nicht der gleichen Grundgesamtheit	
--------------------	--	--

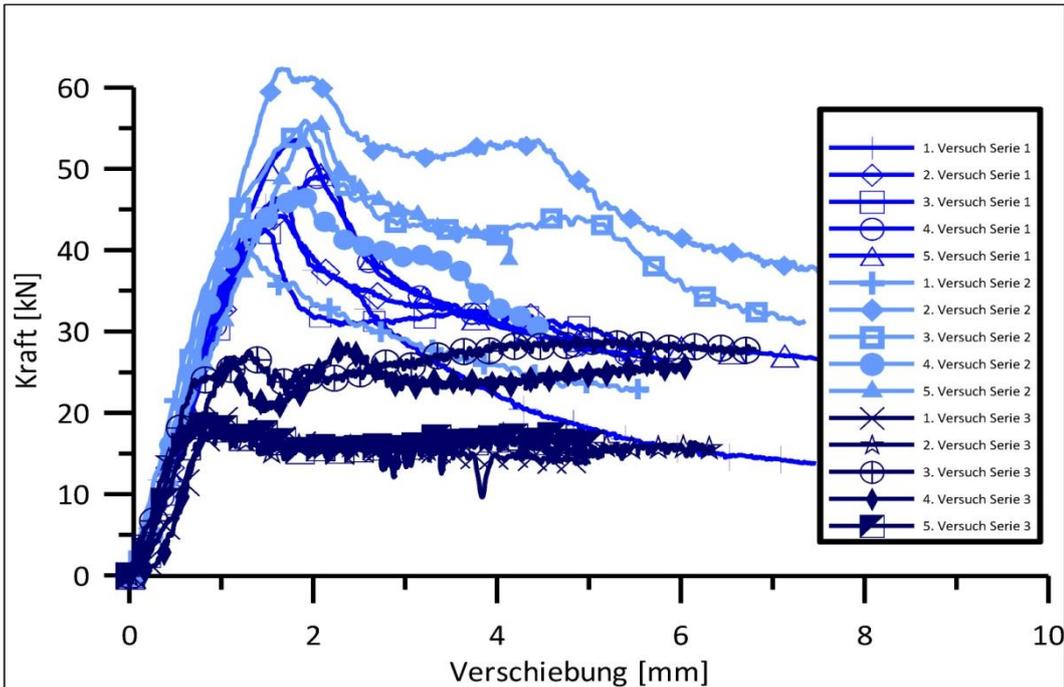


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM I - Typ "A" - keine Reinigung

Versuch Nr.	1+2+3	Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM I Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 04.09. B: 05.09. C: 11.09.2008	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	keine Reinigung
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	46,37	1,6	0,7	12,81	
2	44,26	1,6	0,7	12,23	
3	42,48	1,5	0,7	11,74	
4	49,15	2,1	0,8	13,58	
5	53,56	1,8	0,8	14,80	
6	42,71	1,2	0,5	11,80	
7	62,30	1,7	0,8	17,21	
8	55,91	1,9	0,7	15,45	
9	47,58	1,8	0,6	13,15	
10	55,57	2,1	0,9	15,35	
11	19,18	1,0	0,5	5,30	
12	19,29	0,7	0,3	5,33	
13	29,08	5,4	0,5	8,03	
14	28,48	2,4	0,7	7,87	
15	19,28	0,9	0,4	5,33	

Department für Bautechnik + Naturgefahren

A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.zuggerberger@boku.ac.at

Prüfart	IKI-Prüfhalle, Wien	Beton	C20/25 CEM II	Blatt	1/2
Prüfverantwortlicher	T. Guggenberger	Probekörper	Cube 150	Bohrgerät	
Prüfer	T. Guggenberger	Probekörper [cm]	190x190x30	Bohrer	SDS 14
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG	Probekörper-Nr.	233-08 C2	Schneidendurchmesser d_{cut} [mm]	-
Auszugeschw.	0,08 mm/s	Herstelldatum	15.07.2008	Bohrrichtung	senkrecht
Absatzweite	> 192 mm	Zustand	ungerissen	Bohrlochräumung	keine Reinigung
Randabstand	> 144 mm	β_w			1x saugen schwächste Stufe
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton				
Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9				
Versuch Nr.	1+2+3	Prüfdatum	A: 04.09; B: 08.09; C: 11.09.2008		

Versuch Nr.	Allgemein			Auswertung				Bemerkungen	
	Bohrung confinement	Verankerungstiefe [mm]	Bohrlochtiefe [mm]	Bruchlast F_u [kN]	Weg bei F_u [mm]	Weg bei $F_{u,2}$ [mm]	Betonfestigkeit am Prüflag [MPa]		Verbundspannung [N/mm ²]
1	18,4	96	110,0	33,36	1,28	0,57	9,22	9,22	
2	18,4	96	110,0	35,12	1,57	0,86	9,70	9,70	$F_{u,m} = 39,73$ kN $v = 16,9$ %
3	18,4	96	110,0	38,32	1,50	0,78	10,59	10,59	
4	18,4	96	110,0	41,54	1,84	0,54	11,48	11,48	
5	18,4	96	110,0	50,32	1,86	0,74	13,90	13,90	serien passen statistisch zusammen
6	18,4	96	110,0	30,83	1,53	0,35	8,52	8,52	$F_{u,m} = 38,43$ kN $v = 24,4$ %
7	18,4	96	110,0	42,03	1,64	0,53	11,61	11,61	
8	18,4	96	110,0	48,88	2,58	0,62	13,51	13,51	
9	18,4	96	110,0	43,89	2,67	0,67	12,13	12,13	
10	18,4	96	110,0	26,53	0,92	0,50	7,33	7,33	
11	18,4	96	110,0	23,35	1,18	0,90	6,45	6,45	
12	18,4	96	110,0	14,89	0,61	0,29	4,11	4,11	
13	18,4	96	110,0	25,18	0,66	0,49	6,96	6,96	$F_{u,m} = 21,29$ $v = 18,4$ %
14	18,4	96	110,0	20,74	1,16	0,32	5,73	5,73	
15	18,40	96	110,0	22,30	1,13	0,68	6,16	6,16	

Mittelwert	$F_{u,m}$ [kN]:	33,15	Verschiebung	$S_{F_{u,m}/2}$ [mm]:	0,59
Standardabweichung	s [kN]:	10,86		s [mm]:	0,19
Variationskoeffizient	v [%]:	32,77		v [%]:	31,55
Filename: Protokoll C2-H					

t-Test der Serien zueinander	1. Serie	2. Serie
Seiten	2	2
Konfidenzintervall	0,9	0,9
Anzahl	10	5
Standardabweichung	2,130	1,085
Beurteilung	1,872	4,795
	Serie 3 entstammt nicht der gleichen Grundgesamtheit	

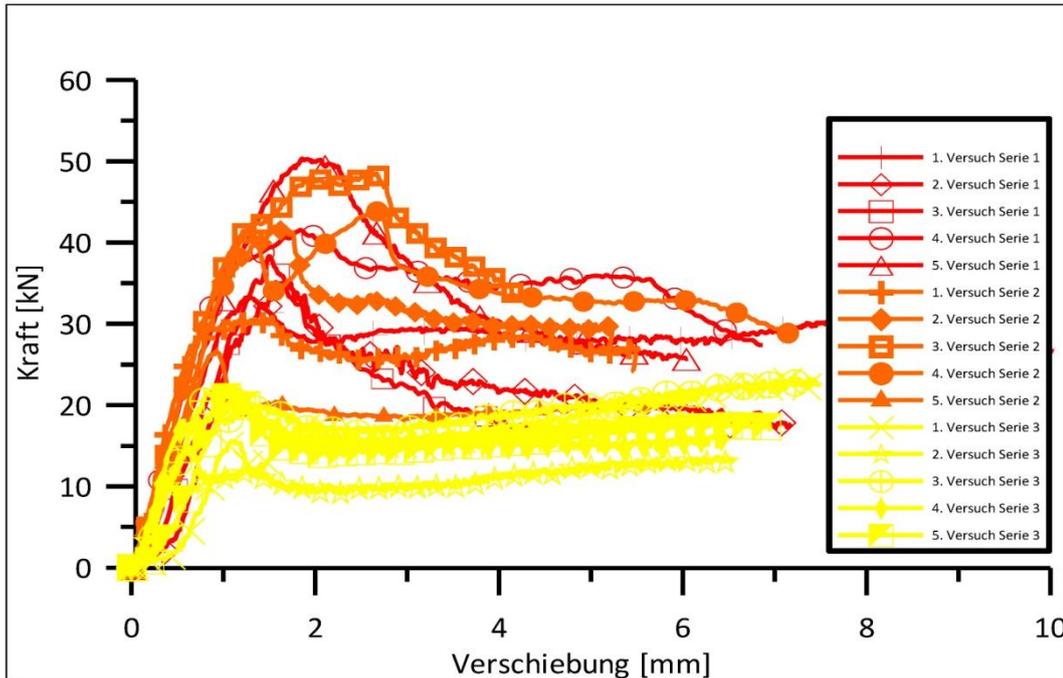


A-1190 Wien, Peter-Jordan-Str. 82, Österreich
 Tel: +43/1/47654-5283 Fax: +43/1/47654-5292
 email: theodor.guggenberger@boku.ac.at

CEM II - Typ "A" - keine Reinigung

Versuch Nr.	1+2+3	Dübel	Typ "A" mit Gewindestangen 12.9
Versuchsbezeichnung	DA Zement CEM II Einfluss der Zementart auf die Tragfähigkeit von Befestigungsmitteln in Beton		
Prüfdatum	A: 04.09. B: 08.09. C: 11.09.2008	Prüferverantwortlicher	T.Guggenberger

$f_{c, test}$ [N/mm ²]	-	Bohrlochreinigung	keine Reinigung
Prüfmaschine	IKI-02-ZZUG		



Versuch Nr.	Bruchlast F_b [kN]	Weg bei F_b [mm]	s bei $F_{b,m}/2$ [mm]	Verbundspannung [N/mm ²]	Bemerkungen
1	33,36	1,3	0,6	9,22	
2	35,12	1,6	0,9	9,70	
3	38,32	1,5	0,8	10,59	
4	41,54	1,8	0,5	11,48	
5	50,32	1,9	0,7	13,90	
6	30,83	1,5	0,3	8,52	
7	42,03	1,6	0,5	11,61	
8	48,88	2,6	0,6	13,51	
9	43,89	2,7	0,7	12,13	
10	26,53	0,9	0,5	7,33	
11	23,35	7,2	0,9	6,45	
12	14,89	0,6	0,3	4,11	
13	25,18	9,7	0,5	6,96	
14	20,74	1,2	0,3	5,73	
15	22,30	1,1	0,7	6,16	