

Karbonatisierungswiderstand von Öko-Beton für Fertigteile



D-6-135/2017

Patrick Hermann

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung
Technische Universität Graz

Graz, im Juni 2017

Betreuer der Diplomarbeit:
Dipl.-Ing. Dr.techn. Joachim Juhart

Mitbetreuender Assistent:
Dipl.-Ing. Dr.mont. Elke Krschey

Mitbetreuender Assistent:
Dipl.-Ing. Ing. Gheorghe Alexandru David

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Diplomarbeit identisch.

.....
Datum

.....
Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich im Laufe des Studiums begleitet und unterstützt haben. Besonderer Danke gilt denen, die mich im Laufe dieser Master-Arbeit in aller Hinsicht unterstützt und betreut haben. Speziell möchte ich mich bei Joachim Juhart, Alexandru David und Elke Krischey bedanken. Ein weiterer Großer Dank gilt dem Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie die es mir ermöglicht haben, als studentischer Projektmitarbeiter an dem Projekt Öko² mitzuwirken und im Rahmen dieses Projektes diese Master-Arbeit schreiben zu können.

Des Weiteren möchte ich mich bei den Vertretern der Quellen bzw. Literatur bedanken, dass sie mir den Zugriff zu ihren Arbeiten ermöglicht haben.

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wird ein Teilgebiet der Dauerhaftigkeit von klinkerreduzierten, Zusatzstoff optimierten Beton, auch Ökobeton genannt, untersucht. Speziell wird auf den Karbonatisierungswiderstand bei Prüfung unter beschleunigten Karbonatisierungs-Bedingungen eingegangen. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Auswirkungen der Reduktion von Klinker sowie der Optimierung der Packungsdichte durch geeignete sehr feine Mikro-Füller (mittlerer Durchmesser $d_{50} < 3 \mu\text{m}$) und weitere inerte und hydraulisch aktive Zusatzstoffe (AHWZ) in Zementfeinheit ($d_{50} \approx 5\text{-}15 \mu\text{m}$) auf den Karbonatisierungswiderstand zu erfassen. Die aktuelle Normung schreibt einen Mindestgehalt an Bindemittel und einen maximalen W/B-Wert (Wasser/Bindemittel) vor, um einer bestimmten Expositions-kategorie zu genügen. Durch die ökologische Optimierung bzw. Klinkerreduktion können solche Ökobeton diese vorgeschriebenen Grenzen zum Teil nicht einhalten. So müssen sie nach dem „equivalent concrete performance concept“ (ECPC) entsprechend ihrer funktionellen Leistungsfähigkeit im Vergleich zu einem typischen Referenzbeton nach Norm bewertet werden.

Es wurden Referenz- und Ökobeton bei gezielter Variation und Zusammensetzung der Rezepturparameter (W/B-Werte: 0,53, 0,56 & 0,59) und konstantem Leimvolumen mit gleicher Verarbeitbarkeit sowie Festigkeit hergestellt. Diese Betonrezepturen eignen sich für Betonfertigteile, da eine hohe Frühfestigkeit erreicht werden kann. Zusätzlich wurde der Einfluss von dem Zusatzstoff Hütensand als AHWZ gegenüber Klinker systematisch untersucht. Durch die Parametervariation war es nun möglich den Einfluss der Rezepturparameter auf den Karbonatisierungswiderstand zu erkennen.

Die Ergebnisse zeigen einen starken Einfluss des Wasser/Calciumoxid-Wertes (W/CaO-Wert). Zusätzlich sorgt ein im Vergleich zum Referenzbeton reduzierter Wasser/Pulver-Wert (W/P_v-Wert), aufgrund der optimierten Packungsdichte, für eine Steigerung des Karbonatisierungswiderstandes. Aufgrund dieser Erkenntnisse kann die Leistungsfähigkeit von Ökobeton in Bezug auf einen Referenzbeton sehr gut abgeschätzt werden.

Abstract

In this thesis the durability of cement-clinker reduced and with mineral additives optimized concrete, so-called "eco-concrete", is explored. In particular, the carbonation resistance under accelerated conditions is pointed out. Objective is to investigate the effect on the carbonation resistance of clinker reduction and packing density optimization with micro-fillers (mean diameter $d_{50} < 3 \mu\text{m}$) and other inert as well as hydraulically active fillers (SCM supplementary cementitious materials) with an equal mean diameter to cement ($d_{50} \approx 5\text{-}15 \mu\text{m}$). The actual Austrian standards regulates the carbonation resistance of concrete by prescribing the maximum water/binder (w/b)-ratio and a minimum amount of binder. Because of the ecological optimization (clinker reduction), some eco-concretes are above the limits regarding their exposition classes. So, the performance has to be evaluated by the „equivalent concrete performance concept“(ECPC).

For the experiments, reference- and eco-concretes with equal workability and strength with systematic variation of mixture parameters (w/b-ratio: 0,53, 0,56 & 0,59 and type of additives) and constant paste volume were produced. These concretes are, because of their high early-age strength, appropriate for precast elements. Additionally, the effect of replacing cement with granulated blast furnace slag as SCM is investigated. Because of the parameter study it was possible to observe some significant effects on the carbonation resistance.

The results of these experiments show the strong influence of the W/CaO-ratio (water/calcium oxide-ratio). In addition, a lower w/pV-ratio (water/powder), based on the packing density optimization, causes an increase of the carbonation resistance. So, these two parameters describe the relationship of mix design parameters and carbonation resistance very well.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	ii
Danksagung	iii
Kurzfassung	iv
Abstract.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	vi
1. Einleitung	8
2. Stand der Technik.....	9
2.1 Ökobeton für Fertigteile	9
2.1.1 Anstoß für Ökobeton	9
2.1.2 Entwicklung von Ökobeton	9
2.1.3 Einsatz von Ökobeton	11
2.1.4 Ökologische Kennwerte	11
2.2 Dauerhaftigkeit von Beton.....	12
2.2.1 Expositionsclassen (Umwelteinwirkungen).....	12
2.3 Karbonatisierung.....	14
2.3.1 Klassifizierung der Expositionsclassen XC	14
2.3.2 Verfahren zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes	15
2.3.3 Bemessungskonzept zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes	15
2.3.4 Widerstand von modifizierten (nicht normiert) Betonen	16
2.3.5 Phasen der Karbonatisierung	17
2.3.6 Einflussfaktoren der Karbonatisierung	19
2.3.7 Einfluss von Füllern	23
2.3.8 Folgen der Karbonatisierung	24
2.3.9 Prüfen der Karbonatisierung.....	26
2.4 Idealisiertes Verhalten der Karbonatisierung.....	28
3. Versuchsprogramm.....	30
3.1.1 Vorlagerung	30
3.1.2 Versuchslagerung	30

3.1.3	Versuchsdurchführung	31
3.2	Geprüfte Betone	33
3.2.1	Betonzusammensetzung	33
3.2.2	Betoneigenschaften	37
4.	Ergebnisse und Diskussion	42
4.1	Berechnung des Karbonatisierungswiderstandes	42
4.1.1	Karbonatisierungstiefe.....	42
4.1.1	Karbonatisierungsrate	46
4.1.2	Vereinfachtes Nachweisverfahren gegen Karbonatisierung.....	51
4.2	Korrelation mit den Rezepturkennwerten	55
4.3	Multiple Korrelation	61
4.4	Korrelation mit den Festbetonprüfungen	62
4.4.1	Korrelation mit der Betondruckfestigkeit	62
4.4.2	Korrelation mit Dauerhaftigkeitsprüfungen.....	63
4.5	Zusammenfassende Diskussion	64
5.	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	68
	Literaturverzeichnis	70
	Abbildungsverzeichnis	73
	Tabellenverzeichnis	75
	Abkürzungsverzeichnis	76
	Anhang.....	77

1. Einleitung

Diese Diplomarbeit trägt zum Forschungsprojekt Öko², des Instituts für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung, bei. Das Projekt Öko² betrifft einen Verbund aus diversen Firmen der Betonindustrie, welche sich das Ziel gesetzt haben, Produkte (Fertigteile) aus ökologisch optimierten Betone zu entwickeln und in ihren Produktkatalog aufzunehmen. Die Beteiligung als studentischer Projektmitarbeiter an diesem Projekt erlaubt es mir, an der Entwicklung von modifizierten Betonen und an den Frischbeton- bzw. Festbetonprüfungen mitzuwirken. Hierzu wurden zu dem bereits vorhandenen Betonen (Referenzbeton), ökologische Varianten im Labor an der TU Graz entwickelt. Diese Betone wurden anschließend auf ihrer Performance im Vergleich zum Referenzbeton geprüft und beurteilt. Sobald die wesentlichen Frisch- sowie Festbetoneigenschaften der ökologischen Varianten zumindest gleichwertiges Leistungsvermögen aufgewiesen haben, wurden dies zu den für die Produktion üblichen Bedingungen vor Ort in den verschiedenen Werken hergestellt. Diese Werksbetone wurden nun wieder im Labor auf ihr Leistungsvermögen geprüft.

Mein Aufgabenbereich umfasste neben der Mithilfe an den Betonagen vor allem die Festbetonprüfung der Karbonatisierung. Die Prüfung, Auswertung und beurteilen der Karbonatisierung dieser Betone ist das Hauptthema dieser Arbeit. Ziel ist es das Verhalten der Betone, sowie die Auswirkung von gezielten Rezepturparametern zu Erfassen. Hierzu wurden neben den Werksbetonen im Labor zusätzliche Betone hergestellt, welche eine gezielten Variationen aufweisen. Anhand dieser Betone wird nun eine umfassende Auswertung und Beurteilung des Verhaltens von ökologisch optimierten Betonen hinsichtlich ihres Karbonatisierungswiderstandes erstellt.

2. Stand der Technik

2.1 Ökobeton für Fertigteile

2.1.1 *Anstoß für Ökobeton*

In [1] wird der Grundgedanke zum Entwickeln eines ökologischen Betons sehr gut dargestellt. In diesem Bericht ist von einer jährlich weltweiten CO₂-Emission von 32 Mrd. Tonnen (2009) die Rede. Bei einer jährlichen Produktion von 3,3 Mrd. Tonnen Zement liegt der Anteil der von der Zementindustrie beigesteuerten CO₂-Emissionen laut [1] & [2] bei in etwa 5%. Der wesentliche Grund für diesen großen Anteil ist laut [1] der hohe Energiebedarf beim Brennen des Zementklinkers und der Entsäuerung. Mit der Entsäuerung wird in der Zementherstellung jener Prozess verbunden, bei der sich aus der Kalkstein (CaCO₃) in Calciumoxid (CaO) und Kohlendioxid (CO₂) aufspaltet. Dies beginnt bei ca. 800°C im Rohrdrehofen [3]. Da diese 5% einen sehr erheblichen Anteil darstellen, ist es nur folgerichtig, in diesem Bereich hinsichtlich Ökologie, etwas zu verändern bzw. zu optimieren.

2.1.2 *Entwicklung von Ökobeton*

Die Entwicklung von Ökobeton kann, wie in [1] & [2] erwähnt, nach zwei grundsätzlichen Optimierungsprozessen erfolgen. Im ersten Optimierungsprozess wird die Packungsdichte erhöht. Das Erhöhen der Packungsdichte führt laut [2] zu einer Reduktion des Wasserbedarfs bei gleichbleibender Verarbeitbarkeit des Betongemisches. Die erwähnte Packungsdichte (D) beschreibt das Verhältnis zwischen Feststoffvolumens, bzw. Pulvervolumen (wenn es sich um Stoffe mit einem Korndurchmesser < 125 µm handelt) und Gesamtvolumen, also V_P/V_{Ges} . Um die Packungsdichte erhöhen zu können, muss demnach das Feststoffvolumen erhöht und somit das Hohlraumvolumen V_H verringert werden. Die Packungsdichte kann somit wie folgt beschrieben werden:

$$D = \frac{V_P}{V_{Ges}} = \frac{V_P}{V_H + V_P} = 1 - \frac{V_H}{V_{Ges}}$$

Damit die Packungsdichte eines natürlichen Korn- oder Pulvergemisches möglichst hoch ist, müssen also die Hohlräume mit immer kleineren Partikeln gefüllt werden. Diese kleinen Partikeln, werden Füller als bezeichnet. Diese Füller können nach ihrem mittleren Durchmesser d_{50} , in Gruppen unterteilt werden.

- Eco-Füller besitzen einen mittleren Durchmesser $d_{50} = 3-30 \mu\text{m}$ vergleichbar dem eines Zementkornes, sie sind somit ein direkter ökologischer Ersatz.
- Mikro-Füller haben einen mittleren Durchmesser d_{50} kleiner gleich $3 \mu\text{m}$ sind Zwickelfüller der Eco-Füller bzw. des Zementkorns.
- Alternativ kann eine kontinuierliche Korngrößenverteilung nach einer idealen Verteilung (Nach Fuller oder Dinger-Funke) angesetzt werden [4].

Im zweiten Optimierungsprozess wird der Zementgehalt reduziert. Der entfernte Zement wird durch einen Eco-Füller ersetzt. Diese Eco-Füller können Zusatzstoffe vom Typ I oder Typ II sein. Mikro-Füller sind meist Zusatzstoffe von Typ I.

- Zusatzstoffe von Typ I besitzen keine hydraulischen Eigenschaften und tragen somit nicht an der Erhärtungsreaktion bei. Diese werden auch inerte Stoffe genannt.
- Zusatzstoffe von Typ II sind latent hydraulisch und tragen somit, mit dem Zement zusammen, zur Erhärtungsreaktion bei. Aufgrund dieser Eigenschaft müssen sie laut ÖNORM B 4710-1 [5] anteilmäßig im Bindemittelgehalt berücksichtigt werden.

2.1.3 *Einsatz von Ökobeton*

Die Entwicklung von ökologisch optimierten Beton, also Ökobeton, ist mittlerweile an einem Stadium angelangt, welches es erlaubt, diese schon bald kontinuierlich in der Praxis einzusetzen. Die ersten Anwendungen dieser Ökobetone wird auf den Einsatz von Fertigteilwerken beschränkt sein, da die Dosierungsgenauigkeit und vor allem die Verarbeitungszeit ein sehr kritischer Punkt für die Qualitätssicherung darstellen. Um einen Ökobeton nun in der Praxis verwenden zu können, müssen alle in den Normen regulierten Performance Eigenschaften auf zumindest Gleichwertigkeit nachgewiesen werden. Dieser Nachweis wird in den Normen als Nachweis des gleichwertigen Leistungsvermögens angeführt.

Der Prozess zur Bestimmung der Gleichwertigkeit ist ein umfassender, da sowohl alle Frischbetoneigenschaften wie auch Festbetoneigenschaften nachgewiesen werden müssen. Die Entwicklung und Nachweis eines gleichwertigen Leistungsvermögens ist vor allem im Bereich der Dauerhaftigkeit ein zeitaufwendiger Faktor für die Entwicklung solcher Betone. Somit ist es von wichtiger Bedeutung, schon bei der Entwicklung eines ökologischen Betons die zu erreichende Leistungsfähigkeit bestimmen zu können. Diese Vorbestimmung erfordert jedoch sehr viel Knowhow in der Betonentwicklung und viel Forschungszeit. Ziel dieser Forschung muss sein, alle möglichen Einflussfaktoren in der Rezepturentwicklung und die Auswirkung auf die Performance definieren zu können.

2.1.4 *Ökologische Kennwerte*

Die wichtigsten ökologischen Kennwerte sind das GWP (Global Warming Potential) und das PEI (Primärenergiebedarf). Das GWP-Wert beschreibt das Treibhauspotential als CO₂-Äquivalent in Relation zu Kohlendioxid angegeben [6]. Das PEI beschreibt die Summe der energetischen Ressourcen, die zur Herstellung eines Produktes aufgewendet werden müssen [6].

2.2 Dauerhaftigkeit von Beton

„ Stark und Bernd Wicht [7] erklären die Dauerhaftigkeit von Beton folgend: dass der Beton, die aus Betrieb und Umwelt entstehenden Beanspruchung über die geplante Nutzungsdauer bei ausreichender Wartung und Instandhaltung genügend Beständigkeit aufweist.“

Die einwirkenden Beanspruchungen aus der Umwelt werden im Betonwesen als Expositionsklassen gekennzeichnet. Diese Klassen werden in der ÖNORM B 4710-1 [5], der Art der Beanspruchung entsprechend unterteilt.

2.2.1 Expositionsklassen (Umwelteinwirkungen)

Je nach Art und Stärke der Umwelteinwirkungen auf die Betonoberfläche bzw. der Betonsubstanz, müssen bei der Rezepturentwicklung geforderte Mindestwerte (wie z.B. mindest - Bindemittelgehalt), entsprechend der zu erreichenden Expositionsklassen eingehalten werden. Diese Werte sind für normierte Betone getroffen worden. In [1] & [2] wird gezeigt, dass diese mindest-Rezepturkennwerte für innovative Betone, wie es Ökobetone sind, nicht mehr aussagekräftig sind.

Folgend werden alle Expositionsklassen und ihre Umwelteinwirkungen die in [5] Erwähnung finden aufgezählt und kurz beschrieben

2.2.1.1 X0: Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko

Diese Expositionsklasse stellt keine Anforderung an den Beton. X0 wird bei untergeordneten unbewehrten Bauteilen oder bei trockener Umgebungsfeuchte angewendet.

2.2.1.2 XC: Korrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung und Dichtigkeit des Betongefüges

Diese Expositionsklasse stellt Anforderungen an den bewehrten Beton. Die Umwelteinwirkung entsprechend dieser Klasse sind Luft und Feuchtigkeit und ist die zugehörige Expositionsklasse für die Problematik der Karbonatisierung von Beton.

2.2.1.3 *XD: Korrosion, ausgelöst durch Chloride, ausgenommen Meerwasser*

Diese Expositionsklasse stellt Anforderungen an den bewehrten Beton. Die Umwelteinwirkung entsprechend dieser Klasse sind chloridhaltiges Wasser, einschließlich Tausalz, ausgenommen Meerwasser.

2.2.1.4 *XS: Korrosion, ausgelöst durch Chloride aus Meerwasser*

In Österreich nicht relevant.

2.2.1.5 *XF: Frostangriff mit oder ohne Taumittel*

Diese Expositionsklasse stellt Anforderungen an durchfeuchteten Beton dar. Die Umwelteinwirkung entsprechen dieser Klasse ist Frost-Tau-Wechsel.

2.2.1.6 *XA: Chemischer Angriff*

Diese Expositionsklasse stellt Anforderungen an den Beton dar. Die Umwelteinwirkung entsprechend dieser Klasse sind chemische Angriffe durch natürliche Böden und Grundwasser.

2.2.1.7 *XM: Verschleißbeanspruchung*

Diese Expositionsklasse stellt Anforderungen an den Beton dar. Die Umwelteinwirkung entsprechend dieser Klasse sind erhebliche mechanische Beanspruchungen.

2.3 Karbonatisierung

In [8] wird das Wesen der Karbonatisierung beschrieben, dabei handelt es sich bei dem Vorgang der Karbonatisierung um eine chemische Reaktion der Zementsteinphasen mit dem von außen zugeführten Kohlendioxid (CO_2). Es werden die sogenannten Carbonate und andere chemische Produkte gebildet. Die Bildung dieser Carbonate verändert die Eigenschaften des Betons, jedoch führen diese Änderungen zu keiner Zerstörung des Objektes. Die Problematik der Karbonatisierung wird erst relevant, wenn dem Beton, Stahl bzw. kein rostresistentes Metall hinzugefügt wird, d.h. wenn ein Stahlbetonbauteil hergestellt wird. Bei unbewehrtem Beton, bzw. faserbewehrten Beton kommt es solange keine Stahlfasern vorhanden sind, zu keiner Schädigung des Bauteiles. Das Gegenteil tritt ein, der Vorgang der Karbonatisierung kann zu verbesserten Betoneigenschaften führen, da das Gefüge dichter werden kann.

2.3.1 Klassifizierung der Expositionsklasse XC

In der ÖNORM B 47010-1 [5] werden zum Erreichen einer gewünschte Expositionsklasse empfohlene Grenzwerte für die Zusammensetzung und Eigenschaften vorgegeben. Diese Grenzwerte sollen zu einer ausreichenden Dichtigkeit und Festigkeit führen. Mit diesen Eigenschaften soll nun eine ausreichende Dauerhaftigkeit gewährleistet werden können. In der Tabelle 1 sind die Grenzwerte für die durch Karbonatisierung verursachte Korrosion aufgelistet.

Tabelle 1 festgelegte Grenzwerte für die Expositionsklasse XC laut [9]

	XC1	XC2	XC3	XC4
Maximaler W/B-Wert	0,70	0,65	0,60	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37
Min. anrechenbarer Bindemittelgehalt [kg/m^3]	260	260	280	300

Weiters wird in [9] erwähnt, dass die Einhaltung des W/B(W/Z)-Wertes und des Mindestzementgehaltes gewährleistet werden muss! Die Betondruckfestigkeit jedoch zusätzlich festgelegt werden kann.

Zusätzlich werden im Eurocode 2 [10] die Mindestbetondeckungen der jeweiligen Expositionsklassen vorgeschrieben. Diese Mindestbetonüberdeckungen für die Dauerhaftigkeit werden im Kapitel 4.1.2 in der Tabelle 14 angeführt.

2.3.2 ***Verfahren zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes***

Der Stand der Technik zum Nachweis des Carbonatisierungswiderstandes ist der Nachweis mit einem beschleunigten Karbonatisierungsverfahren [11][12]. Das bedeutet, dass der zu untersuchende Beton nicht den natürlichen Umwelteinwirkungen ausgesetzt, sondern mit einer höheren CO₂ Konzentration belastet wird. Der Grund für das anwenden des beschleunigten Verfahren ist die zeitliche Komponente sowie die Möglichkeit nicht nur beschleunigte, sondern auch konstante Bedingungen erzeugen zu können. Die Lagerung unter natürlichen Bedingungen werden meist nur mehr zu Kontrollzwecken durchgeführt, um eine Relation zu den beschleunigten Konditionen herstellen zu können. Das in dieser Arbeit gewählte Verfahren wird im Kapitel 2.3.9 erläutert.

2.3.3 ***Bemessungskonzept zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes***

Die Dissertation von Greve-Dierfeld [14] [11] [13] befassen sich mit den unterschiedlichen Bemessungskonzepten für das Thema der Karbonatisierung. Die bereits Entwickelten Bemessungskonzepte berücksichtigen die beschleunigte sowie auch die natürliche Karbonatisierung. Mit den dort angeführten Modellen kann die erforderliche Betondeckung, für die aus den Versuchen gewonnenen Kennwerte des Karbonatisierungswiderstandes, errechnet werden. Dieses Modell lässt eine sehr gute Voraussage über einen definierten Zeitraum (Lebensdauer) für einen Bereits geprüften Beton treffen. Die Anwendung vereinfachter Bemessungsmodell, ausgehend von Hunkeler [15], [14] & [16] wird in den nachstehenden Kapiteln durchgeführt, um einen Performancevergleich zur Praxis zu erlangen. Als Nachtrag wird noch erwähnt, dass die zuvor erwähnten Modelle sehr wissenschaftlich aufgebaut sind, in der Praxis vielleicht vereinfachte Modelle zielführender sind.

2.3.4 **Widerstand von modifizierten (nicht normiert) Betonen**

Bei einer Literaturrecherche lassen sich einige wissenschaftliche Berichte finden, die das Thema der Karbonatisierung auf modifizierte Betone anwenden. [1],[2],[17],[18],[19],[20],[21],[22][23]. Jedoch orientieren sich diese Modifikationen, ausgenommen von [1] & [2], nicht an das Konzept des Ökobetons, sondern eher auf andere individuelle Fragestellungen. Diese Modifikationen betreffen verschiedene Anwendungen von Zusatzstoffen sowie Modifikationen im Bereich von Zementvariation. Proske hat das Thema Ökobeton in [1] auch hinsichtlich der Karbonatisierung untersucht. Die Resultate lassen ein gleichwertiges Leistungsvermögen erkennen. Jedoch sind bei deren Untersuchungen keine gezielten Variationen in der Rezeptur geschehen, daher sind diese Ergebnisse zu Kenntnis zu nehmen, jedoch mit Vorsicht zu betrachten. Die Erkenntnis aus diesen wissenschaftlichen Texten sind demnach verschieden und nur teilweise positiv ausgefallen. Insgesamt scheint es so, dass jeder Stoff, jede Variation der Menge eines Stoffes sich bis zu einem gewissen Anteil positiv auswirken kann, jedoch hängt diese Verbesserung wiederum von vielen anderen Faktoren ab. Das Zusammenwirken verschiedener Komponenten sind somit sehr schwer abzuschätzen.

Um einen aussagekräftigen Vergleich, der in der Literatur zu findenden Versuche ziehen zu können, müssten alle Rezepturkennwerte offenliegen. Um die tatsächlichen Unterschiede des Karbonatisierungswiderstandes und ihre Ursprünge erkennen zu können.

2.3.5 *Phasen der Karbonatisierung*

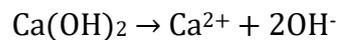
Der Vorgang der Karbonatisierung entsteht aufgrund von mehreren aufeinanderfolgenden chemischen und physikalischen Prozessen [8]. Die negative Folge dieser Prozesse ist die Karbonatisierung, welche ein Angriff auf die Bewehrung zufolge hat. Dieser chemische Angriff wird auch Korrosion genannt. Alle chemischen Vorgänge die bis zum Korrodieren der Bewehrung führen werden nachstehend unterteilt, um einen guten Überblick zu erhalten.

2.3.5.1 Grundvoraussetzung

Bei der Herstellung von Beton wird ein Gemisch aus Zement (Binder), Wasser und Zuschlagstoffen erzeugt. Die Reaktion die das Erhärten des Betons zufolge hat, findet zwischen dem Zement und dem Wasser statt und wird Hydratation genannt. Bei der Hydratation reagieren die vier Hauptklinkerminerale mit dem Anmachwasser und bzw. auch mit einem Sulfatträger. Diese 4 Hauptklinkerminerale sind: Tricalciumsilicat C_3S , Dicalciumsilicat C_2S , Tricalciumaluminat C_3A und Calciumaluminatferrit C_4AF [8].

2.3.5.2 Diffusion von CO_2

Dieser Vorgang beschreibt den Transport von CO_2 in den Poren des Zementsteines. Die Geschwindigkeit des Transportes ist in erste Linie nur von der Oberfläche des Betons und von der Porenstruktur im Zementstein abhängig. Bei diesem Vorgang lösen sich die kristallinen $Ca(OH)_2$ im Feuchtfilm an der Porenwand [8].



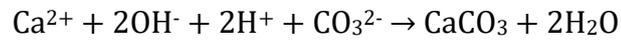
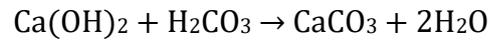
2.3.5.3 Lösen des CO_2

In dieser Phase löst sich das eindiffundierte CO_2 mit dem in den Poren vorhandenen Wasser und reagiert zu einem sehr geringen Teil zu Kohlensäure (H_2CO_3) die in Wasser zu Wasserstoff- und Carbonationen dissoziiert [8].

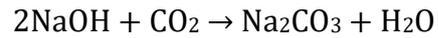


2.3.5.4 Neutralisation von $\text{Ca}(\text{OH})_2$

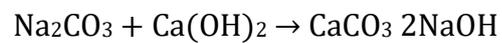
Die Neutralisation der Calciumhydroxide ist nun die eigentliche Karbonatisierungsreaktion [8].



Gleichzeitig carbonatisieren die Alkalihydroxide NaOH und KOH.



Die dabei entstehenden Alkalicarbonate reagieren wiederum sofort mit den gelösten Calciumhydroxiden [8].



2.3.6 Einflussfaktoren der Karbonatisierung

In der nachfolgenden Abbildung 1 ist das angenommene Verhalten von modifizierten Beton gegenüber Karbonatisierung dargestellt. Insbesondere zeigt diese Abbildung die Veränderung des Widerstandes aufgrund der Optimierungsprozesse, welche aus der Entwicklung eines Normalbetons zu einem Ökobeton entstehen.

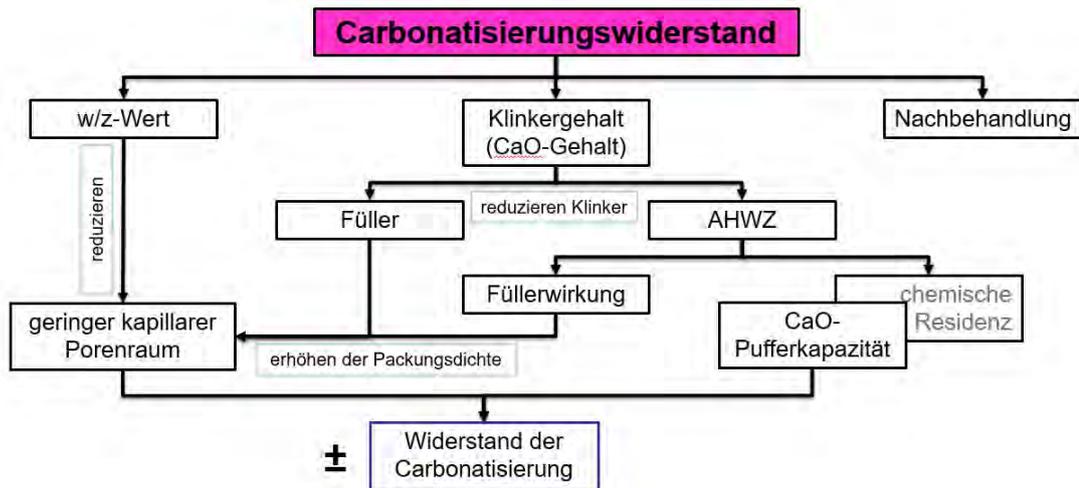


Abbildung 1 Einfluss auf die Karbonatisierung durch betontechnologische Modifikation

Des Weiteren lässt sich aus der Abbildung erkennen, dass die Optimierungen in ökologischer Hinsicht Vor- und Nachteile mit sich bringt. Genau dieses Verhalten bringt die Schwierigkeit mit sich, den Widerstand gegen Karbonatisierung im Vorhinein bestimmen zu können.

Die aus einer eingehender Literaturrecherche erkannten maßgebenden Einflussfaktoren für den Karbonatisierungswiderstand werden nun nachstehend angeführt und beschrieben.

2.3.6.1 W/Z bzw. W/B-Wert

Der W/Z-Wert bzw. der W/B-Wert stellt das Massenverhältnis von Wasser zu Zement (Bindemittel) dar, diese Verhältnis ist für normierte Betone sehr bedeutend, da dieser Wert eine dominante Stellung in der Charakterisierung der Dauerhaftigkeit einnimmt. Der in den W/B-Wert miteingerechnete Anteil von hydraulischen wirksamen Bindemitteln wird mittels einem k-Wert teilweise angerechnet. Im

W/Z-Wert wird in Österreich nur der Zement eingerechnet. In diversen anderen Ländern ist der W/Z-Wert äquivalent zum W/B-Wert in Österreich.

Der W/B-Wert trägt, wie in [7] beschrieben zum Kapillarporenraum und damit auch zur Gasdurchlässigkeit des Zementsteines bei. Je höher der W/B-Wert, desto mehr Überschusswasser ist im Zementstein vorhanden, welches die erwähnten Kapillarräume erzeugt. Des Weiteren steht der W/B-Wert bei Normalbetonen im linearen Zusammenhang mit der Karbonatisierungstiefe. Bei einem W/Z-Wert unter 0,4, gehen die Autoren in [7] davon aus, dass praktisch keine Karbonatisierung stattfindet. Leemann [24] zeigt, dass der W/Z-Wert durch unterschiedlicher Bindemittelzusammensetzung nicht mehr der dominante Faktor ist.

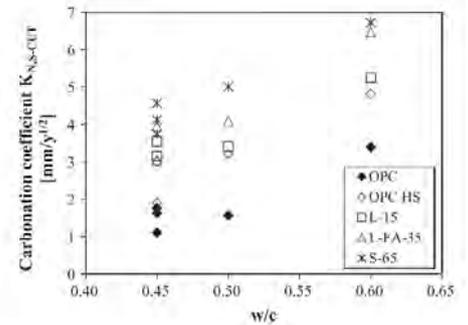


Abbildung 2 Unterschied Karbonatisierung verschiedener Zemente [24]

2.3.6.2 kapillarer Porenraum / Dichtigkeit

Der kapillare Porenraum steht wie im vorhergehenden Punkt bereits erwähnt, im direktem Zusammenhang mit dem W/B-Wert [8] [25]. Ein höherer W/B-Wert hat einen Überschuss an Wasser zufolge, welches für die Hydratation nicht benötigt wird. Dieses überschüssige Wasser ist somit als freies Wasser im Zementstein eingeschlossen, erzeugt Poren und muss anschließend nach außen diffundieren. Jedoch fließt hier auch der Optimierungsprozess, der zu einem Ökobeton führt, mit ein und verändert den Porenraum aufgrund der höheren Packungsdichte. Es kann immer davon ausgegangen werden, dass ein geringerer kapillarer Porenraum mit einer geringeren Karbonatisierung in Korrelation steht.

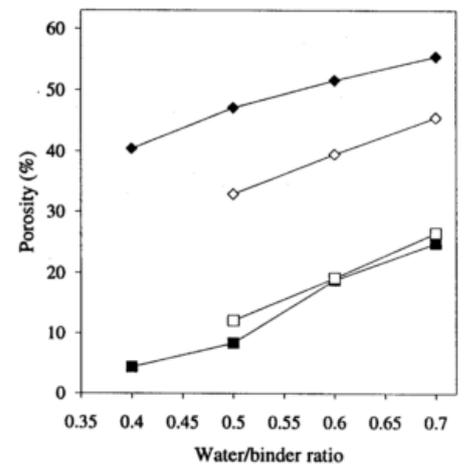


Abbildung 3 Zusammenhang Porosität mit W/B-Wert [25]

2.3.6.3 Festigkeitsklasse

Die Festigkeitsklasse korreliert bei den Normalbetonen ebenfalls sehr stark, neben dem Einfluss der Zementfestigkeit, mit dem W/Z-Wert. Der Grund dafür liegt in der Porosität des Zementsteines. Je weniger Hohlräume, desto weniger Fehlstellen sind vorhanden, welche die Festigkeit beeinflussen. Singh [21] können die Korrelation der Karbonatisierungsrate mit der spezifischen Betondruckfestigkeit, auch unter unterschiedlichen Nachbehandlungsdauern, sehr gut in ihrer Arbeit zeigen.

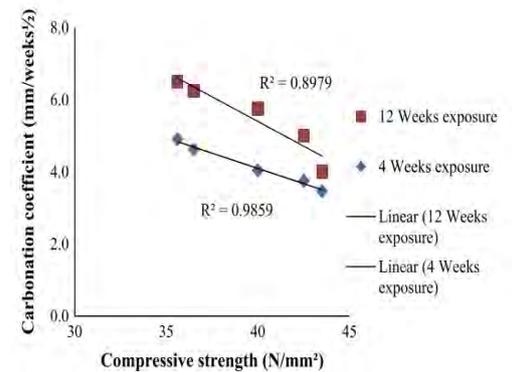


Abbildung 4 Korrelation Karbonatisierungsrate mit Betondruckfestigkeit [21]

2.3.6.4 physikalische Randbedingungen

Die physikalischen Randbedingungen haben einen sehr großen Einfluss. Vor allem die rel.LF (relative Luftfeuchtigkeit) beeinflusst das Wesen der Karbonatisierung sehr. Eine hohe Luftfeuchtigkeit (Annahme: 100%) führt zu einer Sättigung der Kapillarporen und verhindert damit den Transport von CO₂ in den Beton. In [8] wird der geringere Transport dadurch verdeutlicht, dass die Diffusion im Gasraum 10 000-mal schneller voranschreitet als im Wasser. Auch in [27] wird der Einfluss der rel.LF und des Sättigungsgrad auf die Gasdiffusion abgebildet und verdeutlicht. Das andere Extrem (rel.LF 0%) verhindert ebenfalls die Karbonatisierung. Da kein Wasser vorhanden ist, welches das Ca(OH)₂ lösen kann. Somit kann die Neutralisierung des alkalischen Milieus nicht stattfinden. Jacobs [27] beschreibt zusätzlich noch alle anderen physikalischen Randbedingungen die die Luftpermeabilität beeinflussen.

2.3.6.5 Nachbehandlung

Die Nachbehandlung des Betons ist Aufgrund der starken Verbesserung der Betonrandzone sehr wichtig. Je Dichter die Betonoberfläche bzw. Betonrandzone ist, desto kleiner ist die Gaspermeabilität und desto langsamer gelangt das in der Luft vorhandene CO₂ durch die Kapillarporen in den Zementstein. In [27] wird der

Einfluss auf die Gaspermeabilität von verschiedenen Nachbehandlungsdauern dargestellt.

2.3.6.6 Klinkergehalt & W/K-Wert

Der Klinkergehalt bzw. der dazugehörige Wasser/Klinker-Wert beschreibt sowohl die entstehende Dichte des Zementsteins als auch ihre chemische Pufferkapazität. Vor allem das in großen Mengen im Portlandzement enthaltene CaO (60-70%) [7] welches in den Klinkerphasen gebunden wird trägt zur Erhöhung des Karbonatisierungswiderstandes bei.

2.3.6.7 CaO Gehalt & W/CaO

Der CaO-Gehalt ist ein weitergeführter Gedanke des Klinkergehaltes. Insbesondere wird dabei auf die chemische Resistenz des hydratisierten Zementsteines Bezug genommen. Leemann befasst sich in [26],[24] speziell mit dem Thema des CaO-Gehaltes im Zementstein. Er beschreibt, dass das Massenverhältnis von Wasser zu CaO einen wesentlichen Einfluss auf die Karbonatisierung hat. Er unterscheidet zwei Verhältnissen, W/CaO_{reactive} und W/CaO_{reacted} . W/CaO_{reactive} beschreibt das vorhandene CaO im Zement, welches in $CaCO_3$ umgewandelt werden kann. W/CaO_{reacted} beschreibt nun die tatsächlich hydratisierten Anteile der Binder, die somit für die Umwandlung in Carbonate Verfügbar sind. Der Vergleich mit W/CaO_{reacted} hat nun den Vorteil, dass das tatsächliche Anteilige Verhalten von hydraulisch wirksamen Bindemitteln miteinander berechnet werden kann, man benötigt jedoch die Hydratationsgrade des Zementsteins. Der Hydratationsgrad ist das Maß des Reaktionsfortschrittes [7].

Abschließend findet Leemann in beiden Fällen eine sehr gute Korrelation zur Karbonatisierungsrate, bei ausreichend konstanten Versuchsbedingungen. Die Bestimmung dieser Werte kann über eine Röntgendiffraktometrie bzw. Röntgenfluoreszenzanalyse der einzelnen Stoffe sowie des erhärteten Zementsteines.

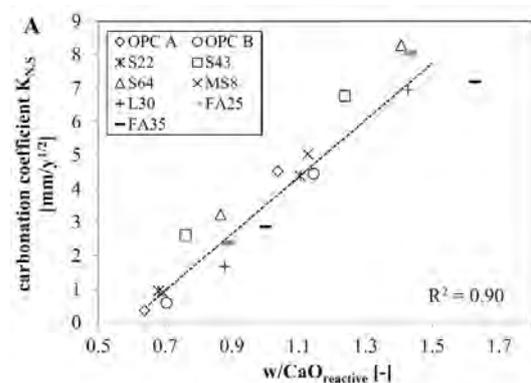


Abbildung 5 Korrelation Karbonatisierungsrate mit W/CaO_{reactive} [24]

2.3.6.8 Alkaligehalt

Ein erhöhter Alkaligehalt hemmt laut [8] den Karbonatisierungsfortschritt. Ein Grund dafür wird mit der schnelleren Anfangshydratation des Betons und somit mit einer höheren Dichte im frühen Stadium genannt.

2.3.7 **Einfluss von Füllern**

Über die Auswirkungen von Füllern wird in der Literatur sehr stark diskutiert. Vor allem scheinen sich die Verfasser von wissenschaftlichen Texten zu diesem Thema nicht einig zu sein, welche Eigenschaften die Verwendung von Füllern positiv beeinflusst werden und welche Eigenschaften negativ beeinflusst werden. Generell gilt, sinkt der Alkaligehalt durch die Klinkerreduktion zu stark, sinkt der Karbonatisierungswiderstand ebenfalls [8].

2.3.7.1 Hydraulisch wirksame Füller

Die Eigenschaften hinsichtlich des Widerstandes gegen Karbonatisierung von hydraulisch wirksamen Füllern hängt sehr stark von der zugesetzten Menge ab. Im Allgemeinen reagieren diese Stoffe langsamer als der Zement und tragen somit erst später zur Festigkeitsentwicklung bei. Latent hydraulische Stoffe wie granuliert Hochfenschlacke sind nach [17] & [18] besser geeignet als puzzolanische Stoffe, jedoch wird in [7] erwähnt, dass ein zu großer Anteil von Hüttensand die Alkalikonzentration zunehmend sinkt und dies negative Einflüsse hat. Allgemein wird erwähnt, dass bei puzzolanischen Stoffen wie Flugasche und gebranntem Ton vor allem der Alkaligehalt eine große Rolle hinsichtlich des Karbonatisierungswiderstandes spielt. Silicastaub wird in [19] & [20] als besserer Klinkerersatz als Flugasche und andere puzzolanische Stoffe erwähnt. Das liegt unter anderem an der frühen Reaktionsbeteiligung und der dadurch folgenden sehr frühen sehr hohen Festigkeit. Die langsamere Reaktionsgeschwindigkeit der Flugaschen wird in [21] ebenfalls als Grund für eine geringere Resistenz gegenüber Karbonatisierung angegeben, jedoch wird auch erwähnt, dass Flugaschen mit einem höheren CaO-Anteil für eine geringere Reduzierung des Alkaligehalts sorgt und somit besser geeignet sind. Die Verwendung von Metakaolin zeigt in [22] einen durchaus positiven Effekt. Vor allem die Porenstruktur wird laut den Forschungen positiv

beeinflusst. Die geringeren Porendurchmesser sorgen somit nicht für eine Steigerung der chemischen Resistenz, beeinträchtigen den Widerstand der physikalischen Eigenschaften jedoch sehr positiv.

2.3.7.2 Inerte Füller

Grundsätzlich tragen die inerten Stoffe nicht oder nur zu einem sehr geringen Anteil an der Hydratation bei. Da sie nicht hydraulisch wirksam sind können sie die chemische Resistenz nicht steigern. Das Ersetzen von Zement durch inerte Stoffe führt somit automatisch zu einem geringeren chemischen Widerstand. Jedoch kann durch die Erhöhung der Packungsdichte, eine Verbesserung der physikalischen Eigenschaften erzielt werden. Zu den inerten Stoffen zählen z.B Kalksteinmehle und Quarzmehle. Laut [17] hat das Ersetzen von Zement durch Kalksteinmehl genau den vorhin erwähnten negativen Einfluss auf die Karbonatisierung. Zusätzlich wird in [23] beschrieben, dass das Vorhandensein von Kalksteinmehlen bzw. kalkhaltigen Zusatzstoffen einen höheren CO₂ Eintrag zufolge hat, und auch die Bildung von anderen Carbonaten zufolge haben kann.

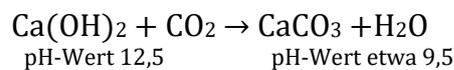
2.3.8 **Folgen der Karbonatisierung**

Wie bereits erwähnt ist die Problematik der Karbonatisierung nur eine der Expositionen, jedoch hat sich herausgestellt, dass diese Expositionsklasse besonders bei der Entwicklung von innovativen Betonen ein Problem darstellen kann. Der Vorgang der Karbonatisierung ist ein komplexer chemischer Prozess der den pH-Wert des Zementsteines verändert. Das Problem dabei ist, dass nicht der Beton bei niedrigerem pH-Wert, sondern die im Beton vorhandene Bewehrung geschädigt werden kann, falls die Randbedingungen für den Vorgang Korrosion vorhanden sind [8].

Aus diesem Grunde ist es von großer Bedeutung, schon bei der Entwicklung von Ökobetonen zu wissen, welche Parameter einer Rezeptur für eine Expositionsklasse XC von Vorteil ist und welche Stellschrauben bei einer anfälligen Rezeptur für eine höhere Resistenz gegen Karbonatisierung zur Verfügung stehen.

2.3.8.1 pH-Wert

Der pH-Wert (**p**otentia **H**ydrogenii = Wirksamkeit der Wasserstoffionen) ist ein Indikator, welcher angibt, ob die vorhandene Stoffmenge basisch oder sauer ist. Dieser Indikator geht von 0 bis 14, wobei 0 für sauer und 14 für basisch steht. Ein Wert von 7 ist neutral also weder basisch noch sauer (reines Wasser) [8]. Ein junger Beton besitzt einen pH-Wert von in etwa 12,6. Der Vorgang der Karbonatisierung senkt diesen anschließend unter einen Wert von 11, die Unterschreitung dieser Grenze ist gleichbedeutend mit dem Verlust der Passivierung der Bewehrung.



2.3.8.2 Korrosion

Der Vorgang der Korrosion ist ein elektrochemischer Prozess. Unter den oben genannten Bedingungen (Verlust der passivierenden Deckschicht), Vorhandensein eines Elektrolyts (feuchter Beton), und dem Vorhandensein von Sauerstoff kann es nun zu einer elektrochemischen Korrosion kommen. Die Korrosionsprodukte weisen ein größeres Volumen als der nicht geschädigte Stahl auf. Somit übt diese Volumenzunahme einen Druck auf die Betonüberdeckung aus. Aufgrund dessen kann es nur zum Abplatzen des Betons kommen. Außerdem wird die Tragfähigkeit eines Betonbauteils durch die Verringerung der Stahlfläche abgemindert, welches ein Versagen des Bauteiles zufolge haben kann.

2.3.8.3 Dichtheit des Gefüges

Durch die Umwandlung des Calciumhydroxides in die Carbonate, ergibt sich eine Volumenzunahme von ungefähr 11%. Diese Zunahme erzeugt eine Abnahme des Porenvolumens um etwa 25 %, womit sich die Dichtigkeit gegenüber Wasser und Gasen erhöht. Die Festigkeit des Betons kann sich ebenfalls um 20 – 50 % steigern.

2.3.9 **Prüfen der Karbonatisierung**

2.3.9.1 Bestimmung der Karbonatisierungstiefe

Die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe folgt über ein zerstörendes Prüfungsverfahren an einer frisch gebrochenen (freigelegten) Betonprobe. In der EN 13295 [28] wird die Prüfung von carbonatisierten Beton geregelt. Die übliche Methode zur Bestimmung Karbonatisierungsfortschritt ist die indikative Bestimmung mittels einer Indikatorlösung. Diese Lösung besteht laut [28], aus 1g Phenolphthalein-Indikator in einer Lösung aus 70 ml Ethanol und 30 ml entmineralisiertem Wasser. Für diese wissenschaftliche Arbeit wurde zusätzlich noch eine Bildauswertung von den besprühten Betonproben durchgeführt. Weitere normative Regelungen zur Prüfung der Carbonatisierung sowie zum beschleunigte Verfahren sind in der ÖNORM EN 12390-10 [12] sowie im Model Code [11]. Der Vergleich und der Einfluss des Prüfungsverfahren wird in der Diplomarbeit von Philipp Heinrich untersucht.

2.3.9.2 Indirekte Bestimmung: Unterdruckverfahren/Gas-(Luft)permeabilität

[27] haben sich mit der Luftpermeabilität von Beton befasst. Großen Einfluss hat laut dieser Forschungsarbeit die Feuchtigkeit im Beton, jedoch auch die Wahl des Zementes und der W/Z-Wert. In [25] wird die Gaspermeabilität speziell auf das Verhalten für carbonatisierten Beton untersucht. Es wurde festgestellt, dass es bei normalen Betonen einen Zusammenhang zwischen Luftpermeabilität und Chloridpermeabilität besteht. Dieser Faktor (D_o/D_{Cl}) liegt bei für die erwähnten Normalbetone bei 1,0 und kann bei modifizierten Betonen auf über 10 ansteigen. Das bedeutet, dass mit zunehmendem Ersetzen von Klinker der Widerstand gegenüber Chloriden steigt bzw. die Luftpermeabilität steigt. [27] und vor allem [25] erwähnen zusätzlich einen geringere Luftpermeabilität und eine geringere Porosität bei carbonatisierten Beton. Den Effekt der Verringerung der Porosität bzw. der Luftpermeabilität wurde ebenfalls von Song [29] erwähnt und versuchstechnisch aufgezeichnet. Die Abbildung 6 zeigt das Abnehmen der Luftpermeabilität mit fortschreitender Carbonatisierung.

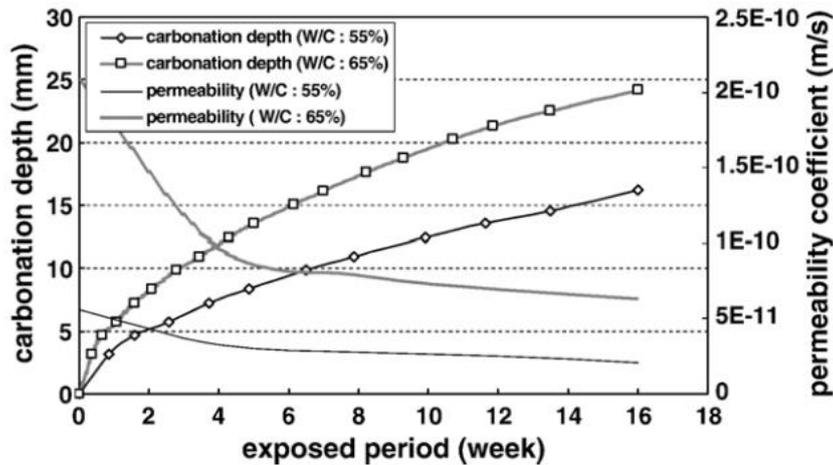


Abbildung 6 Zusammenhang Karbonatisierungsfortschritt Luftbermeabilität [29]

2.3.9.3 Indirekte Bestimmung: Chlorid-Migrationstest

[25] beschreibt, dass der Widerstand gegenüber Chlorid nur bedingt im Zusammenhang mit der Karbonatisierung steht. Für Betone mit höheren W/Z-Wert kann ein direkter Zusammenhang bestehen, jedoch für modifizierte Betone, also klinkerreduzierte Betone ist die Abhängigkeit nicht mehr gegeben. Das bedeutet, dass der Chloridwiderstand in Relation zum Karbonatisierungswiderstand sich verbessert. Der Grund dafür liegt nach vertiefender Recherche daran, dass die Karbonatisierung sehr stark von den Klinkerphasen abhängig ist, welche in größeren Mengen vorhanden sind, in Abhängigkeit der Menge an Zement.

2.3.9.4 Indirekte Bestimmung: Wassereindringtiefe/Wasserpermeabilität

Die Forschungen von [29] untersuchen die Beziehung zwischen Wasserpermeabilität und Karbonatisierung von Betonen. Ausgehend von zwei unterschiedlichen W/Z-Werten (0,65 & 0,55), sind unter anderem die Wasserpermeabilität und die Karbonatisierungstiefe geprüft worden. Die Ergebnisse zeigen einen Zusammenhang zwischen Wasserpermeabilität und der Karbonatisierungstiefe. Bei geringerer Wasserpermeabilität sinkt die Karbonatisierungstiefe ebenfalls. Jedoch zeigt sich in beiden Bereichen eine sehr starke Korrelation zum W/Z-Wert. Weiters zeigen die Forschungsergebnisse bei zunehmend fortgeschrittener Karbo-

natisierung, dass die Wasseraufnahme abnimmt. Der Grund dafür sind die Reduktion des Porenvolumens und der Porendurchmesser. Ein weiterer auffälliger Punkt ist, dass die Karbonatisierung bei Betonen mit niedrigeren W/Z-Wert einen geringeren oder keinen Einfluss auf die Permeabilität haben, als bei denen mit einem größeren W/Z-Wert.

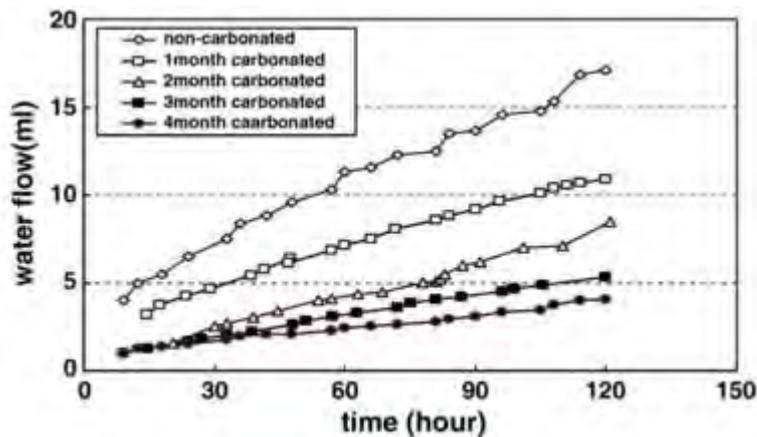


Abbildung 7 Veränderter Wasserfluss unter Carbonatisierten Bedingungen [29]

Ein Verfahren über eine indirekte Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes durch andere Verfahren, sind somit nicht zielführend. Der Grund liegt darin, dass die Verfahren zur Ermittlung der Luftpermeabilität und des Wassereindringtiefe zwar eine Aussage über den Porenraum zulassen, jedoch keine Aussage über die chemische Resistenz des geprüften Betons treffen kann.

2.4 Idealisiertes Verhalten der Karbonatisierung

Das Verhalten der Karbonatisierung entspricht laut Model Code [11] & [14][16][15] dem Verlauf eines Wurzel-Zeit Gesetzes. Das heißt das der Karbonatisierungsfortschritt mit dem Alter des Betons abnimmt. Die idealisierten Verläufe der Karbonatisierungstiefe sowie der Karbonatisierungsrate in Kapitel 4.1 werden anhand dieses Modells abgebildet. Die Karbonatisierungstiefe kann bei konstanten physikalischen Randbedingungen wie folgt beschrieben werden.

$$x_{c(t)} = K_{NAC} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Glg. (1)}$$

Die beschleunigte Karbonatisierungsrate K_{ACC} wird mittels dem aus den Versuchen erlangten Karbonatisierungstiefe errechnet.

$$K_{ACC} = \frac{d_{k,m}}{\sqrt{t}} \quad \text{Glg. (2)}$$

Die natürliche Karbonatisierungsrate kann ausgehend von der beschleunigten Karbonatisierungsrate über einen Faktor errechnet werden. Dieser Faktor berücksichtigt die Unterschiede der CO_2 Konzentrationen des beschleunigten Karbonatisierungsverfahren gegenüber den natürlichen Bedingungen. Hunkeler [15] hat über Vergleiche von beschleunigten und natürlichen Bedingungen einen Korrekturfaktor k_{CO_2} einen Bezug zur natürlichen Karbonatisierung hergestellt. Dieser Korrekturfaktor wurde in dieser Arbeit angewandt um die natürliche Karbonatisierungsrate zu errechnen.

$$K_{NAC} = \frac{K_{ACC}}{\sqrt{\frac{CO_{2,ACC}}{CO_{2,NAC}}}} \cdot k_{CO_2} \quad \text{Glg. (3)}$$

mit: $CO_{2,ACC}$ = CO_2 Konzentration für beschleunigtes Verfahren
 $CO_{2,NAC}$ = natürliche CO_2 Konzentration
 k_{CO_2} = Korrekturfaktor nach Hunkeler [15]

In Kapitel 4.1 werden anhand dieser Modelle die Karbonatisierungsraten errechnet und dargestellt.

3. Versuchsprogramm

3.1.1 Vorlagerung

Für die Prüfung der Karbonatisierung sind für die verschiedenen Betone jeweils 4 Probekörper hergestellt worden. Diese besitzen die Abmessung von 100 x 100 x 200 mm. Die daraus entstandenen Probekörper werden nach 24 Stunden aus den Schalungsformen genommen und anschließend 7 Tage Unterwasser gelagert. Nach der Wasserlagerung werden die Proben bis zu einem Alter von 28 Tagen in einer Kammer mit konstanten klimatischen Bedingungen (65% rel.LF, 20°C) gelagert. Nach dieser Lagerung werden die Probekörper in den CO₂-Schrank umgelagert.

3.1.2 Versuchslagerung

Die für die beschleunigte Karbonatisierung notwendige Randbedingungen sind durch den automatisch regulierten CO₂-Schrank sichergestellt worden. Die konstanten Bedingungen während der Lagerung sind ausschlaggebend für eine objektive wissenschaftliche Beurteilung der Prüfergebnisse, da die physikalischen Randbedingungen einen sehr großen Einfluss, auf den Widerstand von Beton gegenüber dem Eintrag von CO₂ haben.



Abbildung 8 Versuchslagerung im CO₂ - Schrank

Tabelle 2 physikalische Randbedingungen der beschleunigten Karbonatisierung

	Rel.LF	Temp.	CO ₂
Soll-Wert	65%	20°C	2,0%
Toleranzen	± 5%	± 2°C	± 0,2%

Die Lagerungsbedingungen sind an die Empfehlungen von Greve-Dierfeld [14] angelehnt. Aufgrund von ihren Ergebnissen und der Empfehlung im Model Code [11] wurde für die durchgeführten Versuche eine CO₂-Konzentration von 2% gewählt. Ebenfalls im Model Code [11] werden die weiteren Versuchs- Randbedingungen, für den sogenannten ACC-Test, wie sie für die erfolgten Prüfungen übernommen worden sind, empfohlen. In [34] wurden die chemischen Veränderungen mit unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen untersucht. Als Ergebnis konnte ein negatives Verhalten bei Konzentrationen von 10 - 100%, aufgrund der geringen Mengen an vorhandenem CSH-Gel, festgestellt werden. Der Grund ist laut den Forschern die geringere und wie auch im Model Code [11] erwähnt die Bildung von anderen C-S-H Phasen sowie größere Mengen an gebildeten Carbonaten. Generell ist eine zu hohe CO₂-Konzentration nicht für den Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes geeignet, da der Transport und somit das für die Reaktion der Karbonatisierung zur Verfügung stehende CO₂ in zu großer Menge vorhanden ist, und die Karbonatisierung nur mehr durch die Reaktionsgeschwindigkeit und der Löslichkeit des Ca(OH)₂ bestimmt wird.

3.1.3 Versuchsdurchführung

Die Probekörper werden bis zu den jeweiligen Prüfterminen im CO₂-Schrank gelagert. Die für eine Karbonatisierungsprüfung erforderliche frische Bruchfläche wird mittels einer hydraulischen Presse vom restlichen Probekörper freigelegt, indem eine in etwa 50 mm breite Scheibe abgespalten wird. Das Abspalten von einer 50mm Scheibe beseitigt den Einfluss der Karbonatisierung aus der Richtung der vorhergehenden Bruchfläche, womit eine Beaufschlagung des CO₂ nur durch die vier Seitenflächen erzwungen wird. Mit jedem Ausgangsprobekörper können somit jeweils drei Prüfungen zu je drei unterschiedlichen Prüfterminen

durchgeführt werden. Es sind für jede Rezeptur vier solcher Probekörper hergestellt worden um eine vierfache Bestimmung der Karbonatisierungstiefe zu erreichen.

Die Messung im Labor wurde mit einer Schiebelehre durchgeführt, welche eine Anzeigegenauigkeit von $\pm 0,01$ mm besitzt. Die mindest Ablesegenauigkeit ist laut ÖNORM EN13295 [28] mit 0,5 mm definiert. Für unsere Messungen wurde der Anzeigewert genau abgelesen und erst im Mittel gerundet. Für die Messung an wellenartigen oder nicht geradlinigen Verläufen der Karbonatisierungsfronten, Störung durch Gesteinskörnungen und tiefgehenden Karbonatisierung wird die ÖNORM EN13295 [28] herangezogen. Zusätzlich ist laut [12] zwischen dem besprühen und dem Messen eine Zeitdifferenz von $1 \text{ h} \pm 15 \text{ min.}$ einzuhalten. Die mittlere Karbonatisierungstiefe ($d_{k,m,i}$) je Seite wird nun aus einem Mittel von 5 einzelnen Karbonatisierungstiefen gebildet. Bei einer starken Ausprägung der Ausrundungen in den Ecken, werden nur 3 Messwerte im nicht ausgerundeten Bereich herangezogen [28].



Abbildung 9 Messung mittels Indikatorlösung

Beispielbild für die Messung im Labor mittels einer Indikatorlösung. Die mittlere Karbonatisierungstiefe der ersten Seite $d_{k,m,1}$ wird schematisch dargestellt. Zu beachten sind dabei die Unregelmäßigkeiten bei den Gesteinskörnungen und ihrer Berücksichtigung nach ÖNORM EN 13295 [28].

3.2 Geprüfte Betone

3.2.1 *Betonzusammensetzung*

Als Versuchsreihe wurden Betone gewählt bzw. hergestellt, welche in der Praxis für die Fertigteilindustrie eingesetzt werden könnten. Die Rezepturen sind mit einer gezielten Variation entwickelt worden, um einen möglichst aussagekräftigen Eindruck über das Verhalten der Ökobetone zu erhalten.

Die Variation beinhaltet in der Phase A zwei Referenzbetone, ein Referenzbeton mit CEM I 52,5 R und einer mit CEM II / A-S 52,5 N (HüS als Zumahlstoff).

Zu diesen Referenzbetonen wurden jeweils in Phase A zwei Ökobetone und in der Phase P ein dritter Ökobetone hergestellt.

Die Ökobetone der ersten Gruppe sind an den Referenzbeton R_0,53_CEM II / A-S 52,5 N angelehnt. Diese enthalten im „Pulver“ gleichviel Massenprozent HüS wie der vorhin genannte Referenzbeton und gleichviel M% Klinker. In diesem Fall werden unter Pulver, alle Bestandteile < 125 µm von Zement und Zumahlstoffen von Typ I und Typ II verstanden. Somit ist die im Referenzbeton enthaltene Bindemittelmenge (nur CEM II / A-S 52,5 N) im Verhältnis äquivalent zu den Ökobetonen (O_0,53_CEM I_HüS_KSM &

O_0,56_CEM I_HüS_KSM & O_0,59_CEM I_HüS_KSM). Die Bindemittel der Ökobetone setzen sich aus CEM I 52,5 R und Hüttensand zusammen.

Die zweite Gruppe enthält keinen Hüttensand. Die Ökobetone (O_0,53_CEM I_KSM; O_0,56_CEM I_KSM & O_0,59_CEM I_KSM) sind eine ökologische Variante zum Referenzbeton R_0,53_CEM I 52,5 R. Sie enthalten als Bindemittel wie der Referenzbeton nur CEM I 52,5 R.

Die W/B-Werte sind in einer Abstufung von 0,03 variiert worden. Ausgehend von den Referenzbetonen mit einem W/B-Wert von 0,53 wurden Ökobetone beider Serien mit den W/B-Werten von 0,53, 0,56 & 0,59 hergestellt. Die in der Phase A fehlenden Lücken im W/B-Wert wurden in der Phase B geschlossen. Zusätzlich wurde noch ein Referenzbeton (R_0,53_CEM II / A-S 42,5 R) hergestellt, welcher als Zement, CEM II / A-S 42,5 R (HüS als Zumahlstoff) beinhaltet.

Die Anrechnung der hydraulisch wirksamen Bindemittel wird mittels dem k-Wert Verfahren durchgeführt. Der verwendete Hüttensand besitzt eine sehr hohe Qua-

lität bzw. Feinheit und wird mit einem k-Wert von 1 angerechnet. Der vorgeschriebene k-Wert von 0,8 wurde aufgrund von Prüfergebnissen der Aktivität sowie auf den Verweis von Herstellerangaben erhöht. Weiters ist am ersten Zeitpunkt der Versuchsdurchführung (56d Betonalter) mit einer vollen Mitwirkung des Hütensandes zu rechnen.

Um den Einfluss des Leimvolumens konstant zu halten, Ausnahme ist der Referenzbeton der Phase B (R_0,53_CEM II A 42,5 R). Ein weiteres Ziel war es, trotz der Reduktion von Wasser, ein gleichwertiges Ausbreitmaß und somit eine ausreichende Verarbeitbarkeit sicher stellen zu können. Um eine ausreichende Verarbeitbarkeit erreichen zu können, wurde das erwünschte Ausbreitmaß mittels Steigerung der Fließmittelmenge eingestellt. Nachstehend werden nun die Rezepturkennwerte und die dazugehörigen Betoneigenschaften abgebildet.

Die Referenzbetone der Phase A unterscheiden sich alleine durch ihren Zementtyp, alle andere Rezepturparameter sind gleich. Somit kann der direkte Einfluss der verschiedenen Zemente, anhand ihrer unterschiedlichen Klinkergehalte, gezeigt werden. Der Referenzbeton R_0,53_CEM II A 42,5 R hat dieselbe Zementmenge, jedoch aufgrund anderer Gesteinskörnungen einen höheren Mehlkorngehalt und ein höheres Leimvolumen, was zu einem niedrigeren W/P_v-Wert führt.

In der Tabelle 3 sind nun die Rezepturzusammensetzungen der geprüften Betone zu finden. Neben dem absoluten Zementgehalt sind die Bindemittel sowie die Füller in Massenprozent angegeben.

Tabelle 3 Rezepturkennwerte 1

	Phase	CEM [kg/m ³]	CEM [%]	AHWZ [%]	Eco- Füller [%]	Mikro- Füller [%]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	A	330 ²⁾	100	-	-	-
R_0,53_CEM I 52,5 R	A	330 ¹⁾	100	-	-	-
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	A	236 ¹⁾	64	13,4 ⁴⁾	15,7	7,2
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	A	250 ¹⁾	64	13,4 ⁴⁾	15,7	7,2
O_0,59_CEM I_KSM	A	251 ¹⁾	64	-	28,7	6,8
O_0,56_CEM I_KSM	A	258 ¹⁾	64	-	28,7	6,8
R_0,53_CEM II A 42,5 R	B	330 ³⁾	100			
O_0,53_CEM I_KSM	B	268 ¹⁾	64		28,7	6,8
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	B	241 ¹⁾	64	13,4 ⁴⁾	15,7	7,2

¹⁾ CEM I 52,5 R ²⁾ CEM II / A-S 52,5 N ³⁾ CEM II / A-S 42,5 R

Die Tabelle 4 zeigt die Stoffeigenschaften der verwendeten Bindemittel sowie die dazugehörigen Eco- und Mikro-Füller. Die Bestimmung dieser Werte wird von Juhart in [2] beschrieben.

Tabelle 4 Stoffeigenschaften

	Dichte ρ_k [g/cm ³]	d_{50} [μ m]	n_w -Was- seran- spruch ¹⁾ [-]	$V_{w,s}/V_P$ ²⁾ [-]	CaO- Gehalt [%]	Klinker- anteil [%]
CEM I 52,5 R	3,14	-	0,453	0,83	61,6	91
CEM II/A 52,5 N	3,20	-	0,456	0,84	57,7	85
CEM II/A 42,5 R	3,10	12,0	0,444	0,80	57,3	85
AHWZ: Hüttsand	2,86	9,2	0,471	0,80	35	-
Eco-Füller: Kalk	2,7	9,0	0,370	0,89	-	-
Mikro-Füller: Klak	2,7	2,3	0,430	0,61	-	-

¹⁾ Wassergefüllter Volumenanteil eines Gemisches am Sättigungspunkt, geprüft nach dem Mischenergieverfahren [35]

²⁾ Volumen des Wasserbedarfs bei Sättigung / Volumen der pulverförmigen Stoffe

Tabelle 5 Rezepturkennwerte 2

	Gesamt- wasser [l/m ³]	W/Z [-]	W/B [-]	Klinker- gehalt ¹⁾ [kg/m ³]	W/CaO ¹⁾ [-]	W/K [-]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	175	0,53	0,53	281	0,92	0,62
R_0,53_CEM I 52,5 R	175	0,53	0,53	300	0,86	0,58
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	169	0,715	0,59	215	1,04	0,79
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	161	0,643	0,53	228	0,93	0,71
O_0,59_CEM I_KSM	148	0,59	0,59	228	0,96	0,65
O_0,56_CEM I_KSM	145	0,56	0,56	235	0,91	0,62
R_0,53_CEM II A 42,5 R	175	0,53	0,53	281	0,93	0,62
O_0,53_CEM I_KSM	141	0,53	0,53	244	0,86	0,58
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	164	0,68	0,56	219	0,99	0,75

¹⁾Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie bzw. Röntgenfluoreszenzanalyse

Das Gesamtwasser setzt sich aus dem zugegebenen Wasser, der Feuchtigkeit in den Zuschlagstoffen und einem Anteil der Fließmittel zusammen. Die weiteren in der Tabelle 5 angegebenen Parameter sind die Massenverhältnisse aus Wasser/Zement (W/Z-Wert), das Massenverhältnis aus Wasser/Bindemittel (W/B-

Wert). Der absolute Klinkergehalt und der dazugehörige Wasser/Klinker-Wert beinhalten nur den tatsächlichen Anteil an Klinker im Zement, ausgenommen sind somit inerte und hydraulisch wirksame Zusatzstoffe in den Zementen.

Tabelle 6 Rezepturkennwerte 3

	Mehl- kornge- halt [kg/m ³]	W/P_v [-]	W/P_m [-]	Leimvo- lumen [l/m ³]	FM- Gehalt [kg/m ³]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	361	1,52	0,48	289	1,5
R_0,53_CEM I 52,5 R	361	1,50	0,48	292	1,3
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	400	1,26	0,42	294	1,2
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	423	1,13	0,38	294	1,7
O_0,59_CEM I_KSM	420	1,04	0,35	292	2,2
O_0,56_CEM I_KSM	431	0,99	0,34	292	2,8
R_0,53_CEM II A 42,5 R	469	1,11	0,37	334	1,2
O_0,53_CEM I_KSM	455	0,94	0,32	293	3,7
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	381	1,29	0,43	292	1,4

Der Mehlkorngehalt beschreibt die Masse der Feinteile < 125 µm zusammensetzend aus den Bindemitteln, Füllern sowie Feinteilen in den Gesteinskörnungen. Der W/P_v-Wert beschreibt das Volum-Verhältnis, der W/P_m-Wert das Massenverhältnis.

In der Tabelle 7 sind die wichtigsten ökologischen Parameter nach den Grundsätzen der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment – LCA) gezeigt [30].

Tabelle 7 ökologische Rezepturparameter

	GWP [kgCO ₂ /m ³]	PEI [MJ/m ³]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	260	1402
R_0,53_CEM I 52,5 R	273	1500
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	200	1201
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	212	1282
O_0,59_CEM I_KSM	213	1275
O_0,56_CEM I_KSM	219	1324
R_0,53_CEM II A 42,5 R	258	1402
O_0,53_CEM I_KSM	227	1361
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	205	1250

Die Kennwerte der Ausgangsstoffe sind in [6] zu finden.

3.2.2 **Betoneigenschaften**

Die Betoneigenschaften sind aufgrund der nicht normgemäßen Zusammensetzung auf gleichwertige Performance zu überprüfen, um somit den Nachweis zu erbringen, dass die Betone den Standard bzw. gegenüber den Referenzbetonen nach Norm gleichwertig sind. Dieses Konzept wird in der ÖNORMEN 206 [9] als Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit (ECPC equivalent concrete performance concept) beschrieben und geregelt.

Tabelle 8 Ausbreitmaß & Festigkeiten

	Ausbreitmaß		
	10min [cm]	f_{cm,24h} [N/mm ²]	f_{cm,28d} [N/mm ²]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	48,0	19	54
R_0,53_CEM I 52,5 R	52,5	28	62
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	51,0	19	56
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	60,0	25	68
O_0,59_CEM I_KSM	53,5	33	67
O_0,56_CEM I_KSM	56,0	37	69
R_0,53_CEM II A 42,5 R	57,0	23	56
O_0,53_CEM I_KSM	49,0	42	86
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	50,0	21	59

In der Tabelle 8 werden das Ausbreitmaß (AM) nach 10 Minuten sowie die charakteristischen mittleren Betondruckfestigkeiten nach 24 Stunden und 28 Tagen gezeigt.

Die Tabelle 9 zeigt nun die Eigenschaften der Betone hinsichtlich der Dauerhaftigkeit. Die Wassereindringtiefe wurde nach der ÖNORM EN 12390-8 [31] geprüft. Die offene Porosität wurde nach der ÖNORM EN 1936 [32] geprüft.

Der mittlere Karbonatisierungskoeffizient $K_{AAC,m}$ gibt den Mittelwert der Karbonatisierungsrate an, wobei der Koeffizient $K_{AAC,reg}$ das Ergebnis der linearen Regression darstellt.

Tabelle 9 Festbetoneigenschaften / Dauerhaftigkeit

	Wasserein-			
	dringtiefe [mm]	Porosität [%]	$K_{AAC,m}$ [mm/day ^{1/2}]	$K_{AAC,reg}$ [mm/day ^{1/2}]
R_0,53_CEM II A 52,5 N	16	19,09	0,51	0,50
R_0,53_CEM I 52,5 R	15	19,36	0,36	0,34
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	11,5	17,97	0,67	0,69
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	5	17,93	0,33	0,32
O_0,59_CEM I_KSM	7,5	17,38	0,37	0,37
O_0,56_CEM I_KSM	10	16,71	0,39	0,41
R_0,53_CEM II A 42,5 R	8,6	17,41	0,46	0,47
O_0,53_CEM I_KSM	14,6	17,45	0,09	0,11
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	15,7	21,06	0,61	0,60

3.2.2.1 Performance-Vergleich der Betoneigenschaften

Der Performance-Vergleich in Abbildung 10 zeigt das Ausbreitmaß (AM) nach 10 Minuten sowie die Betondruckfestigkeiten nach 24 Stunden und 28 Tagen.

Die Ökobetone weisen bei dem Ausbreitmaß sowie bei der Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen bessere Ergebnisse auf als die dazugehörigen Referenzbetone. Der Ökobeton O_0,53_CEM I_KSM erreicht als einziger das Ausbreitmaß des dazugehörigen Referenzbeton R_0,53_CEM I 52,5 R nicht, jedoch ist dieses Maß nur geringfügig niedriger. Die dazugehörige Betondruckfestigkeit des Ökobetons ist doch um einiges höher.

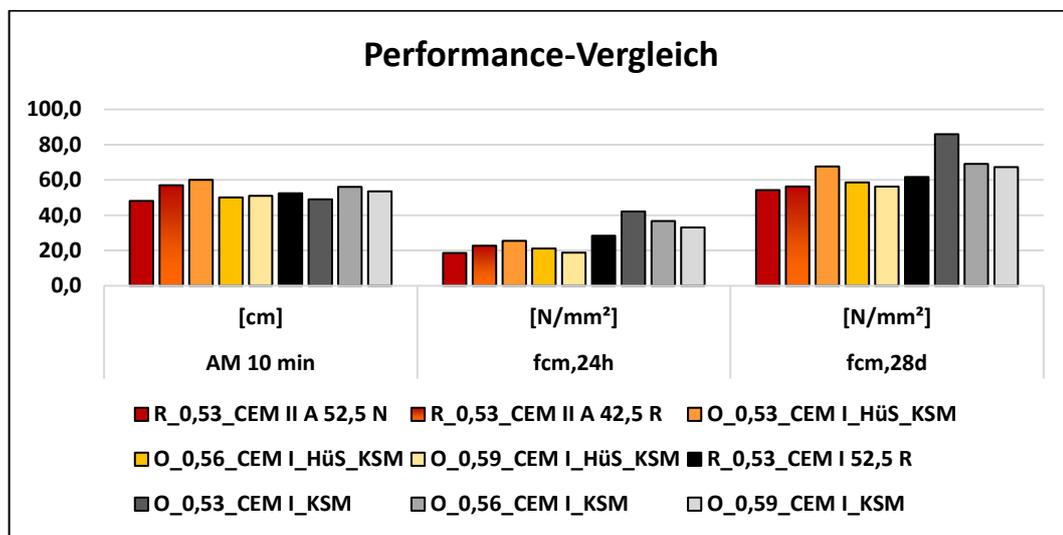


Abbildung 10 Performance-Vergleich der Betoneigenschaften

Somit können alle Öko-Betone, in Bezug auf Frisch- und Festbetoneigenschaften der Referenzbetone, zumindest als äquivalent bezeichnet und auf die Eigenschaft der Karbonatisierung untersucht werden.

3.2.2.2 Ökologischer Performance-Vergleich

Die wichtigsten ökologischen Parameter, wie in Kapitel 0 kurz beschrieben, werden in den nachstehenden Abbildungen gezeigt. Dabei sind die Ökobetone immer in Relation zum Referenzbeton aufgetragen, um das Verbesserungspotential zeigen zu können.

Der ökologische Performance Vergleich zeigt, die aus der Entwicklung hervorgehenden positiven ökologischen Eigenschaften der Ökobetone. Die Optimierung der Betone bringt hinsichtlich GWP in etwa 20 % weniger CO₂ Emissionen.

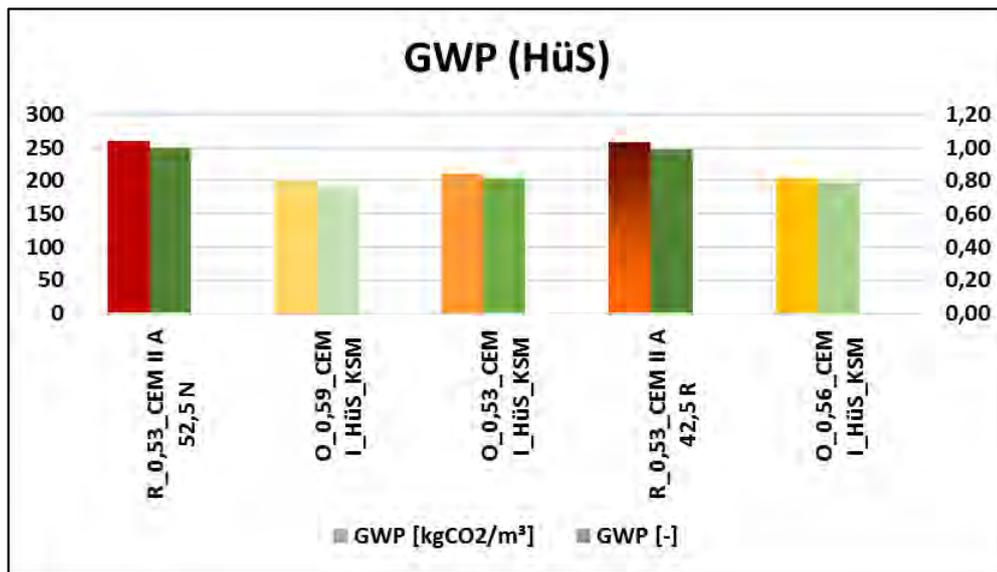


Abbildung 11 Performance-Vergleich GWP (Global Warming Potential) mit Hüs

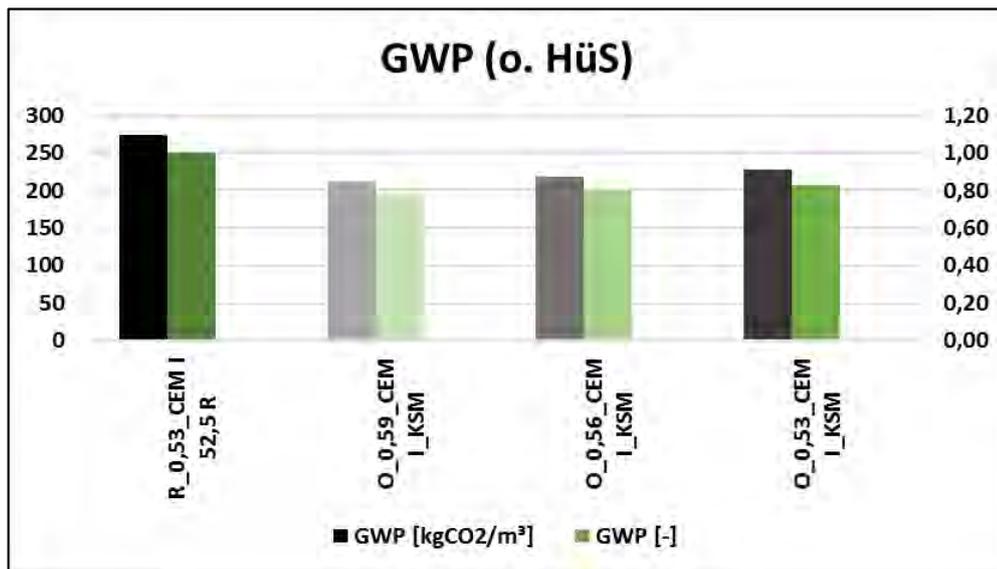


Abbildung 12 Performance-Vergleich GWP (Global Warming Potential) ohne Hüs

Der Primär-Energiebedarf sinkt bei den Ökobetonen um bis zu 15 %. In ökologischer Hinsicht gibt es noch Potential, aufgrund der gezielten Variation ist die ökologische Optimierung nicht ganz ausgeschöpft, führt aber zu einem besseren Verständnis des Verhaltens der Karbonatisierung.

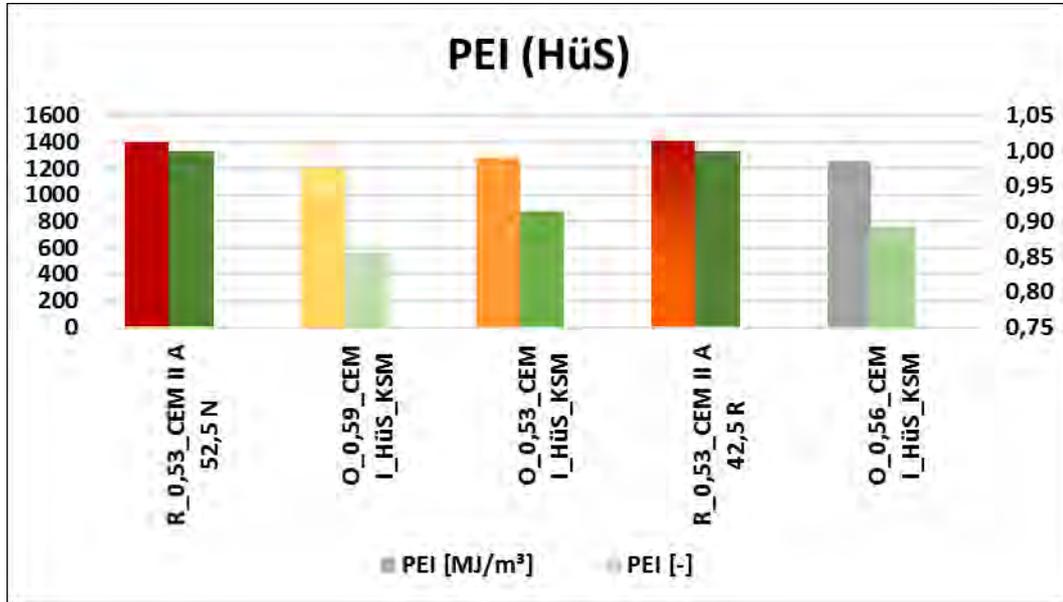


Abbildung 13 Performance-Vergleich mit PEI (Primär-Energiebedarf) mit Hüs

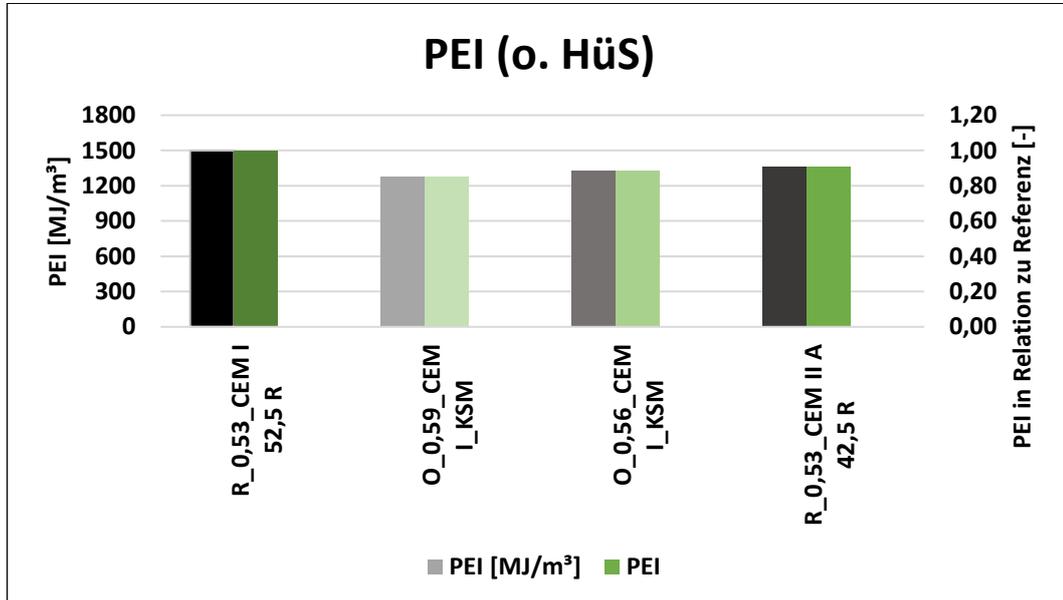


Abbildung 14 Performance-Vergleich mit PEI (Primär-Energiebedarf) ohne Hüs

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Berechnung des Karbonatisierungswiderstandes

4.1.1 *Karbonatisierungstiefe*

Die Karbonatisierungstiefe wurde über die Messung, mittels Schiebelehre und über eine grafische Bildauswertung mittels Acrobat-Reader bestimmt. Beide Verfahren haben hinsichtlich der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe Vor- sowie Nachteile. Die Messung mittels Schiebelehre kann vor allem zu Messungenauigkeiten bei sehr geringen Karbonatisierungstiefen (Prüfalter 28 Tage) führen. Ein Nachteil der Bildauswertung liegt z.B. an der Mitberücksichtigung von Ausrundungen im Eckbereich. Zusätzlich spielt die Lage des Maßstabes (Millimeterpapier) sowie unterschiedliche Höhen der Bruchflächen (schiefe Bruchfläche) aufgrund der optischen Verzerrung eine sehr große Rolle. Für die weitere Auswertung wird die Wahl des Mess-Verfahren, in Tabelle 10 dargestellt, über die Bewertung der Streuungen durchgeführt. Die Standardabweichung wurde von den jeweils 4 mittleren Karbonatisierungstiefen (n=4 Probekörper pro Beton) ermittelt. Diese Auswertung ergab in den meisten Fällen eine geringe Standardabweichung für die manuelle Messung mittels Schiebelehre. Ein grafischer Dementsprechend wurde die manuelle Messung für die weitere Auswertung herangezogen.

Tabelle 10 Mittelwert und Standardabweichung der Messverfahren (56d)

Versuchstage:	Auswertung manuell		Auswertung Bildanalyse	
	MW	STABW	MW	STABW
R_0,53_CEM II A 52,5 N	3,8	0,39	2,8	0,48
R_0,53_CEM I 52,5 R	2,5	0,23	2,2	0,57
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	4,8	0,23	5,5	0,28
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	2,6	0,27	2,8	0,43
O_0,59_CEM I_KSM	2,7	0,30	3,2	0,63
O_0,56_CEM I_KSM	3,1	0,23	3,0	0,20

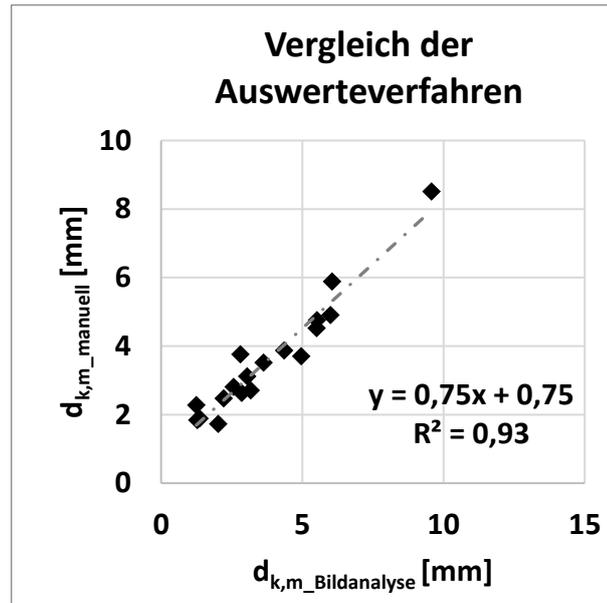


Abbildung 15 Vergleich der Auswertungsverfahren

Die folgenden Berechnungen, Korrelation und Vergleiche, werden anhand der Ergebnisse aus der manuellen Messung durchgeführt. Die Karbonatisierungstiefen aus diesen Messungen werden in der nachstehenden Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11 mittlere Karbonatisierungstiefe nach Versuchstage

Versuchstage:	$d_{k,m} [mm]$		
	28d	56d	140d
R_0,53_CEM II A 52,5 N	2,8	3,8	5,9
R_0,53_CEM I 52,5 R	2,3	2,5	3,9
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	3,5	4,8	8,5
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	1,7	2,6	3,7
O_0,59_CEM I_KSM	1,9	2,7	4,5
O_0,56_CEM I_KSM	1,8	3,1	4,9
R_0,53_CEM II A 42,5 R	2,2	3,7	*
O_0,53_CEM I_KSM	0,2	1,1	*
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	3,4	4,4	*

*Die Karbonatisierungstiefen dieser Betone werden versuchstechnisch erst nach Abschluss der Arbeit ermittelt.

Diese Karbonatisierungstiefen sind die Voraussetzungen für die nachfolgende Auswertung.

Die Abbildung 16 zeigt die gemessenen Karbonatisierungstiefen der Betone mit Hüttensand, sowie die dazugehörigen idealisierten Verläufe nach dem Wurzel-Zeit Gesetz. Man kann sehr gut erkennen, dass das Verhalten der Betone das dem idealisierten Modell, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, ähnelt.

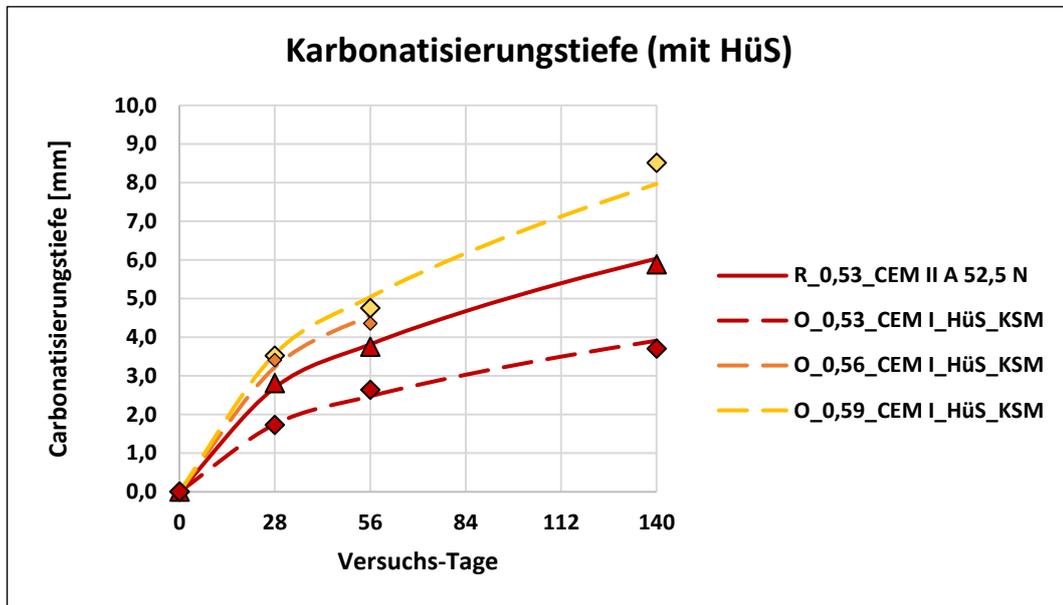


Abbildung 16 Karbonatisierungstiefen (mit HüS)

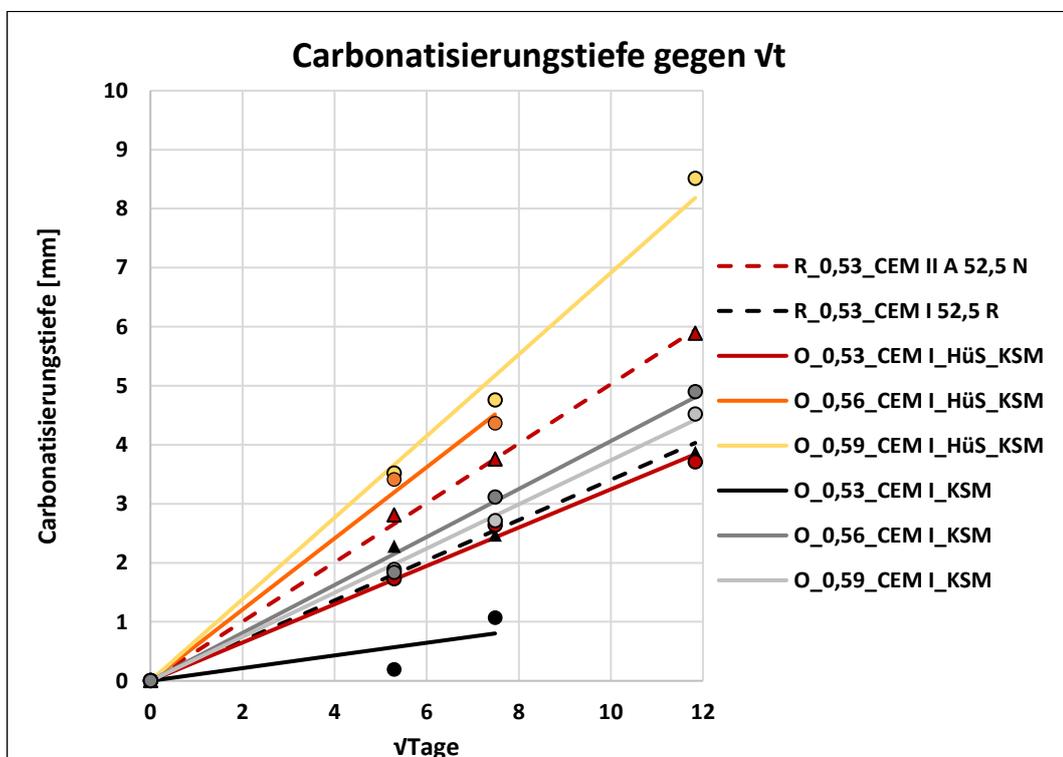


Abbildung 17 Karbonatisierungstiefe gegen Wurzel-Zeit

Die in der Abbildung 17 dargestellten Verläufe zeigen die Karbonatisierungstiefen bezogen auf Wurzel-Zeit. Die Steigung entspricht $K_{ACC,reg}$ aus Tabelle 12. Für den Versuchsbeginn ($T=0$) wurde eine theoretische Karbonatisierungstiefe von NULL gewählt. Diese Wahl wurde mit Messungen, welche teilweise eine nicht messbare ($< 0,1$ mm) kleine Karbonatisierungstiefe ergaben, bestätigt.

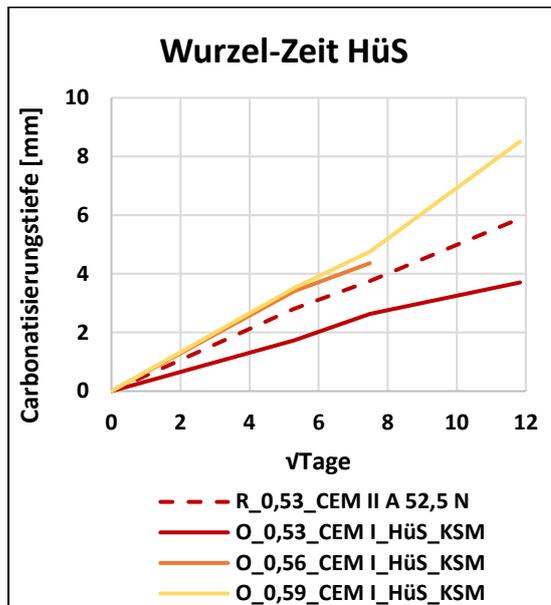


Abbildung 18 Karbonatisierungstiefe CEM I gegen Wurzel-Zeit

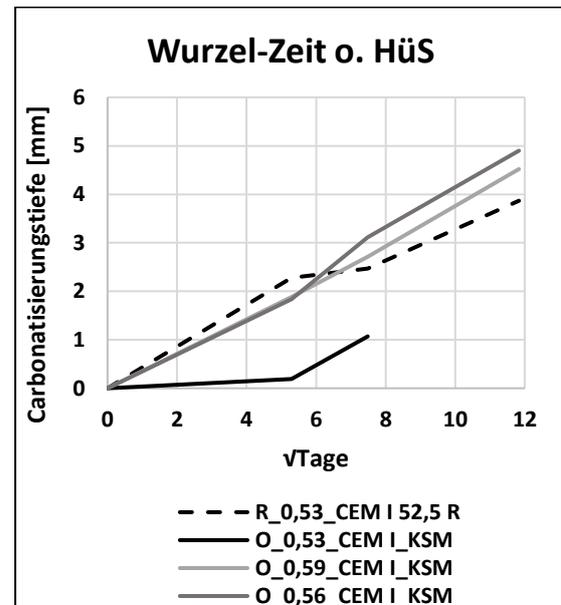


Abbildung 19 Karbonatisierungstiefe HÜS gegen Wurzel-Zeit

Die in Abbildung 18 & Abbildung 19 zeigen nun den tatsächlichen Verlauf der Karbonatisierungstiefe gegen Wurzel-Zeit. Wie man erkennen kann, sind die Verläufe der Abbildung 18 annähernd linear. Dagegen ist in der Abbildung 19 eine klare Abweichung, vor allem beim Referenzbeton $R_{0,53_CEM\ I\ 52,5\ R}$ zu erkennen. Dieser geringere Fortschritt der Karbonatisierungstiefe zwischen dem Zeitpunkt $t = 28$ Tage und dem Zeitpunkt $t = 56$ Tage wird später im Kapitel 4.1.1 und der dafür gezeigten Abbildung 24 untersucht und erklärt.

4.1.1 **Karbonatisierungsrate**

Die beschleunigte Karbonatisierungsrate $K_{ACC,i}$ wurde wie von Frau Greve-Dierfeld [16][14] beschrieben durch das Wurzel-Zeit Gesetz errechnet.

$$K_{ACC,i} = A + \frac{d_{k,m}}{\sqrt{t}} \quad \text{Glg. (4)}$$

mit: A = Anfangswert der beschleunigten Karbonatisierung ($A = 0$)
 $d_{k,m}$ = mittlere gemessene Karbonatisierungstiefe [mm]
 t = Zeiteinheit

Tabelle 12 beschleunigte Karbonatisierungsraten

Versuchstage:	$K_{AAC,i}$ [mm/day ^{1/2}]				
	28d	56d	140d	MW	Reg.
R_0,53_CEM II A 52,5 N	0,53	0,50	0,50	0,51	0,50
R_0,53_CEM I 52,5 R	0,43	0,33	0,33	0,36	0,34
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	0,67	0,64	0,72	0,67	0,69
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	0,33	0,35	0,31	0,33	0,32
O_0,59_CEM I_KSM	0,36	0,36	0,38	0,37	0,37
O_0,56_CEM I_KSM	0,35	0,42	0,41	0,39	0,41
R_0,53_CEM II A 42,5 R	0,41	0,50		0,46	0,47
O_0,53_CEM I_KSM	0,04	0,14		0,09	0,11
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	0,64	0,58		0,61	0,60

*Die Karbonatisierungstiefen dieser Betone werden versuchstechnisch erst nach Abschluss der Arbeit ermittelt.

Der Mittelwert aus den einzelnen Versuchstagen ergibt nun die mittlere Karbonatisierungsrate $K_{ACC,m}$. Leemann hat in [26] eine Regression angewandt um die beschleunigte Karbonatisierungsrate ($K_{ACC,reg}$) zu erhalten. Die Abbildung 17 zeigt die Steigung der Ausgleichsgerade, der mittels Regressionsanalyse in EXCEL errechneten Karbonatisierungsraten.

Die Differenz zwischen diesen beiden Ermittlungsarten ist sehr gering und kann in Tabelle 12 eingesehen werden. Ebenfalls in der Tabelle 12 werden die errechneten beschleunigten Karbonatisierungsraten je Versuchstag aufgelistet. Zukünftig wird $K_{ACC,reg}$ als K_{ACC} bezeichnet. K_{AAC} beschreibt nun die tatsächliche beton-spezifische beschleunigte Karbonatisierungsrate, die mit Regressionsanalyse aus den Verläufen der Karbonatisierung gegen Wurzel-Zeit ermittelt wurden.

Die Ergebnisse der Regression sind in grafischer Form in der Abbildung 21 & Abbildung 20 dargestellt. Die Regressionsgerade der Phase B sind aufgrund der fehlenden Werte nach 140 Tagen nur mittels den ersten beiden Versuchstagen durchgeführt und errechnet worden.

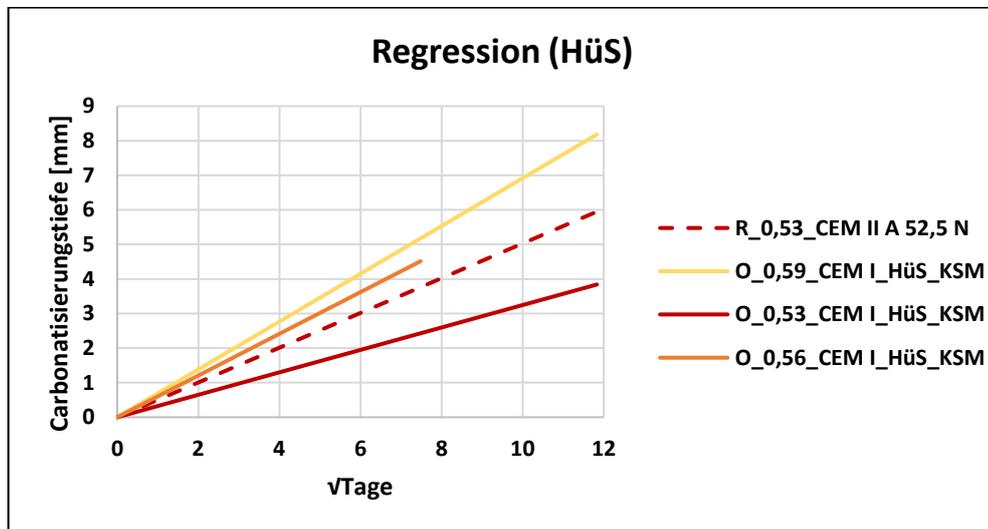


Abbildung 21 Regressionsgerade nach Wurzel-Zeit (mit HüS)

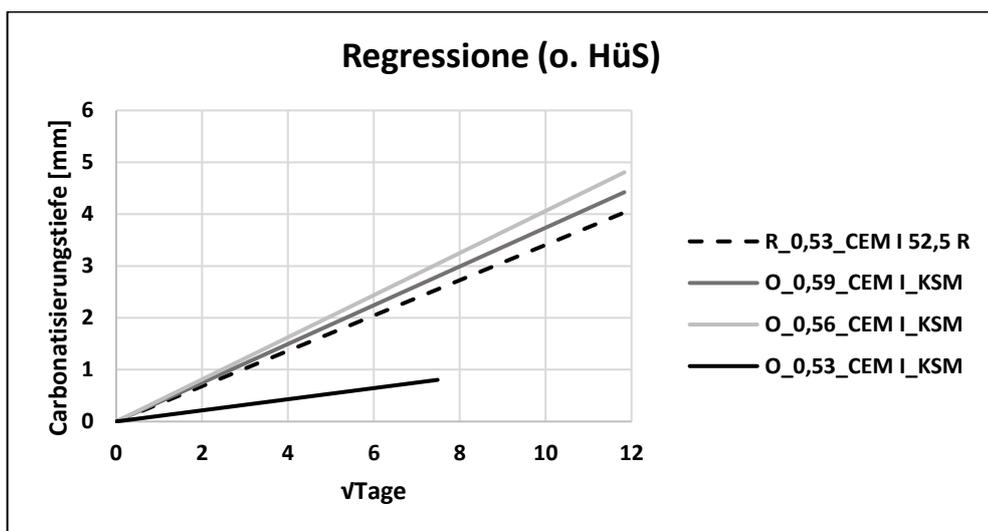
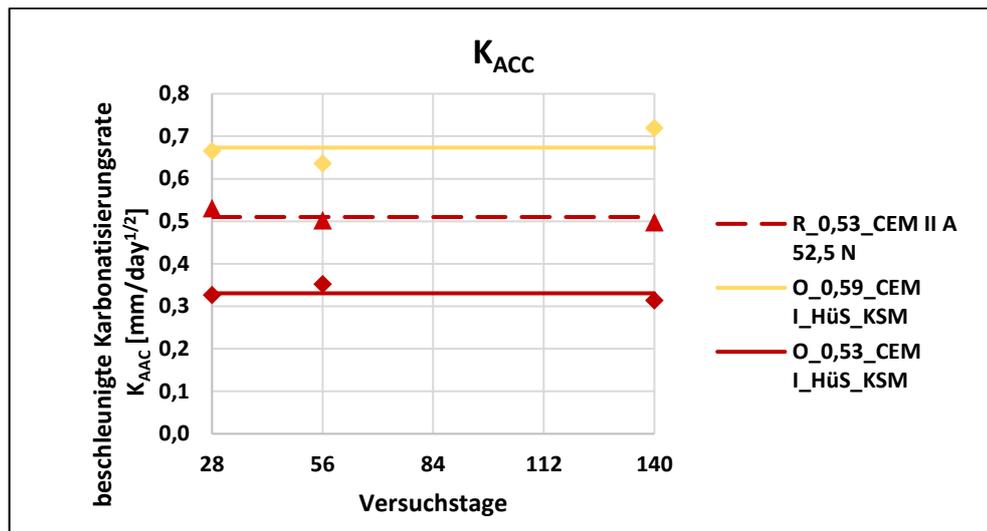
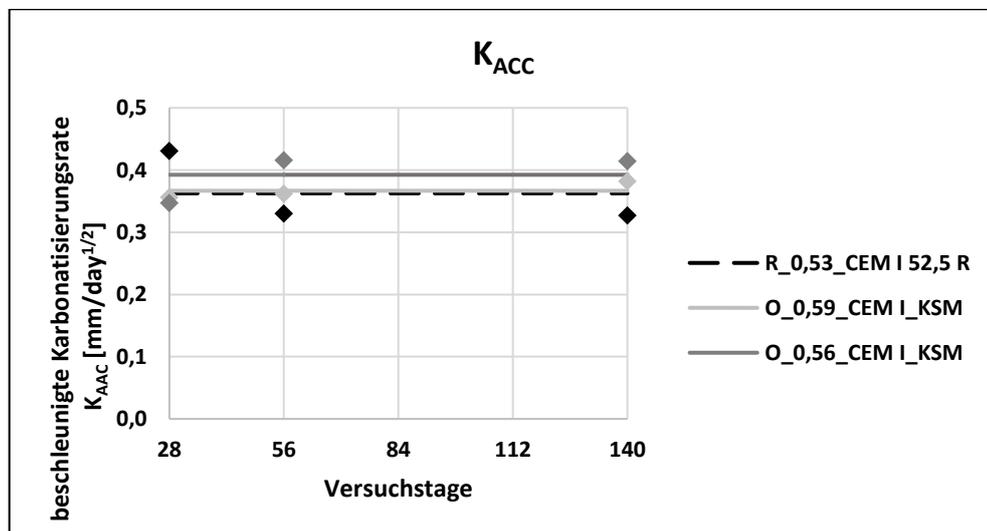


Abbildung 20 Regressionsgerade nach Wurzel-Zeit (ohne HüS)

Abbildung 22 K_{ACC} (Phase A mit HüS)Abbildung 23 K_{ACC} (Phase A ohne HüS)

Die Abbildung 22 & Abbildung 23 zeigen die mittlere beschleunigte Karbonatisierungsrate (gestrichelte Linie) der Betone mit sowie ohne HüS. Zusätzlich sind die tatsächlichen beschleunigten Karbonatisierungsraten zu den jeweiligen Messzeitpunkten ($K_{ACC,28}$; $K_{ACC,56}$; $K_{ACC,140}$) als Punkte in den Diagrammen aufgetragen. Bei den Betonen ohne HüS (R_0,53 & O_0,56) erkennt man beim $K_{ACC,28}$ Abweichungen zu den folgenden Werten. Am Beispiel R_0,53_CEM II 52,5 R wird auf der Abbildung 24 gezeigt, dass dieses Verhalten nicht einer Betoneigenschaft zugeschrieben wird, sondern einer Messungenauigkeit bei sehr geringen Karbonatisierungstiefen zugeschrieben werden kann. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Karbonatisierungsraten $K_{ACC,i}$ anhand der beiden verschiedenen Messverfahren.

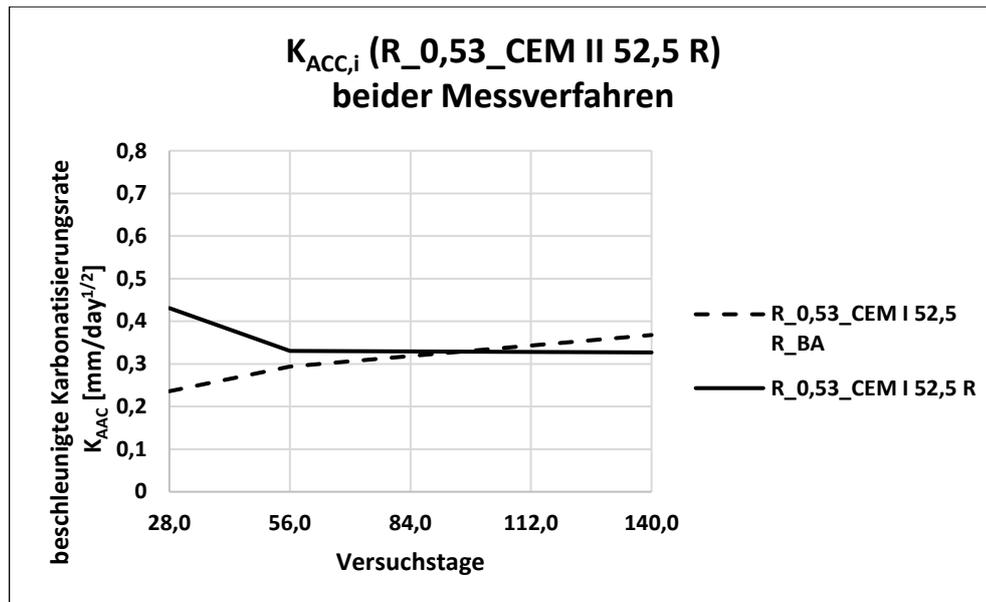


Abbildung 24 $K_{ACC,i}$ der verschiedenen Messverfahren

Die durchgehende Linie zeigt den Verlauf der Messung im Labor. Es ist sehr gut zu erkennen, dass die Karbonatisierungsrate am Tag 28 größer ist als die der restlichen Tage. Die gestrichelte Linie (Endung BA) zeigt den selben Beton, jedoch wurde diesmal das Verfahren der Bildauswertung zur Bestimmung der Karbonatisierungsrate gewählt. Auch hier gibt es am ersten Prüftermin eine signifikante Abweichung, diesmal jedoch in die andere Richtung. Somit könnte über einen das Ausschließen bzw. über eine nicht Berücksichtigung der Werte am 28 Tag diskutiert werden. Jedenfalls kann ein Zusammenhang zu einem tatsächlichen Betonverhalten ausgeschlossen werden.

Um auf eine natürliche Karbonatisierungsrate zu kommen, wird die beschleunigte mit einem CO₂-Konzentrations Faktor zu einer errechneten natürlichen Karbonatisierungsrate K_{NAC} umgerechnet. Dies erfolgt nach Hunkeler [15] über folgenden Umrechnungsfaktor:

$$K_{NAC} = \frac{K_{ACC}}{\sqrt{\frac{CO_{2,ACC}}{CO_{2,NAC}}}} \cdot k_{CO_2} \quad \text{Glg. (5)}$$

mit: $CO_{2,ACC}$ = CO₂Konzentration für beschleunigtes Verfahren
 $CO_{2,NAC}$ = natürliche CO₂Konzentration
 k_{CO_2} = Korrekturfaktor nach Hunkeler [15]

Ausgehend von einer atmosphärischen CO₂-Konzentration von 0,04 % und einer CO₂-Konzentration von 2 % im beschleunigtem Verfahren ergibt sich mit dem Korrekturfaktor nach Hunkeler [15] eine um das 6,2-fache beschleunigte Karbonatisierung.

Der Korrekturfaktor k_{CO_2} , ausgehend von den Versuchsergebnissen ist ein interpolierter Wert nach den Versuchsergebnissen von Hunkeler. Hunkeler gibt Berechnungen zwischen natürliche Karbonatisierungen und beschleunigten Karbonatisierungen bei 1% und 4% CO₂ an.

Tabelle 13 natürliche Karbonatisierungsraten

Versuchstage:	K_{NAC} [mm/year ^{1/2}]		
	28d	56d	140d
R_0,53_CEM II A 52,5 N	1,64	1,55	1,53
R_0,53_CEM I 52,5 R	1,33	1,02	1,01
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	2,05	1,96	2,22
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	1,01	1,08	0,96
O_0,59_CEM I_KSM	1,10	1,12	1,18
O_0,56_CEM I_KSM	1,07	1,28	1,28
R_0,53_CEM II A 42,5 R	1,28	1,54	-
O_0,53_CEM I_KSM	0,11	0,44	-
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	1,98	1,79	-

4.1.2 Vereinfachtes Nachweisverfahren gegen Karbonatisierung

Der Nachweis der Karbonatisierung gemäß Expositionsklassen XC1 bis XC4 ist in der EN 206 [9] bzw. ÖNORM B4710 [5] nur als gleichwertige Leistungsfähigkeit gegenüber Referenzbetonen, oder über mindest-Rezepturkennwerte (Tabelle 1) nachzuweisen. Da aufgrund der ökologischen Optimierung der Zementgehalt stark reduziert wird, fallen Öko-Betone aus diesen Grenzwerten heraus und können somit nicht mehr über ihre Rezepturkennwerte den Expositionsklassen zugeteilt werden.

Für das Nachweisen der Karbonatisierung entsprechend dem Konzept der gleichwertigen Betonleistungsfähigkeit gibt es nun einen Ansatz um die Klassifizierung trotzdem durchführen zu können. Zudem lassen sich gemäß dem Ansatz der Lebensdauerbemessung folgende Abschätzungen treffen.

In der ÖNORM EN 1992-1-1 (S.54) [10] sind Mindestbetondeckungen angegeben. Diese wird vorwiegend von der zu erreichenden Expositionsklasse, von der Nutzungsdauer und der Druckfestigkeitsklasse bestimmt. Diese Mindestbetonüberdeckung je geforderter Anforderungsklasse ist in Tabelle 14 angeführt. Ausgehend von einer Nutzungsdauer von 50 Jahren ist die empfohlene Anforderungsklasse die Klasse S4. Bei einer Nutzungsdauer von 100 Jahren, erhöht sich die Anforderungsklasse um 2. Eine erhöhte Betondruckfestigkeitsklasse (je nach Expositionsklasse) vermindert die Anforderungsklasse um 1.

Tabelle 14 Mindestbetonüberdeckung laut Eurocode 2: EN 1992-1-1 [10]

Anforderungs- klasse	Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{min,dur}$ [mm]				
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4
S1	10	10	10	10	15
S2	10	10	15	15	20
S3	10	10	20	20	25
S4 (50 Jahre)	10	15	25	25	30
S5	15	20	30	30	35
S6 (100 Jahre)	20	25	35	35	40

Mit der im vorhin errechneten natürlichen Karbonatisierungsrate K_{NAC} lässt sich nun die Einwirkung aus Karbonatisierung $x_{c(t)}$ wie folgt errechnen:

$$x_{c(t)} = K_{NAC} \cdot \sqrt{t} \quad \text{in [mm]} \quad \text{Glg. (6)}$$

mit: t = Zeit in Jahren

K_{NAC} = errechnete natürliche Carbonatisierungsrate

Der Widerstand kommt nun aus der vorgeschriebenen Mindestbetondeckung von Tabelle 14. Als Nachweisführung gilt:

$$\frac{x_{c(t)}}{\gamma_f} \leq c_{nom,dur} - \Delta c \quad \text{Glg. (7)}$$

mit: $c_{nom,dur}$ = Mindestbetonüberdeckung in [mm]

Δc = Vorhaltemaß, laut [14] 15 mm, laut [10] 0

γ_f = Teilsicherheitsbeiwert

Ist die einwirkende Karbonatisierungstiefe kleiner als die in der Norm festgelegte Mindestbetonüberdeckung, kann der Nachweis als erfüllt angesehen werden.

Tabelle 15 errechnete Karbonatisierungstiefe $x_{c(t)}$

Nutzungsdauer:	errechnete Karbonatisierungstiefe [mm]		Mindestbetonüberdeckung [mm]	
	50 Jahre	100 Jahre	50 Jahre	100 Jahre
R_0,53_CEM II A 52,5 N	11	16	25	35
R_0,53_CEM I 52,5 R	8	11		
O_0,59_CEM I_HüS_KSM	15	21		
O_0,56_CEM I_HüS_KSM	9*	13*		
O_0,53_CEM I_HüS_KSM	7	10		
O_0,59_CEM I_KSM	8	11		
O_0,56_CEM I_KSM	9	12		
O_0,53_CEM I_KSM	1*	2*		

* Auf Basis von 28d und 56d

Die Abbildung 25 zeigt den vereinfachten Nachweis auf der Karbonatisierung auf charakteristischem Niveau. Dieser Nachweis ist ohne Teilsicherheitsbeiwerten bzw. Einbauungenauigkeiten geführt. Die Linien zeigen die Mindestbetonüberdeckungen für die Expositionsklasse XC3 und somit die Widerstandsseite des Nachweises. Die Balken sind die errechneten Karbonatisierungstiefen an den nachzuweisenden Zeitpunkten. Der Nachweis gilt als erfüllt, wenn die Karbonatisierungstiefe unter dem Grenzwert der Mindestbetonüberdeckung liegt. Für die erzeugten Betone ist die Expositionsklasse XC3 vordefiniert worden, d.h. dass alle Betone den Ansprüchen nach XC3, nach 50 und nach 100 Jahren erfüllen.

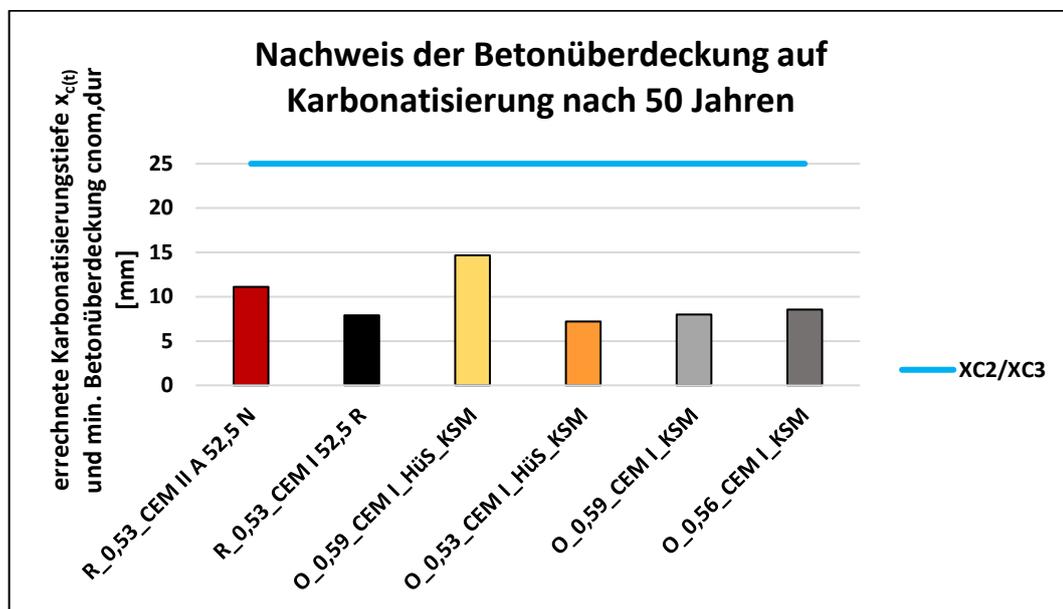


Abbildung 25 vereinfachter charakteristischer Nachweis der Betonüberdeckung auf 50 Jahre

Die Abbildung 26 zeigt den Nachweis auf Design-Niveau. Die Einwirkungsseite wurde nicht wie in [14] auf der einwirkenden Seite mit ($\gamma_f = 1,25$) sondern mit einem Teilsicherheitsbeiwert ($\gamma_f = 1,5$) multipliziert. Die Widerstandsseite kann um einen Wert Δc reduziert werden. In den europäischen Richtlinien EC2 wird dieser laut nationalen Anhang mit 0 mm (durchgezogenen Linie) vorgeschlagen. In der Arbeit von Greve-Dierfeld [14] wird dieser mit 15 mm (strichelte Linie) angegeben. In den beiden Abbildungen werden beide Randbedingungen angeführt. Die relevanten Nachweise werden aufgrund des Wurzel-Zeit Gesetzes für XC3 nach 50 Jahren geführt. Für Fertigteile kann das Vorhaltemaß generell geringer angenommen werden als für Ortbeton. Es ist davon auszugehen, dass der Vorschlag von Greve-Dierfeld [14] für Ortbeton gilt. Laut EC2 [10] kann bei besonderer Qualitätskontrolle die Anforderungsklasse um 1 vermindert werden, bei Fertigteilen könnte somit eine geringere Anforderungsklasse gewählt werden dürfen. Für den Nachweis mit Reduktion von 15 mm ist der Nachweis auf XC3 allen Betonen nicht erfüllt.

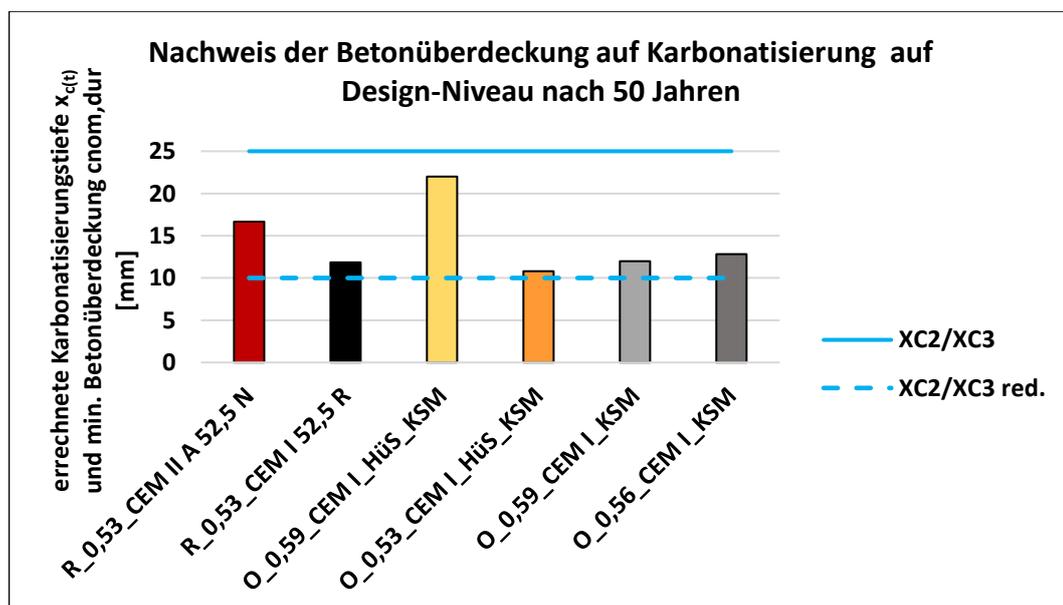


Abbildung 26 Design Nachweis der Betonüberdeckung auf 50 Jahre

4.2 Korrelation mit den Rezepturkennwerten

In diesem Kapitel werden nun die Rezepturkennwerte mit der Karbonatisierungsrate bzw. Koeffizient gegenübergestellt.

In der Abbildung 27 ist nun die beschleunigte Karbonatisierungsrate in Bezug auf den W/B-Wert aufgetragen. Betrachtet man die Abbildung, so lässt sich erkennen, dass sich mit zunehmenden W/B-Wert die Karbonatisierungsrate erhöht. Die Unterteilung nach den Betonarten mit und ohne Hüttensand lässt veranschaulichen, dass der mittels k-Wert miteingerechnete Hüttensand zwar den W/B-Wert senkt, aber im Vergleich zu den anderen Betonen der Widerstand geringer ist. Eine ähnliche Beobachtung ist ebenfalls in [24] & [33] zu erkennen, sie zeigen, dass Betone (W/B-Wert = konst.) mit unterschiedlichen Zusammensetzungen des Bindemittels zu unterschiedlichen Karbonatisierungswiderständen führen. Bemerkenswert ist, dass Betone mit konstantem W/B-Wert = 0,53 sehr unterschiedliche K_{ACC} aufweisen können.

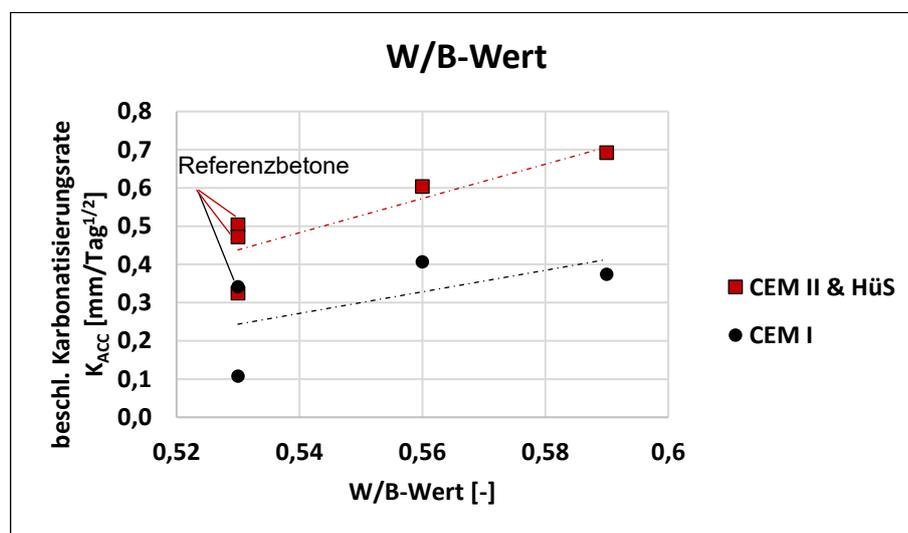


Abbildung 27 W/B-Wert - K_{ACC}

Auch der Bindemittelgehalt ist ebenfalls ein Einteilungskriterium für die Expositionsklassen. In der Abbildung 28 wird dieser in Bezug auf die beschleunigte Karbonatisierungsrate aufgetragen. Im Vergleich zum W/B-Wert gibt es hier keinen Zusammenhang dieser beiden Kenngrößen. Es scheint, dass die Menge des Bindemittels keinen direkten Einfluss auf die Karbonatisierung hat.

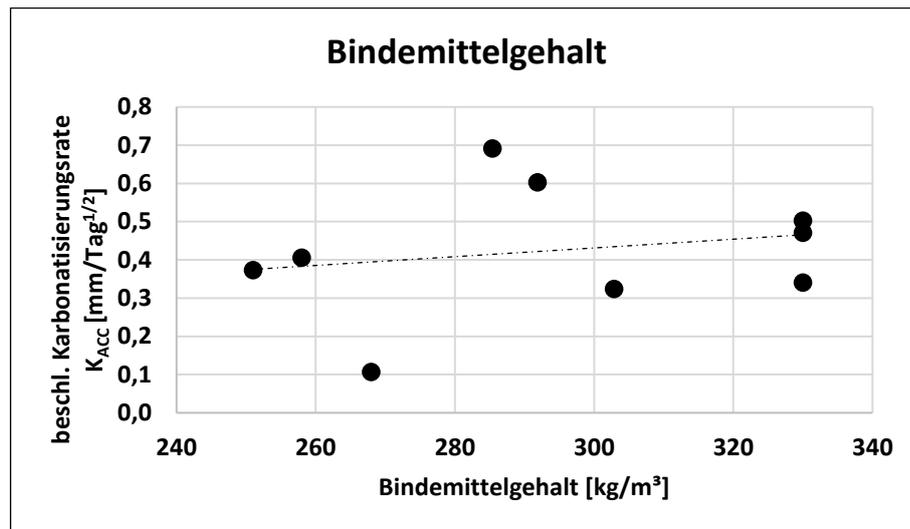


Abbildung 28 Bindemittelgehalt - K_{AAC}

Da die in der Norm vorgeschriebenen Parameter W/B-Wert und Bindemittelgehalt geführten Einteilungs-Kriterien keine eindeutigen Korrelationen mit K_{ACC} aufweisen, werden nun andere Parameter bzw. Kenngrößen untersucht. Als erstes werden die zwei Referenzbetone der Phase A miteinander verglichen. Da der Unterschied dieser beiden Betone alleine im Klinkergehalt bzw. im dazugehörigen W/K-Wert liegt. Dieser Vergleich wird in der Abbildung 29 & Abbildung 30 gezeigt. Die Abbildungen lassen eine nun eindeutige Aussage zu. Sinkt der Klinkergehalt und steigt somit der W/K-Wert, so hat das eine Reduktion des Karbonatisierungswiderstandes zufolge.

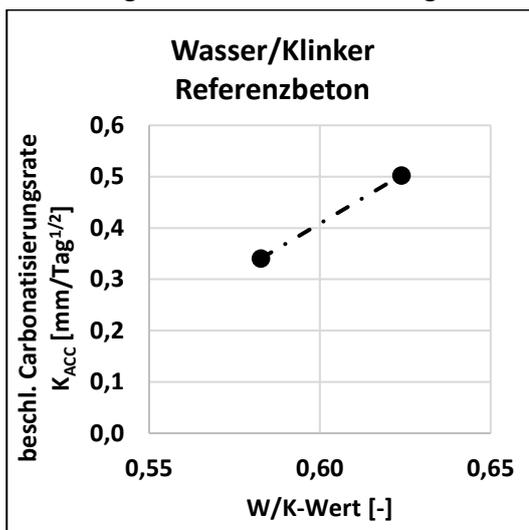


Abbildung 29 W/CaO-Wert - K_{AAC} (Referenzbetone Phase A)

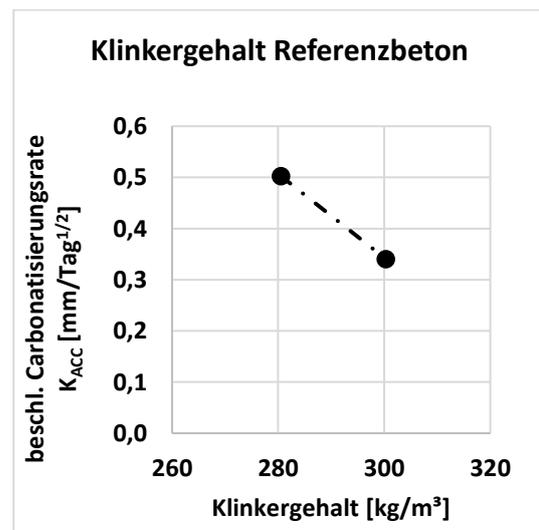


Abbildung 30 Klinkergehalt - K_{AAC} (Referenzbetone Phase A)

Legt man diese Erkenntnis nun auf alle untersuchten Betone um, so ergibt sich die Abbildung 32. In dieser ist nun der eindeutige Einfluss des Wasser/Klinker-Verhältnisses für alle Betone zu sehen. Die Korrelation ($R^2=0,54$) zeigt, dass mit steigendem W/K-Wert die Karbonatisierungsrate ebenfalls steigt. Entfernt man den Referenzbeton R_0,53_CEM II 42,5 R (Rot), welcher ein höheres Leimvolumen aufweist) so erhält man eine Korrelation von $R^2 = 0,59$.

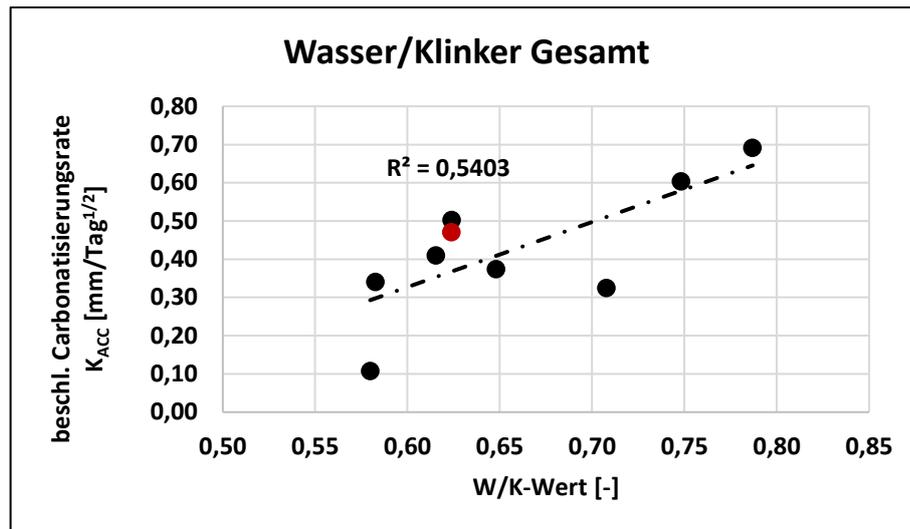


Abbildung 31 W/K-Wert - K_{AAC} (alle Betone)

Die alleinige Betrachtung der Ökobetone zeigt ebenfalls eine sehr gute Korrelation von $R^2 = 0,76$. Die Korrelation ohne den möglichen Ausreißer (rot eingekreist) beträgt ist noch größer ($R^2 = 0,88$)

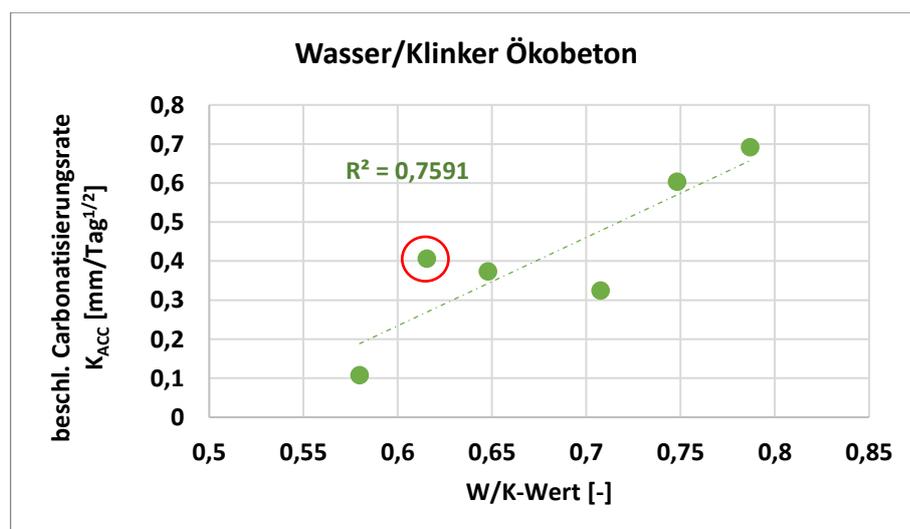


Abbildung 32 W/K-Wert - K_{AAC} (Ökobetone)

Der Klinkergehalt aller Betone zeigt, dass zwar keine allgemeine Korrelation zur Karbonatisierungsrate besteht, jedoch der vorhin gezeigte Trend vorhanden ist. Sieht man von den Referenzbetonen (Schwarz eingefärbt) ab, ist eine Korrelation vorhanden. Die graue gestrichelte Linie zeigt die Trendlinie über alle Betone. Die explizite Darstellung der Ökobetone besitzt eine sehr starke Korrelation ($R^2=0,88$).

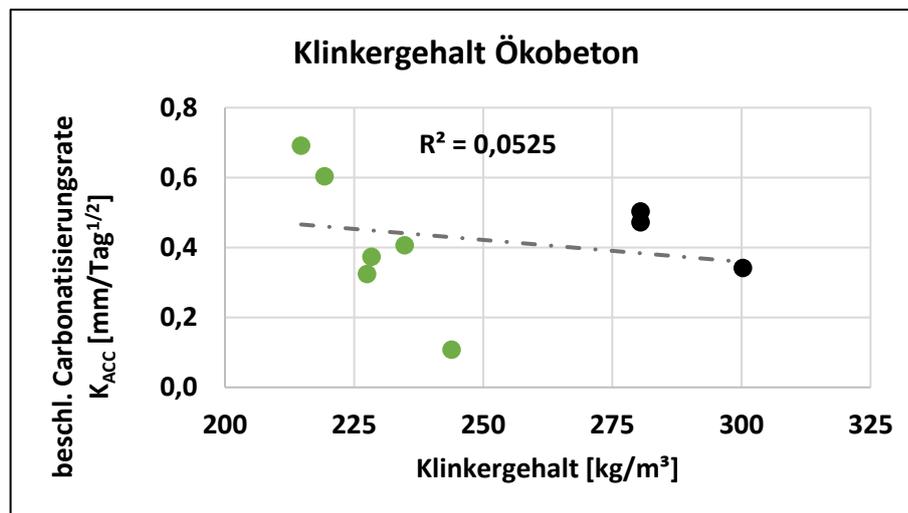


Abbildung 33 Klinkergehalt - K_{AAC} (alle Betone)

Der in [24] angesprochene $W/CaO_{reactive}$ -Wert wird in Abbildung 34 dargestellt. Im $CaO_{reactive}$ wird sowohl der CaO Anteil des Klinkers als auch der con hydraulisch wirksamen Zusatzstoffe miteingerechnet. Wie bei Leemann, ergibt sich auch hier eine starke Korrelation ($R^2 = 0,71$) zur Karbonatisierungsrate. Ohne Berücksichtigung der Referenzbetone, also nur Ökobetone(Grün), ergibt sich eine Korrelation von $R^2 = 0,89$.

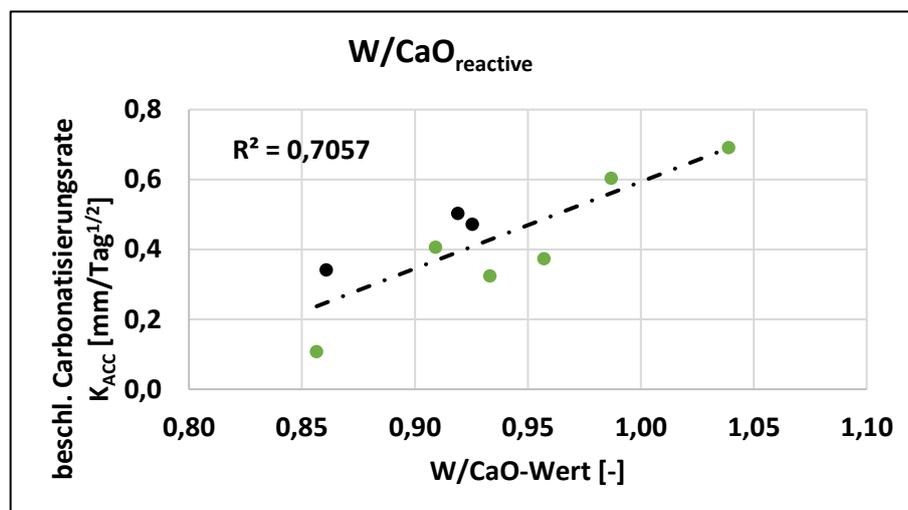


Abbildung 34 $W/CaO_{reactive}$ - K_{ACC}

Die Abbildung 35 zeigt nun den Zusammenhang zwischen der Karbonatisierung und dem W/P_V -Wert. Abgesehen von den beiden Referenzbetonen der Phase A (rot eingrahmt) lässt sich eine Verbesserung durch das Senken des W/P_V -Wertes erkennen.

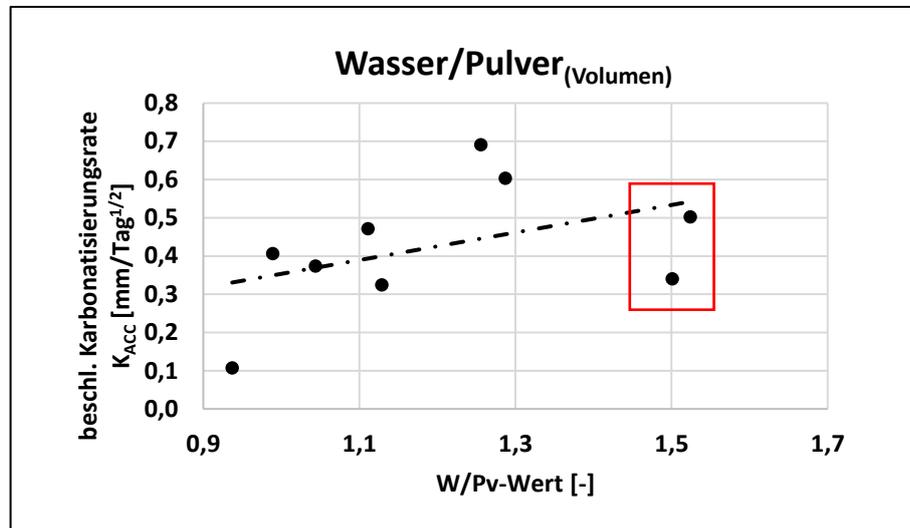


Abbildung 35 W/P_V -Wert - K_{AAC}

Es scheint, dass die Packungsdichte Optimierung sowie die Klinkerreduktion (CaO-reduktion) das Verhalten maßgeblich ändern. Eine Betrachtung der Ökobetonen alleine in Abbildung 36 zeigt eine klare Tendenz. Auffällig ist auch, dass das Bestimmtheitsmaß ($R^2 = 0,75$) und die Verteilung der einzelnen Betone sehr stark dem des W/K -Wertes in Abbildung 32 gleicht.

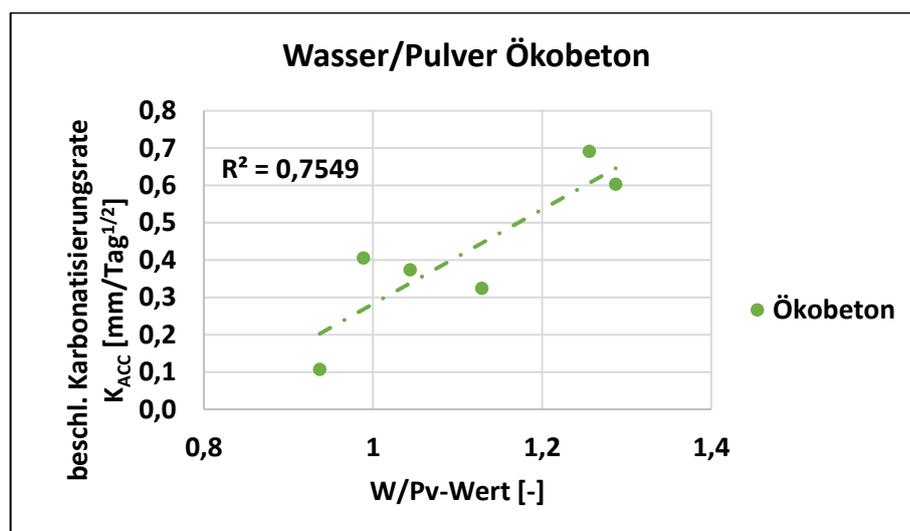


Abbildung 36 W/P_V -Wert - K_{AAC} (Ökobeton)

Eine weitere Unterteilung in Ökobetonen mit und ohne HÜS zeigen die Abbildung 37 & Abbildung 38. Hier lässt sich eine Staffelung erkennen. Dieses Verhalten tritt ebenfalls schon bei der Gegenüberstellung mit dem Wasser/Klinker-Wert auf. Die Verlängerung der Trendlinie der HÜS-freien Betone (Grau) zeigt, dass die Betone, welche HÜS enthalten, viel besser abschneiden und den Kennwerten entsprechend höher liegen müssten. Die Herkunft dieser Staffelung könnte dem hydraulischen Anteil des HÜS zugeschrieben werden. Der verwendete Hütensand und das darin enthaltene CaO trägt somit ebenfalls zu einem gewissen Teil zur chemischen Resistenz bei, oder verdichtet das Gefüge entsprechend.

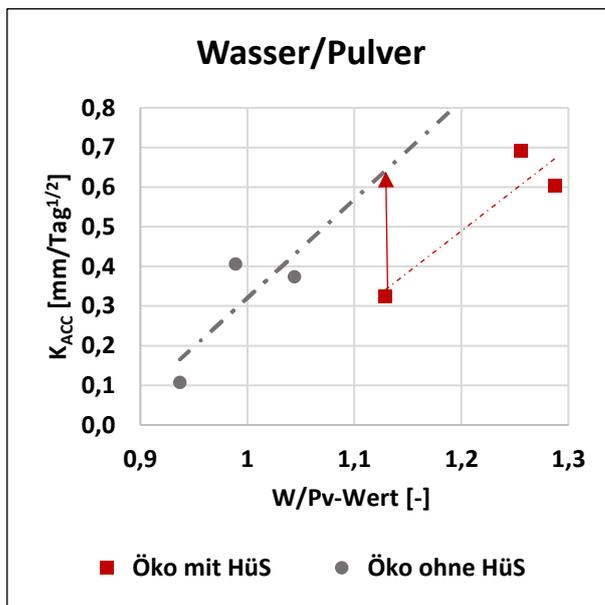


Abbildung 37 W/P_V-Wert - K_{AAC} (Ökobeton)

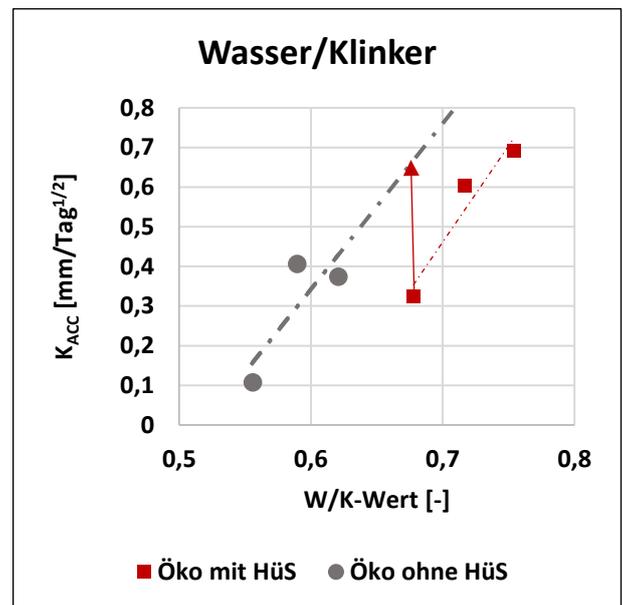


Abbildung 38 W/K-Wert - K_{AAC} (Ökobeton)

4.3 Multiple Korrelation

Weiters wurde eine multiple Korrelation durchgeführt. Für die Korrelation sind nun der Referenzbeton R_0,53_CEM II A 42,5 R (Rot) und der Ökobeton O_0,56_CEM I_KSM (Grün) ausgenommen worden. Das Ausschließen des Referenzbetons ist mit dem des höheren Leimvolumen und dem Zement mit niedrigerer Festigkeit begründet. Der Ökobeton ist aufgrund der außerordentlichen Karbonatisierungsrate (K_{ACC} von $W/B = 0,56$ ist größer als $W/B = 0,59$) ausgeschlossen worden. Die Abbildung 39 zeigt die multiple Korrelation mit einer linearen Funktion. Die Funktion f_{cor} ist eine Summenfunktion. Dabei werden jeweils die Verhältnisse von den wesentlichen Rezepturkennwerten herangezogen

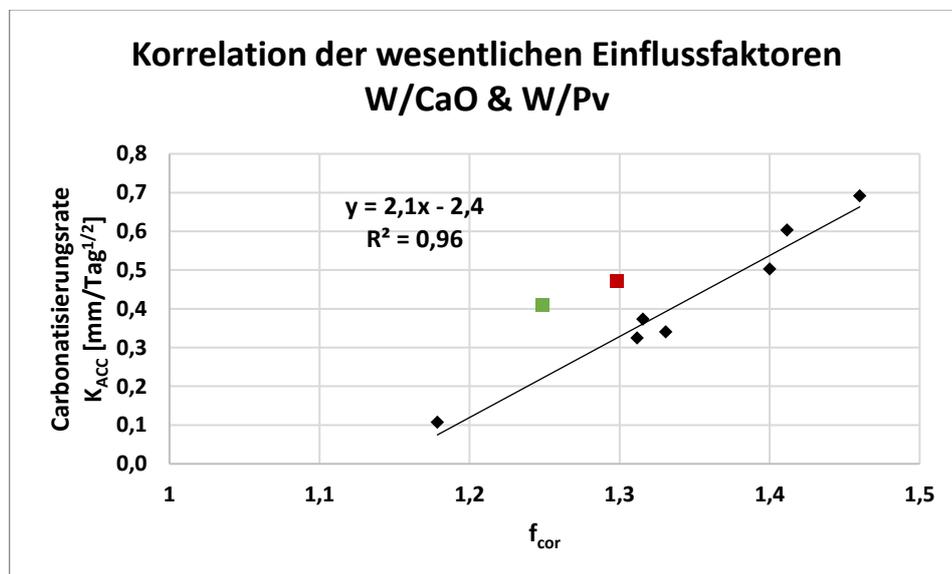


Abbildung 39 multiple exponentielle Korrelation

$$f_{cor} = \left(a \cdot \frac{\frac{W}{CaO_i}}{\frac{W}{CaO_{ref}}} + b \cdot \frac{\frac{W}{P_{V_i}}}{\frac{W}{P_{V_{ref}}}} \right) \quad \text{Glg. (8)}$$

W/CaO_i Wasser/Calciumoxid-Wert aller weiteren Betone

W/CaO_{ref} Wasser/Calciumoxid-Wert des Referenzbetons

W/P_{V_i} Wasser/Pulver-Wert aller weiteren Betone

$W/P_{V,ref}$ Wasser/Pulver-Wert des Referenzbetons

a Gewichtungsfaktor für $CaO = 1,0$

b Gewichtungsfaktor für $W/P_V = 0,4$

Eine ähnliche Funktion wird am Institut bereits benutzt, um die Betondruckfestigkeit eines Ökobetons anhand eines Referenzbetons abschätzen zu können [2]. Das Bestimmtheitsmaß liegt in diesem Fall bei ($R^2 = 0,96$). Nicht nur ein linearer Verlauf wurde untersucht, eine exponentielle Funktion würde zu einer Bestimmtheit von 0,95 führen.

4.4 Korrelation mit den Festbetonprüfungen

4.4.1 Korrelation mit der Betondruckfestigkeit

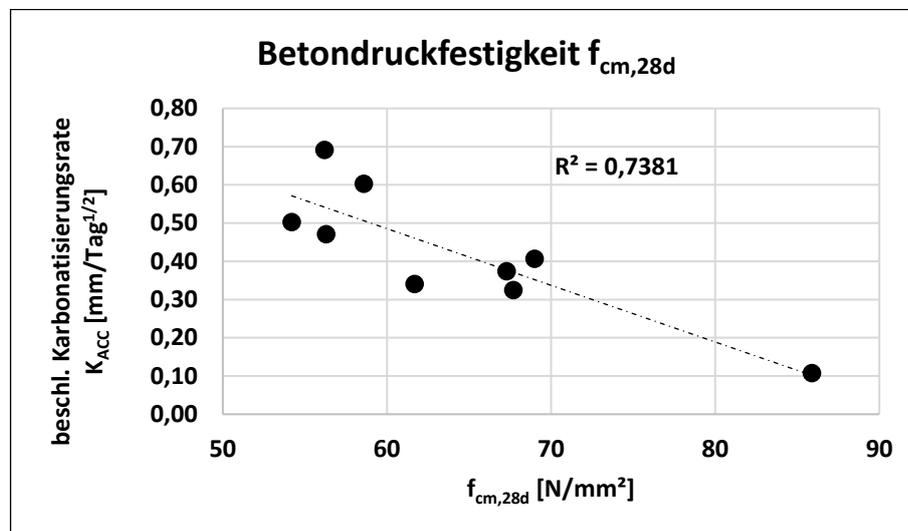


Abbildung 40 Betondruckfestigkeit - K_{ACC}

Die Betondruckfestigkeit zeigt, wie auch in der Literatur oft erwähnt [17],[21], eine sehr gute Korrelation mit dem Karbonatisierungswiderstand. Überträgt man diese Erkenntnis in die Praxis der Betonentwicklung, so kann man sehr gut den Karbonatisierungswiderstand abschätzen, sobald man eine dementsprechende Betondruckfestigkeit erreicht. Die Korrelation beträgt für die untersuchten Betone $R^2 = 0,74$, siehe Abbildung 40.

4.4.2 Korrelation mit Dauerhaftigkeitsprüfungen

In den nachstehenden Abbildungen sind die Vergleiche der Karbonatisierungsrate mit weiteren Prüfungsergebnissen von Dauerhaftigkeits-Indikatoren dargestellt. Die Vergleiche lassen keine klaren Abhängigkeiten erkennen, dennoch müssten im Allgemeinen geringere Porosität und geringere Wassereindringtiefen zu geringerer Karbonatisierung führen.

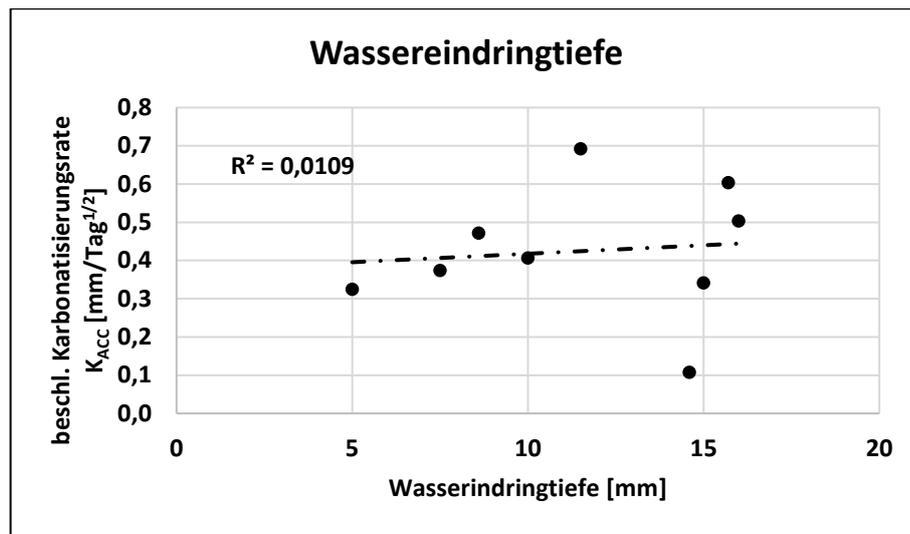


Abbildung 41 Wassereindringtiefe – K_{ACC}

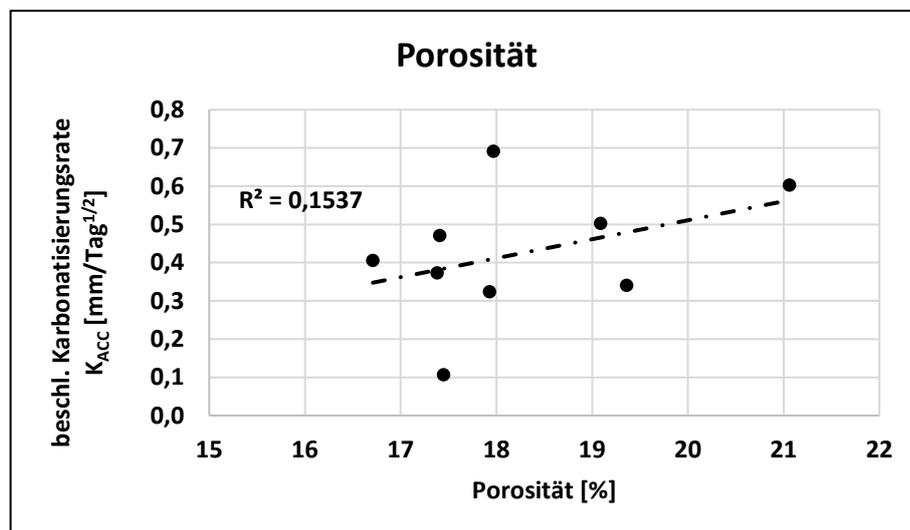


Abbildung 42 Porosität – K_{ACC}

4.5 Zusammenfassende Diskussion

Anhand der folgenden Abbildung erkennt man, dass der Beton O_0,56_CEM I_KSM bei den Versuchen schlechter abschneidet als angenommen. Nach dem W/B-wert und den anderen Rezepturparametern müssten der Karbonatisierungswiderstand höher sein als der des O_0,59_CEM I_KSM. Die Herkunft und die Richtigkeit dieses Verhaltens kann somit nicht bestätigt werden. Eine erneute Überprüfung des Betons könnte Aufschluss ergeben.

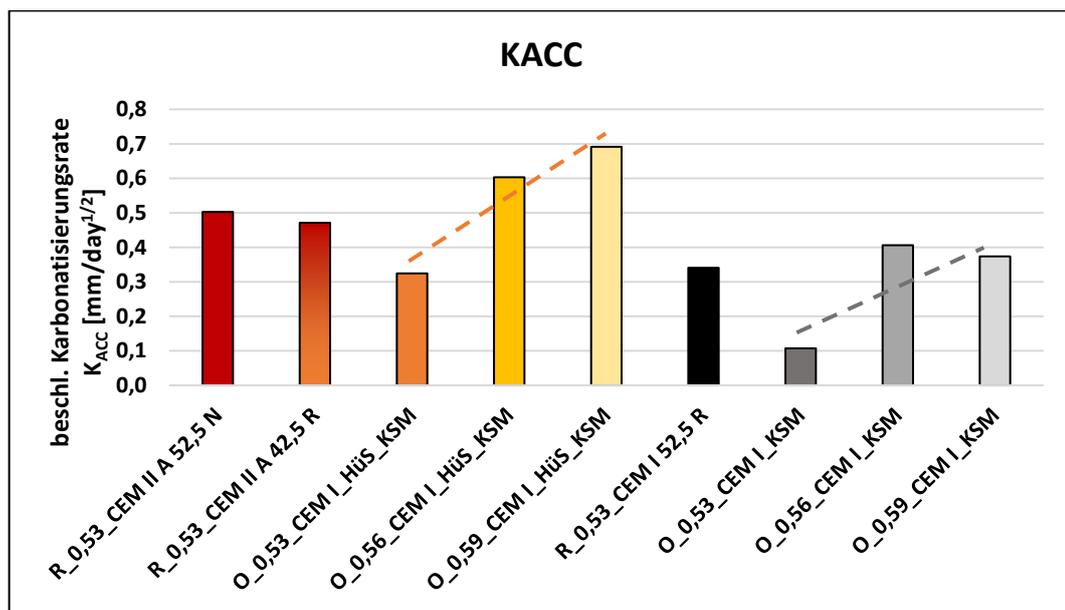


Abbildung 43 Karbonatisierungsrate K_{ACC}

Diese Hypothese wird nun durch weitere Vergleiche untersucht bzw. bestätigt. Die Abbildung 44 zeigt, dass der Beton O_0,56_CEM I_KSM bei allen wesentlichen Rezepturkennwerten in der Mitte liegt, jedoch den geringsten Karbonatisierungswiderstand aufweist.

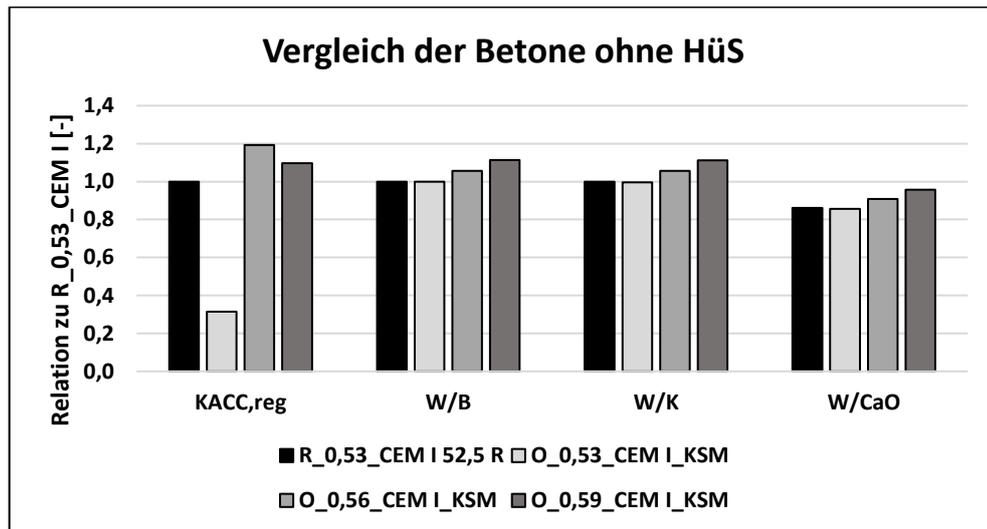


Abbildung 44 Vergleich der Betone ohne HüS

Der Vergleich von Referenzbeton R_0,53_CEM I 52,5 R mit dem Ökobeton O_0,53_CEM I_KSM zeigt zwei Betone, ohne Hüttensand, die den gleichen W/B-Wert und den gleichen W/K-Wert besitzen. Anhand dieser konstanten Eigenschaften lässt sich sehr gut erkennen, dass der Ökobeton trotz geringerem Klinkergehalt durch den positiven Effekt der erhöhten Packungsdichte und dem niedrigeren Wasser/Pulver-Wertes einen höheren Karbonatisierungswiderstand aufweist.

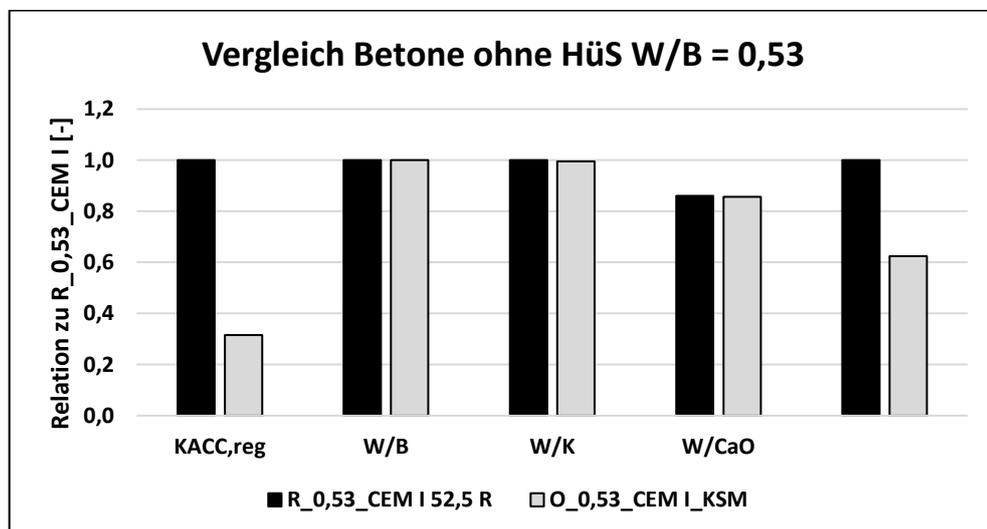


Abbildung 45 Vergleich der Betone ohne HüS (W/B=0,53)

Kommen wir nun zu den Vergleichen der Betone mit Hüttensand. In der Abbildung 46 kann man sehr gut die Abstufung des Karbonatisierungswiderstandes der Ökobetone und die dazugehörige Abstufung des W/K-Wertes sowie des W/CaO-Wertes erkennen.

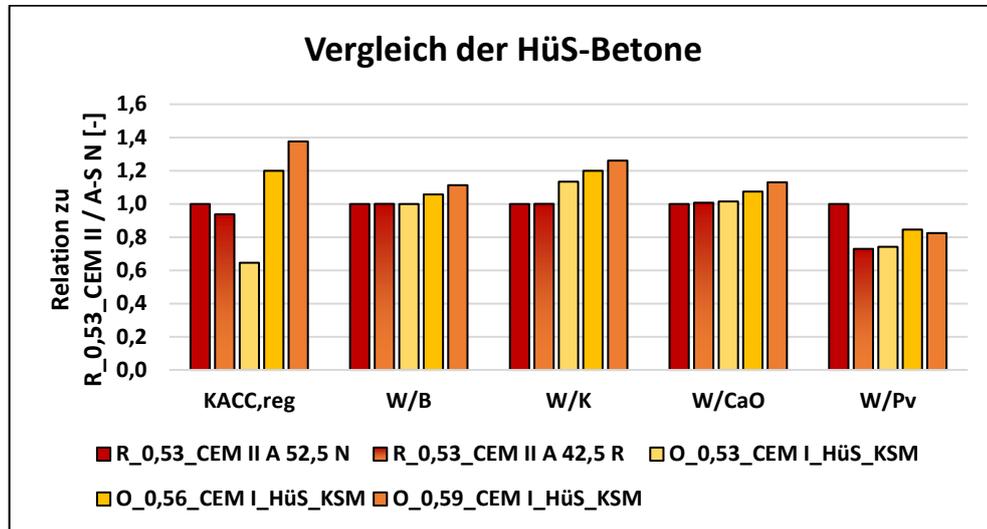


Abbildung 46 Vergleich der Betone mit Hüs

Die Abbildung 47 zeigt die Betone mit Hüttensand, welche einen W/B-Wert von 0,53 besitzen. In dieser Abbildung kann man anhand des Vergleiches von R_0,53_CEM II A_52,5 N mit dem Ökobeton O_0,53_CEM I_HüS_KSM sehr gut erkennen, welche positiven Auswirkungen der niedrigere W/P_v-Wert auf die Karbonatisierung hat. Der Vergleich der beiden Referenzbetone zeigt, dass der Referenzbeton R_0,53_CEM II A_42,5 R trotz Zement mit kleinerer Festigkeit durch den niedrigeren W/P_v-Wert ebenfalls eine etwas höhere Resistenz gegenüber Karbonatisierung aufweist.

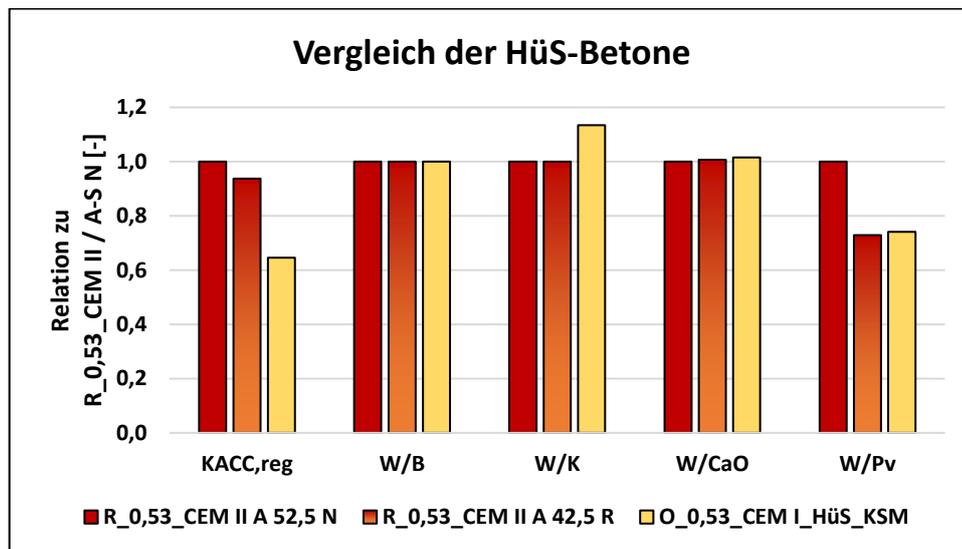


Abbildung 47 Vergleich der Betone mit HüS (W/B=0,53)

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Es wurden Referenzbetone nach Norm und Ökobetone mit einer gezielten Variation des W/B-Wertes und ihrer Zusammensetzung hinsichtlich ihres Karbonatisierungswiderstand bei beschleunigter Prüfung nach dem Verfahren ACC nach MC 2010 [11] untersucht. Dabei wurde das Leimvolumen konstant gehalten, um diesen Einfluss eliminieren zu können. Die entwickelten und geprüften Betone lassen sich in zwei Gruppen unterteilen. Die erste Gruppe enthalten Hüttensand als hydraulisch wirksames Bindemittel. Die zweite Gruppe enthält als Bindemittel nur Zemente. Der Überblick aller Karbonatisierungswiderstände K_{ACC} in Abbildung 43 zeigt, dass sich trotz gleichen W/B-Wertes, deutliche Unterschiede in den Widerständen zeigen. Somit ist der W/B-Wert nicht der dominante Faktor hinsichtlich Karbonatisierung der Ökobetone. Nun lassen sich die Auswirkungen von verschiedenen Zementen, anhand der beiden Referenzbetone mit konstanten Rezepturparametern, erkennen. Die Abbildung 29 & Abbildung 30 zeigen, dass der geringere Klinkergehalt von CEM II / A-S 52,5 N (~85% Klinker) gegenüber dem CEM I 52,5 R (~91% Klinker) eine Verringerung des Karbonatisierungswiderstandes zufolge hat. Der W/CaO-Wert scheint, wie die Korrelation von $R^2 = 0,71$ der Abbildung 34 Abbildung 31 zeigt, der dominante Rezepturkennwert für die Karbonatisierung zu sein. In Abbildung 37 & Abbildung 38 wird der Einfluss von Hüttensand ersichtlich. Zusätzlich lassen die Vergleiche in Kapitel 4.5, sowie die Abbildung 36 erkennen, dass der W/P_v-Wert ebenfalls eine Rolle spielt. Diese Erkenntnisse zeigen nun, dass die Einteilung über den W/B-Wert ohne Berücksichtigung der beiden anderen Faktoren für Ökobetone nicht mehr ausreichend ist.

Somit kann der Karbonatisierungswiderstand wie im Kapitel 4.3 gezeigt, sehr gut durch den W/CaO und dem W/P_v-Wert beschrieben werden. Letztlich zeigen die Ergebnisse sehr gut, welcher Rezepturparameter positive und negative Auswirkungen hat. Jedoch sind weitere Einflussfaktoren auf den Karbonatisierungswiderstand wie das Leimvolumen und der Luftporengehalt zu Berücksichtigen.

Ökobetone für Fertigteile zeigen bei entsprechend niedrigem W/CaO-Wert und W/P_v-Wert einen gleichwertigen Karbonatisierungswiderstand wie Referenzbetone nach ÖNORM B4710-1 [5]. Sie sind nach dem Konzept ECPC dem Standardbeton in funktioneller Hinsicht (Verarbeitbarkeit und Festigkeit) gleichwertig,

hinsichtlich auf dem Karbonatisierungswiderstand gleichwertig und hinsichtlich ihrer Umweltauswirkung oder ökologischen Performance (GWP & PEI) sogar besser als der Referenzbeton nach Norm.

Die Unterschiede im Karbonatisierungswiderstand von den drei normgerechten Referenzbetonen zeigen, dass es abhängig von der Zement- und Zusatzstoffen auch bei gleichem W/B-Wert und gleicher Funktionalität deutliche Unterschiede in der Dauerhaftigkeit geben kann. Ökobetone, bei welche der W/B-Wert den in der Norm für die Klasse XC3 erforderliche Wert von 0,53 (=0,55-Vorhaltemaß 0,02) deutlich übersteigt (0,59) erreichen keinen ausreichenden Widerstand, während Betone mit W/B-Wert = 0,56 in der Regel gleichwertig sind, wenn der W/P_V-Wert von 1,5 auf 1,0 gesenkt werden kann.

In der Arbeit wurden Karbonatisierungswiderstände mit einem beschleunigten Verfahren in einem CO₂-Schrank (2% CO₂, 65% rel. LF, 20°C) bestimmt. Das entspricht eine rund 50-fach höhere CO₂-Konzentration als unter natürlichen Bedingungen. Nach Hunkeler [15] können die ermittelten Karbonatisierungswiderstände K_{ACC} auf natürliche Karbonatisierungswiderstände K_{NAC} umgerechnet werden ($f = 6,2$). Somit lässt sich mit dem Wurzel-Zeit Gesetz für die Karbonatisierung die Karbonatisierungstiefe in einer bestimmten Dauer abschätzen und eine Lebensdauerabschätzung treffen. Gemäß EC2 [10] darf die maximale Karbonatisierungstiefe nach z.B. 50 Jahren für die Expositionsklasse XC3, Anforderungsklasse S4 nicht größer als 25 mm sein, um unter der vorgeschriebenen Betondeckung zu bleiben. Dies gelingt praktisch mit allen untersuchten Betonen. Allerdings ist offen, ob zusätzliche Sicherheiten berücksichtigt werden sollten.

Literaturverzeichnis

- [1] T. Proske, S. Hainer, M. Jakob, H. Garrecht, und C. A. Graubner, „Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton: Technische Innovation zur Realisierung nachhaltiger Betonbauwerke“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 107, Nr. 6, S. 401–413, 2012.
- [2] J. Juhart, G. David, C. Nickel, G. Fischer, und F. Mittermayr, „Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturenentwicklung“, 2.Grazer Betonkolloquiums, S. 9–24, 2014.
- [3] Zement+Beton Handels- und Werbeges.m.b.h: „Zementerzeugung in Österreich“, Auflage 4, 2012, Online: http://www.zement.at/downloads/zement_broschuere_web.pdf vom 24.05.2017
- [4] Dinger, D. R., „Particle Packing and Pore Size Distributions Ceramic Processing E-zine“ by Dinger Ceramic Consulting Services, vol. 1, Nr. 9, 2003. Online: <http://www.dingerceramics.com/CeramicProcessingE-zine> vom 04.08.2014,
- [5] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM B 4710-1 Beton: Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis“, 2007.
- [6] J. Juhart, C. Baldermann, G. A. David, G. Fischer, A. Passer, „Neue Betone für den Infrastruktur-Bereich. Energie- und Ressourcenoptimiert“, 2015
- [7] J. Stark und B. Wicht, „Kenngößen und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Beton“, *Dauerhaftigkeit von Beton*, S. 1-24 2013.
- [8] J. Stark und B. Wicht, „Kenngößen und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Beton“, *Dauerhaftigkeit von Beton*, Bd. 74, Nr. 10. S. 103-160 . 2008.
- [9] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM EN 206 Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“, 2014.
- [10] ON Österreichisches Normungsinstitut, *ÖNORM EN 1992-1-1 :Eurocode 2: Bemessung von Stahlbeton und Spannbetontragwerke – Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*, 2009
- [11] fédération internationale du béton (fib), „Model-Code for Service Life Design“, fib bulletin Bd. 34, 2006
- [12] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM CEN/TS 12390-10: Prüfung von Festbeton, Teil 10: Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes von Beton“, 2008.
- [13] V. L. Ta, S. Bonnet, T. S. Kiese, A. Ventura, „A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures“, *Construction and Building Materials*, Bd. 129, S. 172-181, 2016
- [14] S. M. von Greve-Dierfeld, „Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile“, 2015.
- [15] F. Hunkeler und T. F. B. Ag, „Swiss requirements for the carbonation resistance of concrete for the exposure XC3 , XC4 and XD1“, *9th International Concrete Conference 4-6 July 2016 Dundee, Scotland*, 2016
- [16] S. Von Greve-dierfeld und C. Gehlen, „Performance-based durability design , carbonation part 2 – Classification of concrete“, Nr. 4, S. 523–532, 2016.

- [17] A. A. Elgalhud, G. s. Ghataora, R. K. Dhir, „Carbonation resistance of concrete : limestone addition effect“, *Magazine of Concrete Research*, Bd. 69, Nr. 2, 2017.
- [18] M. Gesoğlu, E. Güneyisi, und E. Özbay, „Properties of self-compacting concretes made with binary, ternary, and quaternary cementitious blends of fly ash, blast furnace slag, and silica fume“, *Construction and Building Materials*, Bd. 23, Nr. 5, S. 1847–1854, 2009.
- [19] P. H. R. Borges, N. B. Milestone, J. O. Costa, C. J. Lynsdale, T. H. Panzera, und A. L. Christophoro, „Carbonation durability of blended cement pastes used for waste encapsulation“, *Materials and Structures*, Bd. 45, Nr. 5, S. 663–678, 2012.
- [20] S. Sadati, F. Ghassemzadeh, und M. Shekarchi, „Effect of silica fume on carbonation of reinforced concrete structures in Persian Gulf region“, *6th International Conference on Concrete under Severe Conditions, CONSEC'10*, Bd. 2, Nr. Cmi, S. 1529–1534, 2010.
- [21] N. Singh und S. P. Singh, „Carbonation resistance and microstructural analysis of Low and High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete containing Recycled Concrete Aggregates“, *Construction and Building Materials*, Bd. 127, S. 828–842, 2016.
- [22] E. Badogiannis und S. Tsvilis, „Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete“, *Cement & Concrete Composites*, Bd. 31, Nr. 2, S. 128–133, 2009.
- [23] Q. T. Phung *u.a.*, „Effect of limestone fillers on microstructure and permeability due to carbonation of cement pastes under controlled CO₂ pressure conditions“, *Construction and Building Materials*, Bd. 82, S. 376–390, 2015.
- [24] A. Leemann, P. Nygaard, J. Kaufmann, und R. Loser, „Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete“, *Cem. Concr. Compos.*, Bd. 62, S. 33–43, 2015.
- [25] V. T. Ngala und C. L. Page, „Effects of Carbonation on Pore Structure and Diffusional Properties of Hydrated Cement Pastes“, *Cement and Concrete Research*, Bd. 27, Nr. 7, S. 995–1007, 1997.
- [26] A. Leemann und F. Moro, „Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity“, *Mater. Struct.*, Bd. 50, Nr. 1, S. 2–14, 2017.
- [27] F. Jacobs, „Luftpermeabilität als Kenngrösse für die Qualität des Überdeckungsbetons von Betonbauwerken“, Forschungsprojekt, 2006.
- [28] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM EN 13295, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands, 2004.
- [29] H. W. Song und S. J. Kwon, „Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure“, *Cement and Concrete Research*, Bd. 37, Nr. 6, S. 909–915, 2007.
- [30] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz, Grundsätze und Rahmenbedingungen“, 2006.
- [31] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM EN 12390-8, Prüfung von Festbeton Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck“, 2009.
- [32] ON Österreichisches Normungsinstitut, „ÖNORM EN 1936, Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“, 2007

- [33] A. Younsi, P. Turcry, E. Rozière, A. Aït-Mokhtar, A. Loukili, „Performance-based design and carbonation of concrete with high fly ash content“, *Cement and Concrete Composites*, Bd. 33, S. 993-1000, 2011
- [34] M. Castellote, L. Fernandez, C. Andrade, und C. Alonso, „Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO₂ concentrations“, *Materials and Structures.*, Bd. 42, Nr. 4, S. 515–525, 2009.
- [35] I. Marquardt, „Ein Mischungskonzept für selbstverdichtenden Beton auf der Basis der Volumenkenngößen und Wasseransprüche der Ausgangsstoffe“, Dissertation, Rostocker Berichte aus dem Fachbereich Bauingenieurwesen, Nr. 7, 2002

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Einfluss auf die Karbonatisierung durch betontechnologische Modifikation	19
Abbildung 2 Unterschied Karbonatisierung verschiedener Zemente [24].....	20
Abbildung 3 Zusammenhang Porosität mit W/B-Wert [25]	20
Abbildung 4 Korrelation Karbonatisierungsrate mit Betondruckfestigkeit [21]	21
Abbildung 5 Korrelation Karbonatisierungsrate mit W/CaO_{reactive} [24]	22
Abbildung 6 Zusammenhang Karbonatisierungsfortschritt Luftbermeabilität [29]	27
Abbildung 7 Veränderter Wasserfluss unter Carbonatisierten Bedingungen [29]	28
Abbildung 8 Versuchslagerung im CO_2 - Schrank	30
Abbildung 9 Messung mittels Indikatorlösung.....	32
Abbildung 10 Performance-Vergleich der Betoneigenschaften	39
Abbildung 11 Performance-Vergleich GWP (Global Warming Potential) mit HüS	40
Abbildung 12 Performance-Vergleich GWP (Global Warming Potential) ohne HüS	40
Abbildung 13 Performance-Vergleich mit PEI (Primär-Energiebedarf) mit HüS.....	41
Abbildung 14 Performance-Vergleich mit PEI (Primär-Energiebedarf) ohne HüS	41
Abbildung 15 Vergleich der Auswertungsverfahren.....	43
Abbildung 16 Karbonisierungstiefen (mit HüS)	44
Abbildung 17 Karbonisierungstiefe gegen Wurzel-Zeit.....	44
Abbildung 18 Karbonisierungstiefe CEM I gegen Wurzel-Zeit.....	45
Abbildung 19 Karbonisierungstiefe HüS gegen Wurzel-Zeit.....	45
Abbildung 20 Regressionsgerade nach Wurzel-Zeit (ohne HüS)	47
Abbildung 21 Regressionsgerade nach Wurzel-Zeit (mit HüS)	47
Abbildung 22 K_{ACC} (Phase A mit HüS).....	48
Abbildung 23 K_{ACC} (Phase A ohne HüS).....	48
Abbildung 24 $K_{ACC,i}$ der verschiedenen Messverfahren	49
Abbildung 25 vereinfachter charakteristischer Nachweis der Betonüberdeckung auf 50 Jahre	53
Abbildung 26 Design Nachweis der Betonüberdeckung auf 50 Jahre.....	54
Abbildung 27 W/B-Wert - K_{AAC}	55
Abbildung 28 Bindemittelgehalt - K_{AAC}	56

Abbildung 29 W/CaO-Wert - K_{AAC} (Referenzbetone Phase A)	56
Abbildung 30 Klinkergehalt - K_{AAC} (Referenzbetone Phase A)	56
Abbildung 31 W/K-Wert - K_{AAC} (alle Betone).....	57
Abbildung 32 W/K-Wert - K_{AAC} (Ökobetone)	57
Abbildung 33 Klinkergehalt - K_{AAC} (alle Betone)	58
Abbildung 34 W/CaO _{reactive} – K_{ACC}	58
Abbildung 35 W/P _V -Wert - K_{AAC}	59
Abbildung 36 W/P _V -Wert - K_{AAC} (Ökobeton).....	59
Abbildung 37 W/P _V -Wert - K_{AAC} (Ökobeton).....	60
Abbildung 38 W/K-Wert - K_{AAC} (Ökobeton)	60
Abbildung 39 multiple exponentielle Korrelation	61
Abbildung 40 Betondruckfestigkeit - K_{ACC}	62
Abbildung 41 Wassereindringtiefe – K_{ACC}	63
Abbildung 42 Porosität – K_{ACC}	63
Abbildung 43 Karbonatisierungsrate K_{ACC}	64
Abbildung 44 Vergleich der Betone ohne HüS	65
Abbildung 45 Vergleich der Betone ohne HüS (W/B=0,53)	65
Abbildung 46 Vergleich der Betone mit HüS.....	66
Abbildung 47 Vergleich der Betone mit HüS (W/B=0,53)	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 festgelegte Grenzwerte für die Expositionsklasse XC laut [9]	14
Tabelle 2 physikalische Randbedingungen der beschleunigten Karbonatisierung	31
Tabelle 3 Rezepturkennwerte 1	34
Tabelle 4 Stoffeigenschaften.....	35
Tabelle 5 Rezepturkennwerte 2	35
Tabelle 6 Rezepturkennwerte 3	36
Tabelle 7 ökologische Rezepturparameter	37
Tabelle 8 Ausbreitmaß & Festigkeiten	37
Tabelle 9 Festbetoneigenschaften / Dauerhaftigkeit.....	38
Tabelle 10 Mittelwert und Standardabweichung der Messverfahren (56d)	42
Tabelle 11 mittlere Karbonatisierungstiefe nach Versuchstage.....	43
Tabelle 12 beschleunigte Karbonatisierungsraten	46
Tabelle 13 natürliche Karbonatisierungsraten	50
Tabelle 14 Mindestbetonüberdeckung laut Eurocode 2: EN 1992-1-1 [10].....	51
Tabelle 15 errechnete Karbonatisierungstiefe $x_{c(t)}$	52

Abkürzungsverzeichnis

AHWZ	Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe
HüS	Hüttensand
KSM	Kalksteinmehl
W/Z-Wert	Massenverhältnis zwischen Wasser und Zement
W/B-Wert	Massenverhältnis zwischen Wasser und Bindemittel
W/P _m -Wert	Massenverhältnis zwischen Wasser und Pulver
W/P _v -Wert	Volumsverhältnis zwischen Wasser und Pulver
W/K-Wert	Massenverhältnis zwischen Wasser und Klinker
W/CaO _{reactive}	Massenverhältnis zwischen Wasser und vorhandenen Calciumoxid
W/CaO _{reacted}	Massenverhältnis zwischen Wasser und reagierten Calciumoxid
f _{cm,24h}	Betondruckfestigkeit nach 24 Stunden
f _{cm,28d}	Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen
D	Packungsdichte
V _P	Feststoffvolumen (Pulvervolumen)
H _V	Hohlraumvolumen
V _{Ges}	Volumen Gesamt
rel.LF	relative Luftfeuchtigkeit
d _{k,m}	mittlere Karbonatisierungstiefe
X _{c(t)}	errechnete Karbonatisierungstiefe
C _{nom,dur}	Mindestbetondeckung aus Umgebungsbedingungen
K _{ACC}	Koeffizient der beschleunigten Karbonatisierung
K _{ACC,m}	Mittelwert der Koeffizienten der beschleunigten Karbonatisierung
K _{ACC,reg}	Koeffizient der beschleunigten Karbonatisierungsrate aus lin. Regression
K _{NAC}	Koeffizient der errechneten natürlichen Karbonatisierung

Anhang

Datum	10.08.2016	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Ref
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	RB2	R_0,53_CEM II / A-S 52,5 N		45 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,53
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM II / A-S 52,5 N		14,849			330,0
FM 1		0,034			0,7
FM 2		0,034			0,7
Zugabe-Wasser		7,825			173,9
quarzitischer Sand (0/4)		34,346			763,2
quarzitischer Kies (4/8)		16,251			361,1
quarzitischer Kies (8/16)		34,028			756,2
Frischbetonrohddichte		2386	kg/m ³	LP-Gehalt	2,4
Gesamtwasser		174,4	kg/m ³	W/Pm	0,48
Leimvolumen ohne Luft		289,3	l/m ³		

Datum	10.08.2016	Mischung	M2	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Ref
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	RB2	R_0,53_CEM I 52,5 R		45 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,53
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		14,860			330,2
FM 1		0,029			0,6
FM 2		0,029			0,6
Zugabe-Wasser		7,850			174,5
quarzitischer Sand (0/4)		34,229			760,6
quarzitischer Kies (4/8)		16,196			359,9
quarzitischer Kies (8/16)		33,912			753,6
Frischbetonrohddichte		2380	kg/m ³	LP-Gehalt	2,4
Gesamtwasser		174,9	kg/m ³	W/Pm	0,48
Leimvolumen ohne Luft		291,7	l/m ³		

Datum	05.10.2016	Mischung	M1	Betonsorte:	C 40/50 B4 GK 16 F45 (F52)
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	AP9	R_0,53_CEM II / A-S 42,5 R		55 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,53
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM II / A-S 42,5 R		21,5			391,3
FM 1		0,050			0,9
FM 2		0,050			0,9
Zugabe-Wasser		11,3			205,4
Sand (0/4)		43,9			798,2
Kies (4/8)		14,9			271,6
Kies (8/16)		38,9			706,7
Frischbetonrohddichte		2375	kg/m ³	LP-Gehalt	0,8
Gesamtwasser		206,5	kg/m ³	W/Pm	0,40
Leimvolumen ohne Luft		381,2	l/m ³		

Datum	11.08.2015	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	OB2	O_0,53_CEM I_ Hüs_KSM		50 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,53
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		12,519			250,4
Hüttensand		2,644			52,9
Eco-Füller 1_Kalkstein		3,088			61,8
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,420			28,4
FM 1		0,043			0,9
FM 2		0,043			0,9
Zugabe-Wasser		8,020			160,4
quarzitischer Sand (0/4)		37,219			744,4
quarzitischer Kies (4/8)		18,116			362,3
quarzitischer Kies (8/16)		36,626			732,5
Frischbetonrohddichte		2395	kg/m ³	LP-Gehalt	2,4
Gesamtwasser		160,9	kg/m ³	W/Pm	0,41

Datum	09.02.2017	Mischung	M3	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	OB2	O_0,56_CEM I_ HüS_KSM		50 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,56
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		12,045			240,9
Hüttensand		2,544			50,9
Eco-Füller 1_Kalkstein		2,971			59,4
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,366			27,3
FM 1		0,052			1,0
FM 2		0,052			1,0
Zugabe-Wasser		8,176			163,5
quarzitischer Sand (0/4)		37,308			746,2
quarzitischer Kies (4/8)		18,159			363,2
quarzitischer Kies (8/16)		36,713			734,3
Frischbetonrohddichte		2388	kg/m ³	LP-Gehalt	2,4
Gesamtwasser		164,1	kg/m ³	W/Pm	0,43
Leimvolumen ohne Luft		292,4	l/m ³		

Datum	10.08.2016	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	RB2	O_0,59_CEM I_ HüS_KSM		45 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,59
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		10,604			235,6
Hüttensand		2,240			49,8
Eco-Füller 1_Kalkstein		2,616			58,1
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,202			26,7
FM 1		0,027			0,6
FM 2		0,027			0,6
Zugabe-Wasser		7,564			168,1
quarzitischer Sand (0/4)		33,566			745,9
quarzitischer Kies (4/8)		16,338			363,1
quarzitischer Kies (8/16)		33,031			734,0
Frischbetonrohddichte		2383	kg/m ³	LP-Gehalt	2,4
Gesamtwasser		168,5	kg/m ³	W/Pm	0,45
Leimvolumen ohne Luft		293,8	l/m ³		

Datum	09.02.2017	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	OB2	O_0,53_CEM I_ KSM		50 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,53
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		13,390			267,8
Eco-Füller 1_Kalkstein		5,946			118,9
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,416			28,3
FM 1		0,035			0,7
FM 2		0,035			0,7
Zugabe-Wasser		7,050			141,0
quarzitischer Sand (0/4)		37,806			756,1
quarzitischer Kies (4/8)		18,401			368,0
quarzitischer Kies (8/16)		37,203			744,1
Frischbetonrohddichte		2426	kg/m ³	LP-Gehalt	2,5
Gesamtwasser		141,4	kg/m ³	W/Pm	0,32
Leimvolumen ohne Luft		293,0	l/m ³		

Datum	11.08.2015	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	OB2	O_0,56_CEM I_ KSM		50 [l]	W/B
		Einwaage SOLL		Einwaage IST	0,56
Bestandteile		kg		kg	kg/m ³
CEM I 52,5 R		12,908			258,2
Eco-Füller 1_Kalkstein		5,732			114,6
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,365			27,3
FM 1		0,066			1,3
FM 2		0,066			1,3
Zugabe-Wasser		7,185			143,7
quarzitischer Sand (0/4)		37,875			757,5
quarzitischer Kies (4/8)		18,435			368,7
quarzitischer Kies (8/16)		37,271			745,4
Frischbetonrohddichte		2418	kg/m ³	LP-Gehalt	2,5
Gesamtwasser		144,5	kg/m ³	W/Pm	0,34

Datum	11.08.2015	Mischung	M1	Betonsorte:	C 30/37 B2 GK 16 Oeko
Projekt	Serie	Rezept.Nr.		Menge	Infos
OE2	OB2	O_0,59_CEM I_KSM		50 [l]	W/B
		Einwaage SOLL	Einwaage IST	0,59	
Bestandteile		kg	kg	kg/m ³	
CEM I 52,5 R		12,556		251,1	
Eco-Füller 1_Kalkstein		5,575		111,5	
Micro-Füller 1_Kalkstein		1,327		26,5	
FM 1		0,055		1,1	
FM 2		0,055		1,1	
Zugabe-Wasser		7,401		148,0	
quarzitischer Sand (0/4)		37,869		757,4	
quarzitischer Kies (4/8)		18,432		368,6	
quarzitischer Kies (8/16)		37,265		745,3	
Frischbetonrohddichte		2411	kg/m ³	LP-Gehalt	2,5
Gesamtwasser		148,7	kg/m ³	W/Pm	0,35
Leimvolumen ohne Luft		291,9	l/m ³		

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom(Master)arbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
B – Projekt Bachelor | M – Projekt Master | S – Skripten,
Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl