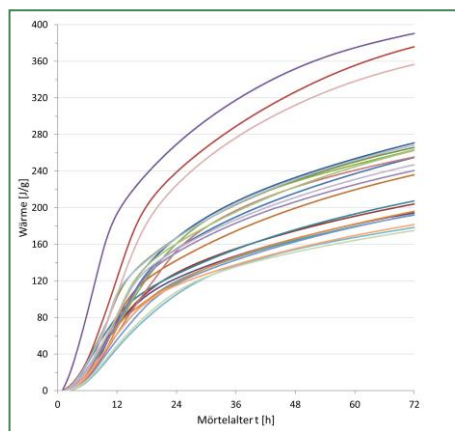
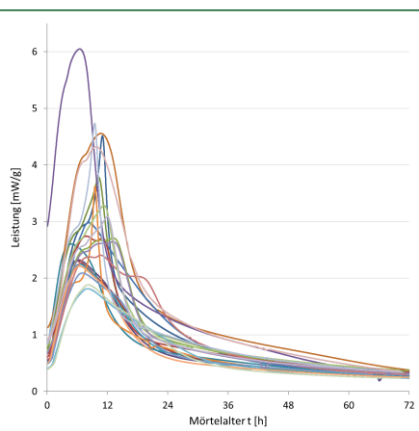


MASTERARBEIT



ENTWICKLUNG VON RESSOURCENEFFIZIENTEM BETON MIT GERINGER HYDRATATIONSWÄRME UND OPTIMIERTER FRÜHFESTIGKEIT.

Martin Wilpernig BSc.

Vorgelegt am
Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie
mit angeschlossener Techn. Versuchs- und Forschungsanstalt

Betreuer
Dipl.-Ing. Dr. techn. Joachim Juhart
Dipl.-Ing. Lukas Briendl

Graz am 10. September 2019

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.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

date

.....

(signature)

Anmerkung

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich besonders bei Herrn Dr.techn. Dipl.-Ing. Joachim Juhart und Herrn Dipl.-Ing. Lukas Briendl. Vielen Dank, dass Sie mir die Gelegenheit gegeben haben, bei Ihnen zu forschen und dass Sie mir während meiner gesamten Arbeit mit Ihrem Fachwissen zur Seite standen.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Graz, am 9.September.2019

(Unterschrift des Studierenden)

Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, eine Bindemittelzusammensetzung für Beton zu finden, die bei möglichst geringer Hydratationswärmeentwicklung eine ausreichend hohe Frühfestigkeit, z.B. für kurze Ausschallfristen, aufweist. Zudem sollte der Beton auch höhere Anforderungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit erfüllen und ressourcenschonend zusammengesetzt sein. Zur Spezifikation der Anforderungen wurde die ÖBV-Richtlinie „Wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen“ (WW) herangezogen.

Als Ausgangsbasis und Referenz für die Untersuchungen dienten Rezepturen von 4 Betonsorten: Ein Beton nach der „WW“-Richtlinie, ein Beton mit einem speziellen Hochofenzement (CEM III/A 52,5 R), ein in Österreich häufig verwendeter Transportbeton (mit der Betonsortenkurzbezeichnung B3 nach österr. Norm) und ein „Ökobeton“ mit Portlandzement CEM I 52,5 R, feinen Kalksteinmehlen und aufbereitetem Hüttensand im Bindemittel.

Mit Versuchen an Mörteln, bei denen u.a. die Hydratationswärme mittels Wärmeflusskalorimeter und die Druckfestigkeitsentwicklung mittels zerstörender Festigkeitsprüfung ermittelt wurden, konnten durch Variation der Zusatzstoffe im Bindemittel und des Wasser/Bindemittel-Werts (W/B) Potentiale für die Verbesserung des Verhältnisses von Hydratationswärme zu Frühfestigkeit aufgezeigt werden. Dazu wurden aufbereiteter Hüttensand, Kalksteinmehl in verschiedenen Feinheiten, Metakaolin und auch Quarzmehl, sowie Seeding-Mittel verwendet. Hier wurden, je nach Rezeptur, deutliche Verbesserungspotentiale sichtbar, wobei die verwendeten Kalksteinmehle den anderen Füllstoffen hinsichtlich einer Verbesserung der Frühfestigkeit überlegen waren. Das beste Verhältnis von Hydratationswärme zu Frühfestigkeit zeigten die Mischungen mit dem speziellen Hochofenzement. Auch die Absenkung des W/B-Werts brachte eine Verbesserung der Verhältniszahl. Es zeigte sich, dass die Kombination aus Zusatzstoffen (Hüttensand und Mikrofüller Kalksteinmehl) und „C₃A-freiem“ Zement, den WW Referenz-Mörtel in der Festigkeit und auch in der niedrigen Wärmeentwicklung übertreffen konnte.

Um die Eigenschaften auch am Beton zu verifizieren und mit dem WW-Referenzbeton zu vergleichen, wurde die optimierte Mörtelmischung in eine Betonrezeptur umgesetzt. Dabei erreichte diese deutlich bessere Werte hinsichtlich der geprüften Dauerhaftigkeitsparameter (Wassereindringtiefe und Karbonatisierung), und konnte auch die entsprechenden WW Vorgaben für den maximalen Temperaturanstieg einhalten und den WW Referenzbeton übertreffen. Somit ist es gelungen eine Betonrezeptur zu entwickeln, die die WW Spezifikation erfüllt und gleichzeitig eine höhere Dauerhaftigkeit erwarten lässt.

Schlagnworte: Betontechnologie, Frühfestigkeit, Mikrofüller, Wärmeentwicklung, Hydratationswärme

Abstract

The aim of the current work was to find a binder composition for concrete which has a rate of hydration heat evolution as low as possible and simultaneously a sufficiently high early strength, e.g. for short formwork stripping times. In addition, the concrete should also fulfill improved requirements with regard to durability and be composed in a way that saves resources. The ÖBV guideline for watertight concrete structures so called "Weiße Wanne" (WW) was used to specify the requirements.

The starting point and reference for the investigations were recipes of four types of concrete: a concrete according to the "WW" guideline, a concrete with a special blast furnace cement (CEM III/A 52.5 R), a ready-mixed concrete frequently used in Austria (with the concrete type abbreviation B3 according to the Austrian standard) and an "eco-concrete" with Portland cement CEM I 52.5 R, fine limestone powder and ground blast furnace slag in the binder.

With tests on mortars, in which the hydration heat was determined with a heat flow calorimeter and the compressive strength development with a destructive strength test, potential for the improvement of the ratio of hydration heat to early strength could be demonstrated by varying the supplementary cementitious materials (SCM's) in the binder and the water/binder value (W/B). For this purpose, processed ground blast furnace slag, limestone powder in various grain sizes, metakaolin and also quartz powder as well as seeding agents were used. Depending on the formulation, clear improvement potentials became visible, whereby the limestone powder used were superior to the other fillers with regard to an improvement of the early strength. The mixtures with the special blast furnace cement showed the best ratio of hydration heat to early strength. The reduction of the W/B value also led to an improvement in the ratios. It was shown that the combination of SCM's (blast furnace slag and microfiller limestone powder) and "C₃A-free" cement could exceed the WW reference mortar in strength and also in low heat generation.

In order to verify the properties also for concrete and to compare them with the WW reference concrete, the optimized mortar mixture was converted into a concrete formulation. The latter achieved significantly better values with regard to the durability parameters tested (water penetration depth and carbonation) and was also able to meet the corresponding WW low heat specifications, thus exceeding the WW reference concrete. As a consequence, it was possible to develop a concrete formulation that meets the WW specification and simultaneously offers a higher durability.

Keywords: concrete technology, early strength, microfiller, heat evolution, heat of hydration

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Grundlagen und Kenntnisstand	3
2.1	Wärmeentwicklung von Beton	3
2.1.1	Auswirkungen der Wärmeentwicklung	3
2.1.2	Einsatzgebiete	5
2.1.3	Klassifizierung	5
2.2	Zement als hydraulisches Bindemittel	6
2.2.1	Klinkermineralogie und Hydratationsreaktionen	6
2.2.2	Ablauf der frühen Hydratation von PZ	7
2.2.3	Einflüsse auf die Hydratationswärme von Zement	9
2.2.4	Zemente mit niedriger Hydratationswärme	14
2.2.5	Prüfverfahren zur Ermittlung der Hydratationswärme	14
2.2.6	Klassifizierung von Zement-Zusatzstoffen	17
2.3	Festigkeitsentwicklung von Beton	21
2.3.1	Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung	21
2.3.2	Abschätzung der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen	23
2.3.3	Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung	24
2.3.4	Möglichkeiten zur Steigerung der (Früh)Festigkeit	26
2.4	Ökologische Betrachtung	31
2.5	Ökonomische Betrachtung	35
3	Ausgangsstoffe	38
3.1	Zemente	38
3.2	Quantifizierung der Zement Bestandteile	40
3.3	Verwendete Zusatzstoffe	43
3.4	Zusatzmittel	45
3.5	Gesteinskörnung	45
3.6	Partikelgrößenanalyse	46
4	Eigene Voruntersuchungen am Beton	49
4.1	Betonentwurf und untersuchte Betonsorten	49
4.2	Beton- und Probekörperherstellung	53
4.3	Methoden der Untersuchung und Versuchsdurchführung	58
4.3.1	Temperaturmessungen	58
4.3.2	Druckfestigkeitsprüfung am Probewürfel	58
4.4	Ergebnisse aus Voruntersuchungen am Beton	60
4.4.1	Wärmeentwicklung	60
4.4.2	Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betonsorten	65
4.4.3	Zusammenhang Wärme und Festigkeit	70
5	Versuchsprogramm	74
5.1	Untersuchungen am Mörtel	74
5.1.1	Mörtelentwurf und Bindemittelzusammensetzungen	74
5.1.2	Methoden	77
5.1.3	Versuchsdurchführung	78
5.2	Ergänzende Untersuchungen am Beton	82
5.2.1	Untersuchung einer neuen Betonsorte	82
5.2.2	Karbonatisierungswiderstand	83
5.2.3	Wassereindringwiderstand	85

6	Ergebnisse.....	89
6.1	Wärme- und Festigkeitsentwicklung der untersuchten Mörtel	89
6.1.1	Aufbereitung der Daten aus den Wärmemessungen.....	89
6.1.2	Mörtelmischungen als Referenz.....	92
6.1.3	Variation von CEM I und CEM I SR0 Zement.....	93
6.1.4	AHWZ vs. Öko-Zusatzstoffmischung	95
6.1.5	C ₃ A-hältiger Mörtel mit geringer WE	96
6.1.6	Variation von Mikrofüllern	98
6.1.7	Variation des Wasserbindemittelwerts	100
6.1.8	CSH Seeding.....	103
6.1.9	CO ₂ Seeding.....	105
6.1.10	Zusammenhang Wärme und Festigkeit	107
6.1.11	Modell zur Abschätzung der Wärmeentwicklung.....	112
6.2	Ergebnisse aus ergänzenden Untersuchungen am Beton.....	116
6.2.1	Wärme- und Festigkeitsentwicklung der neuen Betonsorte.....	117
6.2.2	Karbonatisierungswiderstand.....	118
6.2.3	Wassereindringwiderstand.....	121
7	Diskussion und Schlussfolgerung.....	123
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	126
9	Literaturverzeichnis.....	128

Anhang:

A.1: Druck- und Biegezugfestigkeit der untersuchten Mörtelmischungen

A.1: Wärmeflusskurven der untersuchten Mörtelmischungen

A.3: Wärmeentwicklung der untersuchten Mörtelmischungen

A.4: Gesteinskornzusammensetzung

A.5: Beton Protokoll Druckfestigkeitsprüfung

A.6: Beton Protokoll Temperaturmessungen

A.7: Beton Temperatur- und Wärmeverhältnisse (modellhaft)

A.8: Beton Stoffraumrechnungen

A.9: Digitaler Anhang

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Temperaturverlauf und Zwangsspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch) (Wischers & Manns, 1972; VDZ, 2002, S.361)	4
Abbildung 2: Dreistoffsystem CaO - Al ₂ O ₃ - SiO ₂ mit der Zusammensetzung für PZ (nach Osborn und Muan (1960))	6
Abbildung 3: Exemplarischer Zeitlicher Verlauf der Portlandzementhydratation anhand der entstehenden Wärme nach Taylor	7
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefüge Entwicklung bei der Hydratation des Zements (Richartz, 1969)	8
Abbildung 5: Wärmeentwicklung und mineralogische Zusammensetzung der fünf amerikanischen PZ (Mandry, 1961)	11
Abbildung 6: Wärmeentwicklung der einzelnen Zementphasen (Taylor, 1997)	12
Abbildung 7: Hydratationswärmeentwicklung von PZ bei unterschiedlichem C ₃ A Gehalt und etwa gleichem C ₃ S Gehalt nach Lerch und Bogue	12
Abbildung 8: Beschleunigung der WE eines PZ durch höhere Anfangstemperaturen (Mandry, 1961)	13
Abbildung 9: Hydratationswärmeentwicklung unter isothermen, teiladiabatischen und adiabatischen Bedingungen (Grube & Hintzen, 1993)	15
Abbildung 10: Verlauf des Temperaturanstiegs infolge Hydratationswärme im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke (Basalla, 1963; VDZ, 2002)	17
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei verschiedenen Wasserbindemittelwerten (hier als Wasserzementwerte bezeichnet) (Bayer, 1997)	22
Abbildung 12: Interpretation des Hydratationsgrades (Schindler, 2005, S.3)	22
Abbildung 13: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und der Zementdruckfestigkeitsklasse (Küchlin & Hersel, 2017)	23
Abbildung 14: Beschreibung der Festigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Zementfestigkeitsklassen mit Glg. (2)	26
Abbildung 15: Fiktive Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente nach dem fib Model Code 2010	26
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Zementgelbildung bei beschleunigter Hydratation mit Nano CSH (John u. a., 2018)	27
Abbildung 17: Effekt der beschleunigten Hydratation bei Verwendung von Nano CSH anhand von Wärmeflusskurven (John u. a., 2018)	28
Abbildung 18: Wirkungsprinzip bei der frühen Karbonatisierung im frischen Beton (https://www.carboncure.com/technology)	28
Abbildung 19 Schematische Darstellung der beschleunigten Karbonatisierung (Bertos u. a., 2004S. 196; Lim u. a., 2010S. 205)	29
Abbildung 20: Steigerung der Wärmeintensität durch CO ₂ -Eintrag	30
Abbildung 21: Jährlicher weltweiter CO ₂ -Ausstoß aufgrund von Zementherstellung (Von de: Florian.Arnd - CDIAC, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1144301)	31
Abbildung 22: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand (VDZ, 2018)	32
Abbildung 23: Gesamte Lebenszyklusbetrachtung der eingesetzten Baustoffe (Proske, 2012, S.8)	33
Abbildung 24: Treibhauspotential unterschiedlicher Zemente (Proske, 2012, S.16)	33
Abbildung 25: Feinstoffe im Beton – Optimierung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs (Juhart u. a., 2015, S.20)	34
Abbildung 26: Umweltwirkung in den einzelnen Phasen der Optimierung (Proske, 2012, S.18)	34

Abbildung 27: Primärenergieverbrauch PEI (links) und Treibhauspotenzial GWP (rechts) verschiedener Betonausgangsstoffe (Juhart u. a., 2015)	35
Abbildung 28: Kursverlauf der CO ₂ – Zertifikate (European Energy Exchange (EEX), 2019)	36
Abbildung 29: Trocknung der verwendeten Gesteinskornfraktionen 0-4 und 4-16	46
Abbildung 30: Partikelgrößenverteilung der Zemente (Durchgang in V-%).....	47
Abbildung 31: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Zusatzstoffe (Durchgang in V-%).....	47
Abbildung 32: Grenzsieblinien für GK16 und verwendete Gesteinskornzusammensetzungen und Sieblinien der hergestellten Betone (Vgl. Austrian Standards Institute 2018).....	51
Abbildung 33: Mischen der einzelnen Stoffe trocken, mit Wasser und mit FM (links nach rechts)	54
Abbildung 34: Frischbetonprüfung - Ausbreitmaß, Rohdichte, Luftgehalt, Gesamtwassergehalt	55
Abbildung 35: Beton Probekörperlagerung Unterwasser nach dem Ausschalen	57
Abbildung 36: Temperaturmessungen im Kern der wärmeisolierten Betonproben	58
Abbildung 37: Druckfestigkeitsprüfung am Beton Probewürfel W150	60
Abbildung 38: Temperaturverläufe der untersuchten Betonsorten (Ist-Messung)	61
Abbildung 39: Temperaturkurven $\Delta T(t)$ der untersuchten Betonsorten	62
Abbildung 40: Modellhaft ermittelte ad. Temperatur- und Wärmeverhältnisse am Beispiel „HOZ“-Beton	65
Abbildung 41: Mittlere Würfeldruckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ der untersuchten Probewürfel im jeweiligen Betonalter t ; $n = 2$	66
Abbildung 42: Relative Würfeldruckfestigkeiten $f_{cm}(t) : f_{cm}(28)$	67
Abbildung 43: Nichtlineare Regression anhand der Funktion $\beta_{cc}(t)$ durch Optimierung des Beiwerts s	68
Abbildung 44: Regressionsfunktion $f_{cm}(t)$ zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betonsorten durch Optimierung der Beiwerte $s [-]$	69
Abbildung 45: Zusammenhang Temperaturanstieg ΔT [°C] und Betondruckfestigkeit im Alter von 1, 3, 7 und 28 Tagen	70
Abbildung 46: Zusammenhang der Hydratationswärme und der Würfeldruckfestigkeit der untersuchten Betonsorten im Betonalter von 1, 3 und 7 Tagen	71
Abbildung 47: Verhältniszahlen $f_{cm}(t) / f_{cm}(28)$ links und $f_{cm}(t) / f_{cm}(28)$ rechts, aufgetragen über die Zeit	72
Abbildung 48: Übersicht über die Bindemittelzusammensetzung B_G der untersuchten Mörtel	76
Abbildung 49: Mörtelherstellung – Einwaage und Mischen der verwendeten Stoffe.....	78
Abbildung 50: Untersuchung der Mörtelkonsistenz – Ausbreitmaß und Ausbreitmaß.....	79
Abbildung 51: Mörtel - Lagerung in der Stahlform und unter Wasser	81
Abbildung 52: Druckfestigkeitsprüfung an Mörtel-Prismen-Hälften	81
Abbildung 53: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeitsprüfung an Mörtel Prismen	82
Abbildung 54: Vorlagerung im Klimaraum (links) und Versuchslagerung im CO ₂ Schrank (rechts).....	84
Abbildung 55: Brechen der Probekörper und Besprühen mit Indikatorlösung Phenolphthalein	85
Abbildung 56: Prüfung der Wassereindringtiefe gem. ONR 23303 PVB (Austrian Standards Institute 2010)	86
Abbildung 57: WU Prüfung – Probekörpervorbereitung und Einbau in die Prüfmaschine.....	86
Abbildung 58: WU Prüfung – Einbau der Probekörper in die Prüfmaschine	87
Abbildung 59: WU Prüfung – Brechen der Probekörper	87
Abbildung 60: WU Prüfung - Durchführung der Messungen	88

Abbildung 61: Wärmeflusskurven Rohdaten am Beispiel der Referenzmörtelmischung Ref_CEM I	89
Abbildung 62: Wärmeentwicklung Rohdaten am Beispiel der Referenzmörtelmischung Ref_CEM I	90
Abbildung 63: Berechnung der freisetzbaren Hydratationswärmemenge $H_z(t)$ am Beispiel der untersuchten Mörtelmischung Ref_CEM I	91
Abbildung 64: Wärmefluss und Wärmeentwicklung der Referenzmörtelmischungen gemessen am Wärmeflusskalorimeter (isotherme Lagerung 20 °C)	92
Abbildung 65: Mittlere Mörteldruckfestigkeiten $R_c(t)$ der untersuchten Referenzmörtel im jeweiligen Mörtelalter t ; $n = 3$	93
Abbildung 66: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von CEM und CEM_SR0 Zement bei gleicher Zusatzstoffzusammensetzung	94
Abbildung 67: Festigkeitsentwicklung durch Variation des PZ, CEM I und CEM I SR0, in der Öko-Mischung (60 M-% von B_G); $n=3$	94
Abbildung 68: Wärmefluss und Wärmeentwicklung AHWZ vs. „Öko-Zusatzstoffmischung“	95
Abbildung 69: Festigkeitsentwicklung AHWZ vs. Öko-Zusatzstoffmischung; $n=3$	96
Abbildung 70: Wärmefluss und Wärmeentwicklung „Green WW Mörtel“	97
Abbildung 71: Gesteigerte Festigkeitsentwicklung beim „HOZ-Öko“-Mörtel; $n=3$	98
Abbildung 72: Wärmefluss- und Wärmeentwicklung unter Variation des 7,5 M-% Mikrofülleranteils	99
Abbildung 73: Festigkeitsentwicklung unter Variation des 7,5 M-% Mikrofülleranteils; $n=3$	100
Abbildung 74: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko und Öko_QM	101
Abbildung 75: Festigkeitsentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko und Öko_QM; $n=3$	101
Abbildung 76: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko_SR0 und Öko_SR0_QM	102
Abbildung 77: Festigkeitsentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko_SR0 und Öko_SR0_QM; $n=3$	103
Abbildung 78: Wärmefluss und Wärmeentwicklung bei Verwendung von 4 %- B_G Seeding-Mittel (EB)	104
Abbildung 79: Festigkeitsentwicklung bei Verwendung von 4 M%- B_G Seeding-Mittel (EB); $n=3$	104
Abbildung 80: Wärmefluss und Wärmeentwicklung bei Verwendung von Sodawasser als Anmachwasser	105
Abbildung 81: Festigkeitsentwicklung bei Verwendung von Sodawasser als Anmachwasser; $n=3$	106
Abbildung 82: Quotienten aus der kum. Wärme $H_z(t)$ [J/g] und der Druckfestigkeit $R_c(t)$ [N/mm ²] nach 1 und 3 Tagen für die Mörtelmischungen mit CEM I Zement	108
Abbildung 83: Quotienten aus der kum. Wärme $H_z(t)$ [J/g] und der Druckfestigkeit $R_c(t)$ [N/mm ²] nach 1 und 3 Tagen für die Mörtelmischungen mit CEM I SR0 Zement	108
Abbildung 84: Beziehung zwischen Hydratationswärme $H_z(1)$ und Druckfestigkeit $R_c(1)$	109
Abbildung 85: Beziehung zwischen Hydratationswärme $H_z(3)$ und Druckfestigkeit $R_c(3)$	110
Abbildung 86: Beziehung zwischen Hydratationswärme $H_z(1,3)$ und Druckfestigkeit $R_c(1,3)$	111
Abbildung 87: Wärme-/Festigkeits- Degressionskurve „Preis der Festigkeit“	112
Abbildung 88: Verhältniswert R zur Berechnung der WE von Hüttenzement abhängig vom HÜS-Gehalt (Mandry, 1961)	114
Abbildung 89: Vergleich der modellhaft ermittelten und der gemessenen Wärmeentwicklung	116
Abbildung 90: Temperaturanstieg der neuen Betonsorte Öko_SR0 gegenüber der Referenz WW	117
Abbildung 91: Vergleich der Festigkeitsentwicklung der neuen Betonsorte Öko_SR0 gegenüber der Referenz WW	118

Abbildung 92: Karbonatisierungstiefe d_k der untersuchten Betonsorten nach 28 und 70 Tagen Versuchslagerung im CO ₂ – Schrank	119
Abbildung 93: Indikativ bestimmtes Karbonatisierungsverhalten der untersuchten Betonsorten nach 28 Tagen (links) und 70 Tagen (rechts) Lagerung im CO ₂ Schrank	121
Abbildung 94: Mittlere Wassereindringtiefe t der untersuchten Betonsorten in [mm]	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wärmeentwicklungsklassen, zul. Frischbetontemperatur und max. Bindemittelgehalt gem. ÖN B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018)	5
Tabelle 2: Einfluss der Mahlfeinheit auf die Hydratationswärme eines Hochofenzements nach R. Alègre (Schwiete & Roth, 1973)	13
Tabelle 3: Einteilung der Zemente nach ihrer Wärmeentwicklung nach 15 h (gem. ÖN B 3327-1)	14
Tabelle 4: Erlaubte Zusatzstoffmengen in [M%-BG] gem. ÖN B 4710-1	18
Tabelle 5: Einteilung der reaktiven Feinstoffe (Teichmann, 2007)	19
Tabelle 6: Richtwerte für die Festigkeitsentwicklung von Beton aus verschiedenen Zementen bei 20 °C Lagerung	24
Tabelle 7: Festigkeitsentwicklung von Beton bei 20 °C (VDZ, 2002)	24
Tabelle 8: Empfohlene Beiwerte s nach dem fib Model Code 2010	25
Tabelle 9: Mineralogische Zusammensetzung der für die Untersuchungen verwendeten Zemente mittels XRD-Messung ermittelt (Angaben in M-%)	40
Tabelle 10: Klinkerverteilung bezogen auf den Gesamtklinkergehalt im jeweiligen Zement	41
Tabelle 11: Zementzusammensetzung gem. ONR 29196-4 ermittelt (Angaben der Hersteller)	42
Tabelle 12: Bestandteile des verwendeten AHWZ	44
Tabelle 13: Übersicht über wichtige Kenngrößen der für die Bindemittelzusammensetzungen verwendeten Stoffe	48
Tabelle 14: „Öko-Zusatzstoffzusammensetzung“	53
Tabelle 15: Ergebnisse der Frischbetonprüfung der untersuchten Betonsorten	56
Tabelle 16: Übersicht über die hergestellten Beton Probekörper	57
Tabelle 17: Temperaturwerte der untersuchten Betonsorten in [°C]	61
Tabelle 18: Beiwerte für die Kalibrierung der Abkühlleistung	64
Tabelle 19: Hydratationswärme $H_z(t)$ der untersuchten Betonproben in [J/g]	64
Tabelle 20: Ergebnisse $f_{cm}(t)$ aus den Druckfestigkeitsprüfungen und rel. Druckfestigkeiten bezogen auf die jeweils erreichte mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen	66
Tabelle 21: Optimierung der Beiwerte s [-] für die jeweils untersuchte Betonsorte	68
Tabelle 22: Hydratationswärmern $H_z(t)$, mittl. Druckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ und Verhältniszahlen für die Betonsorten HOZ und Öko	72
Tabelle 23: Hydratationswärmern $H_z(t)$, mittl. Druckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ und Verhältniszahlen für die Betonsorten B3 und WW	72
Tabelle 24: Bindemittelzusammensetzung der Untersuchten Mörtelmischungen in [%-B _G]	75
Tabelle 25: Bindemittelzusammensetzung B _G aufgeteilt nach Klinker, Sulfaten, inerten und hydr. wirksamen Zumahl- oder Zusatzstoffen	76
Tabelle 26: Ergebnisse aus den Untersuchungen der Mörtelkonsistenz – AFM und AM	80
Tabelle 27: Startzeitpunkt t_0 der Beschleunigungsperiode für die untersuchten Mörtelmischungen (lokales Minimum)	92
Tabelle 28: Übersicht über die Wärme- und Festigkeitsverhältnisse der untersuchten Mörtelmischungen (I)	107
Tabelle 29: Übersicht über die Wärme- und Festigkeitsverhältnisse der untersuchten Mörtelmischungen (II)	107

Tabelle 30: Beitrag der einzelnen Klinkerminerale zur Hydratationswärme eines PZ, bei einer Lagerungstemperatur von 21,1°C und Blaine 3300 cm ² /g (Verbeck & Foster, 1950, S.1235ff; Mandry, 1961, S.11)	113
Tabelle 31: Vergrößerung der WE eines PZ bei Erhöhung der spe. Oberfläche um ± 100 cm ² /g (Mandry, 1961)	113
Tabelle 32: Gewählte Faktoren für die Ermittlung der Wärme aus den einzelnen Klinkermineralien.....	115
Tabelle 33: Fließmitteldosierung bei der neuen Betonsorte Öko_SR0	117
Tabelle 34: Hydratationswärmen Hz(t), mittl. Druckfestigkeiten fcm(t) und Verhältniszahlen für die neue Betonsorte Öko_SR0 und die Referenz WW	118
Tabelle 35: Karbonatisierungstiefe dk der untersuchten Betonsorten in [mm]	119

Formelverzeichnis

Glg. (1):	Wasserbindemittelwert.....	21
Glg. (2):	Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung.....	25
Glg. (3):	Druckfestigkeit Beton.....	59
Glg. (4):	Umrechnung Druckfestigkeit Beton je nach Probekörperlagerung.....	59
Glg. (5):	Rohdichte Beton.....	60
Glg. (6):	Abkühlleistung je Stunde (Wärmemenge).....	63
Glg. (7):	Adiabatischer Temperaturanstieg im Beton.....	64
Glg. (8):	Druckfestigkeit Mörtel.....	77
Glg. (9):	Biegezugfestigkeit Mörtel.....	78
Glg. (10):	Massenerhaltungssatz.....	90
Glg. (11):	Hydratationswärme abhängig von Klinkerverteilung.....	113
Glg. (12):	Hydratationswärme abhängig vom Blaine-Wert.....	113
Glg. (13):	Hydratationswärme Zement.....	114

Abkürzungsverzeichnis

AHWZ	Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe
AFM	Ausbreitfließmaß
AM	Ausbreitmaß
BM	Bindemittel
CEB	Comité Euro-Internationale du Béton / Euro-International Committee for Concrete
FA	Flugasche
fib	fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (created from the merger of CEB and FIP)
FIP	Fédération Internationale de la Précontrainte / International Federation for Prestressing
GK	Größtkorn der Gesteinskornzusammensetzung
GWP	Global Warming Potential
HÜS	Hüttensand
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSM	Kalksteinmehl
psd	particle size distribution
PEI	Primärenergieinhalt
PZ	Portlandzement
RI. W. W.	Richtlinie der österreichischen Bautechnik-Vereinigung (öbv) für wasserundurchlässige Betonbauwerke – Weiße Wannen
UHPC	Ultra High Performance Concrete
WE	Wärmeentwicklung
WT	begrenzte frühzeitige Wärmeentwicklung (Kurzbezeichnung zur Klassifizierung gem. ÖN B 3327-1)
XRD	X-Ray Diffraction (Röntgenbeugungsanalyse)

Zementnomenklatur

C = CaO	S = SiO ₂	A = Al ₂ O ₃	F = Fe ₂ O ₃
M = MgO	K = K ₂ O	\bar{S} = SO ₃	N = Na ₂ O
T = TiO ₂	P = P ₂ O ₅	H = H ₂ O	\bar{C} = CO ₂

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Wärmeentwicklung durch die Hydratation, welche bei der Erhärtung von Beton auftritt, ist wesentlich von Bedeutung für die Qualität des Festbetons. Da es bei zu großer Wärmeentwicklung und behinderter Verformung zu inneren Spannungen und zu Rissen kommen kann, ist es wichtig, die Temperatur während der Aushärtung zu begrenzen. Dabei besteht das Problem, dass gerade Beton mit höheren Anforderungen an seine Festigkeit bzw. Frühfestigkeit „klassisch“ über einen höheren Zementgehalt bei entsprechend geringem W/B-Wert (Wasserbindemittelwert) und fein gemahlenem Zement hoher Reaktivität erreicht werden kann. Der Zement wiederum ist aber für die Wärmeentwicklung im Beton verantwortlich. Bei der Betonentwicklung scheint es daher ein Widerspruch, beide Ziele gleichzeitig erreichen zu können. Die Begrenzung der Höchsttemperatur im Bauteil während der Hydratation einerseits und das Erreichen einer ausreichend schnellen Festigkeitsentwicklung andererseits ist dabei eine betontechnische und ausführungstechnische Optimierungsaufgabe.

Zusätzlich zu den physikalischen Eigenschaften von Beton werden heute auch umweltrelevante Kriterien immer wichtiger. Für die Produktion von Zementklinker, welcher Hauptbestandteil bereits genormter und häufig verwendeter Zementarten ist, wird sehr viel Wärmeenergie benötigt (3000 bis 3500 kJ/kg), die entsprechend hohe CO₂-Emissionen (830kg/to CEM I (Juhart u. a., 2015, S.15)) erzeugt. Deshalb wird versucht, den Zementgehalt von Beton durch umweltschonendere Alternativen zu verringern. Um das Ziel zu erreichen setzt man u. a. auf altbewährte Zusatzstoffe, die zum Teil bereits in der Antike für Betonmischungen angewendet wurden und die sich als durchaus geeignete Zementzusatzstoffe herausstellten (z.B.: Vulkanasche, Flugasche, gemahlener Hüttensand, Mikrofüller, etc.). So werden heute von der Zementindustrie bereits Normzemente für häufige Anwendungen angeboten, die einen teils sehr hohen Anteil an diesen Stoffen (= Zumahlstoffe) beinhalten. Ein zusätzlicher Effekt vieler Zementzusatzstoffe ist, dass sie die Wärme und Festigkeitsentwicklung im Beton, während der Erhärtung, beeinflussen können.

Eigene Untersuchungen (Wilpernig, 2019) haben gezeigt, dass die Bindemittelzusammensetzung großen Einfluss auf die Wärmeentwicklung von Beton hat und dass ein starker Zusammenhang zwischen Festigkeitsentwicklung und Wärmeentwicklung besteht. Deshalb soll auch ein Modell untersucht werden, das versucht anhand der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Hydratation, wie die im Zement enthaltenen Klinkerminerale C₃S, C₂S, C₃A und C₄AF, die Mahlfineinheit des Zements und dem Anteil an Zusatzstoffen, die zu erwartende Wärmeentwicklung am 1. und am 3. Tag abzuschätzen. Die modellhaft ermittelten Daten, sollen dann mit den experimentell ermittelten Daten verglichen und so die Signifikanz des Modells geprüft werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch den Vergleich von gezielt veränderten Mörtelrezepturen, die Potentiale von Beton mit alternativen Bindemittelzusammensetzungen, durch geeignete Prüfverfahren, hinsichtlich der Wärme- und Festigkeitsentwicklung zu evaluieren und die Verhältniszahlen aus den beiden charakteristischen Werten nach Möglichkeit zu optimieren. Zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung werden die 1, 3, 7 und 28 Tages-Druckfestigkeiten durch entsprechende Druckfestigkeitsprüfungen ermittelt. Gleichzeitig wird auch die Wärmeentwicklung bis zu einem Alter von 3 Tagen mittels Kalorimeter-Messungen

aufgezeichnet und ausgewertet. Die Ergebnisse sollen in der Arbeit grafisch und tabellarisch dargestellt und entsprechend verglichen und interpretiert werden.

Die Voruntersuchungen an 4 Betonsorten dienen als Ausgangspunkt für die Optimierungsversuche, die in dieser Arbeit anhand von Variationen an Mörtelrezepturen aufgezeigt werden sollen. Dabei werden durch Variation der Zemente, der Mikrofüller und des Wasserbindemittelwerts und durch Zugabe von modernen Erhärtungsbeschleunigern, Möglichkeiten der Optimierung ausprobiert. Ziel ist es dabei auch, eine Mörtelmischung zu entwickeln, die den Anforderungen der Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke - Weiße Wanne (WW)“ (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018), hinsichtlich der Bindemittelzusammensetzung, gerecht wird.

Da für die Entwicklung von ressourceneffizientem und dauerhaftem Beton mit geringer Wärmeentwicklung, alleinige Erkenntnisse über die Wärme- und Festigkeitsentwicklung nicht ausreichen, soll ergänzend zu den eigenen Untersuchungen am Beton, der Widerstand gegen Wassereindringen und Karbonatisierung untersucht werden. Die Ergebnisse sind wichtige Parameter für die Beurteilung der Gefügedichtheit und der Dauerhaftigkeit von Beton.

Die Ergebnisse werden abschließend ausgewertet und diskutiert. Dabei sollen Anreize für weiterführende Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

2 Grundlagen und Kenntnisstand

2.1 Wärmeentwicklung von Beton

Die gesamte Hydratation des Zements läuft als Summe exothermer Prozesse ab. Die bei der Hydratation von Zement freigesetzte Wärmemenge nennt man Hydratationswärme. Die Hydratationswärme führt zu einer Wärmeentwicklung des Betons. Wenn die im Bauteil je Zeiteinheit entstehende Wärmemenge größer als die abfließende Wärmemenge ist, erhöht sich die Temperatur. Dies hat Auswirkungen auf die Ausführung von Betonbauwerken und auf die Gebrauchseigenschaften der Bauteile zur Folge.

Von Seiten der Betonzusammensetzung und der Bauausführung gilt es folgende beton-technische und ausführungstechnische Einflussgrößen zu beachten (Grube & Hintzen, 1993):

- Bauteilabmessungen
- Zementgehalt und -art
- Wärmekapazität und -leitfähigkeit des Betons
- Wärmeübergangsbedingungen
- Frischbetontemperatur
- Umgebungsbedingungen (Lufttemperatur, Wind, etc.)
- Kühlungsmaßnahmen

2.1.1 Auswirkungen der Wärmeentwicklung

Die Hydratationswärme des Zements führt zu einer mehr oder weniger großen Wärmeentwicklung des Betons innerhalb der ersten Tage. Die Temperaturerhöhung fördert die Festigkeitsentwicklung, aber auch die Möglichkeit der Rissbildung in zwangsbeanspruchten Bauteilen. Die Voraussage der Temperaturentwicklung in einem Bauteil ist daher wesentlich zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung sowie unerwünschter Eigen- und Zwangspannungszustände. (Grube & Hintzen, 1993)

Gefahr der Rissbildung im jungen Beton

Durch hohe Temperaturen im Beton und die damit verbundene Wärmedehnung können, bei Verformungsbehinderung, wenn die Zugbruchdehnung des Betons überschritten wird, Risse entstehen.

Die behinderte Wärmeausdehnung und damit verbundene Temperaturspannungen können sich dabei zusätzlich mit anderen Spannungen, die beispielsweise durch andere Einwirkungen wie etwa Schwindverformungen oder das Einwirken von äußeren Lasten entstehen, überlagern. Gerade in jungem Alter schwindet Beton systembedingt unter Wasserabgabe (Austrocknung) und unter Bildung der Hydratphasen, die das Wasser chemisch binden und so zu Volumenänderungen führen.

Die folgende Abbildung zeigt schematisch die unter Verformungsbehinderung auftretenden Zwangsspannungen im jungen Beton infolge eines Temperaturverlaufs:

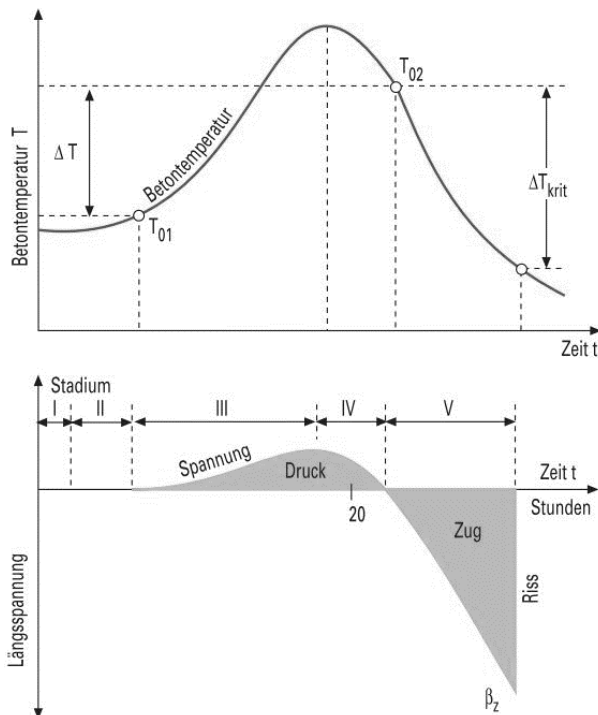


Abbildung 1: Temperaturverlauf und Zwangsspannungen im jungen Beton bei behinderter Temperaturverformung (schematisch) (Wischers & Manns, 1972; VDZ, 2002, S.361)

Sekundärettringitbildung

Neben der Rissbildung besteht bei zu hohen Temperaturen (ab ca. 60°C) zusätzlich die Gefahr der Sekundärettringitbildung, die bekanntlich nicht erwünscht ist. Die späte Bildung von Ettringit kann zu Treiberscheinungen führen, die das Zementsteingefüge auflockern können. Der Grund warum es bei zu hohen Temperaturen dazu kommen kann ist, dass der größte Teil des während der Hydratation in Lösung gegangenen Sulfats dann nicht chemisch im Ettringit, sondern nur physikalisch im Zementstein gebunden wird. Unter bestimmten Rahmenbedingungen kann das physikalisch gebundene Sulfat zu einem späteren Zeitpunkt Ettringit bilden und den Beton schädigen (Bergmeister u. a., 2016).

Weitere nachteilige Eigenschaften

Bildung thermodynamisch nicht stabiler Hydratationsphasen, besonders ab Temperaturen über 70 °C. Verminderung der Endfestigkeit und der Dauerhaftigkeit. (Röck & Ostheimer, 2012; Bergmeister u. a., 2016, S.115)

2.1.2 Einsatzgebiete

Die Einsatzgebiete von Beton mit geringer Wärmeentwicklung sind im Wesentlichen:

- Bei hohen Umgebungstemperaturen
- Für massige Bauwerke
- Für Wasserundurchlässige Bauwerke (Dichtigkeit, Rissbreitenbegrenzung)

2.1.3 Klassifizierung

Einteilung von Beton in Wärmeentwicklungsklassen gem. ÖN B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018):

Tabelle 1: Wärmeentwicklungsklassen, zul. Frischbetontemperatur und max. Bindemittelgehalt gem. ÖN B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018)

Wärmeentwicklungsklasse	Frischbetontemperatur maximal	Maßgebende Expositionsklassen	Betonkurzbezeichnung/ Druckfestigkeitsklasse ^{a,c}	Bindemittelgehalt maximal ^{b,c}
	°C			kg/m ³
WE1	+22	≤ XC3, XW1	für B1: ≤ C25/30	330
		XC4, ≤ XD2, XF1, XF3, XA1L, XA1T	für B2: ≤ C30/37	360
			für B3: ≤ C25/30	
		XW2, XF2	für B4: ≤ C30/37	390
für B5: ≤ C25/30				
XD3, XF4, XA2L, XA2T	für B6: ≤ C35/45	430		
	für B7: ≤ C30/37			
WE2	+27 ^a	≤ XC3, XW1	für B1: ≤ C25/30	330
		XC4, ≤ XD2, XF1, XF3, XA1L, XA1T	für B2: ≤ C30/37	360
			für B3: ≤ C25/30	
		XW2, XF2	für B4: ≤ C30/37	390
für B5: ≤ C25/30				
XD3, XF4, XA2L, XA2T	für B6: ≤ C35/45	430		
	für B7: ≤ C30/37			

^a +32 °C ist zulässig bei Bauteildicken ≤ 30 cm.

^b Bei Überschreitung der angeführten maximalen Bindemittelgehalte ist mit höheren Temperaturen, als in [Tabelle F.1](#) angeführt, zu rechnen.

^c Bei Einhaltung des maximalen Bindemittelgehalts können sich höhere Druckfestigkeiten ergeben.

2.2 Zement als hydraulisches Bindemittel

Nach der Norm EN 197-1, die die Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement regelt, kann Zement wie folgt definiert werden (Austrian Standards Institute 2011):

„Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, d. h. ein fein gemahlener anorganischer Stoff, der, mit Wasser gemischt, Zementleim ergibt, welcher durch Hydratation erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt.“

2.2.1 Klinkermineralogie und Hydratationsreaktionen

Entsprechend der Anteile der sich bei der Zementherstellung bildenden Klinkerphasen ist PZ in das Dreistoffsystem CaO – Al₂O₃ – SiO₂ nach Osborn und Muan (1960) einzuordnen (Hesse, 2009):

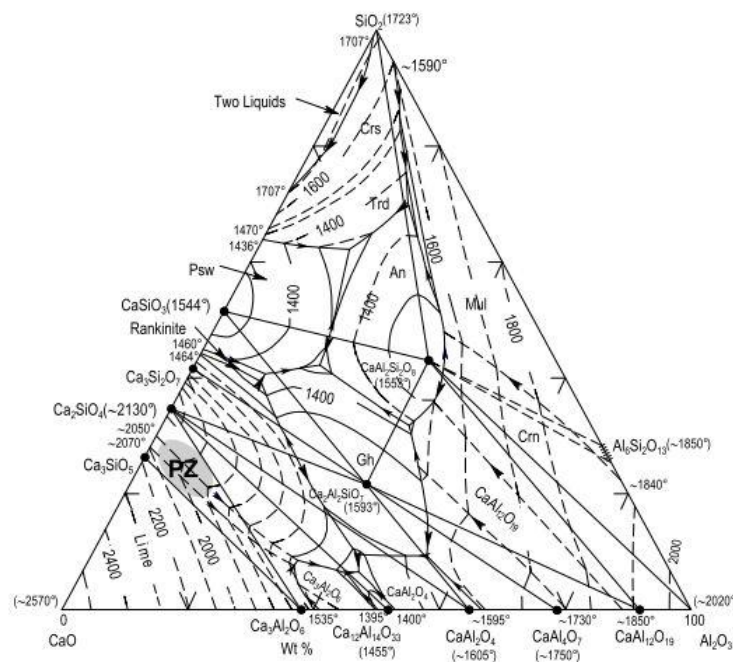


Abbildung 2: Dreistoffsystem CaO - Al₂O₃ - SiO₂ mit der Zusammensetzung für PZ (nach Osborn und Muan (1960))

Vereinfachend ergeben sich bei der Herstellung die folgenden wesentlichen Klinkerminerale, die je nach Zusammensetzung in Calciumsilikate (C₂S, C₃S) und -aluminate (C₃A, C₄AF) unterschieden werden können:

- C₃S: Tricalciumsilikat (3 CaO SiO₂)
- C₂S: Dicalciumsilikat (2 CaO SiO₂)
- C₃A: Tricalciumaluminat (3 CaO Al₂O₃)

$C_4(A, F)$: Calciumaluminatferrit (2 CaO (Al₂O₃, Fe₂O₃))

+ weitere Bestandteile wie freies CaO (Freikalk) oder MgO

Die Reaktion der Klinkerminerale mit Wasser (Hydratationsreaktionen) und die dabei entstehenden wasserhaltigen Verbindungen (= Hydrate) sind für das Erhärten des Zements verantwortlich. Die Hydratation basiert dabei auf folgenden vereinfachten Reaktionsmechanismen:

Silikatreaktionen



Aluminatreaktionen



2.2.2 Ablauf der frühen Hydratation von PZ

Die frühe Hydratation von Zement lässt sich anhand der sich im zeitlichen Verlauf unterschiedlich entstehenden Reaktionswärme in verschiedene Abschnitte unterteilen (Pratt & Ghose, 1983; Taylor, 1997; Locher F. W., 2000):

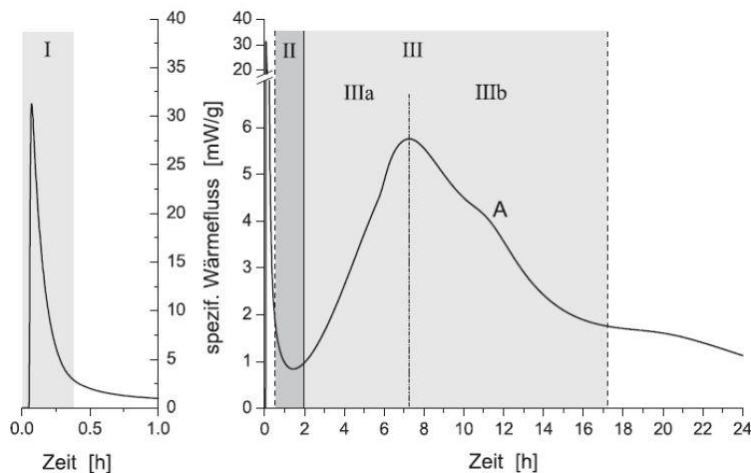


Abbildung 3: Exemplarischer Zeitlicher Verlauf der Portlandzementhydratation anhand der entstehenden Wärme nach Taylor

In der **Initialperiode** (I), die mit der Wasserzugabe beginnt und ca. 30 Minuten dauert, wird Lösungswärme, die durch das Auflösen des Tricalciumaluminats (C₃A) erzeugt wird, freigesetzt. Dabei kommt es zur Erstbildung von Ettringit und die Hydratation der Silikate beginnt (Vgl. Hesse, 2009, S. 15).

Danach wird die **Induktionsperiode** (II) eingeleitet, in der nur geringe chemische Reaktionen stattfinden. Dabei geht man davon aus, dass sich um die C3S Partikel eine blockierende Schicht bildet, die die Hydratation stoppt. Die Hydratation kann erst dann wieder beginnen, wenn sich diese blockierende Schicht aufgelöst hat.

Danach beginnt die **Hauptperiode** (III), die in eine **Beschleunigungsphase** (IIIa) und in eine **Abklingphase** (IIIb) unterteilt wird. In der Hauptperiode werden C3S und C3A abgebaut. Nach der Abklingphase bleibt der Wärmefluss auf einem relativ gleichbleibend niedrigen Niveau, bedingt durch eine durch Diffusionsprozesse gesteuerte Hydratation (Locher F. W., 2000, S.209).

Der Hydratationsablauf von Portlandzement und die im zeitlichen Ablauf entstehenden Hydratationsprodukte wurden bereits in der Vergangenheit sehr detailliert erforscht (u.a. Richartz, 1969) und haben im Prinzip bis heute Gültigkeit. Wie von Richartz beschrieben und hier wiedergegeben, unterteilt sich der frühe Hydratationsprozess im Wesentlichen in drei Phasen bzw. Hydratationsstufen. Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Bildung der verschiedenen Hydratphasen und die gleichzeitig stattfindende Gefügeentwicklung bei der Hydratation des Zements:

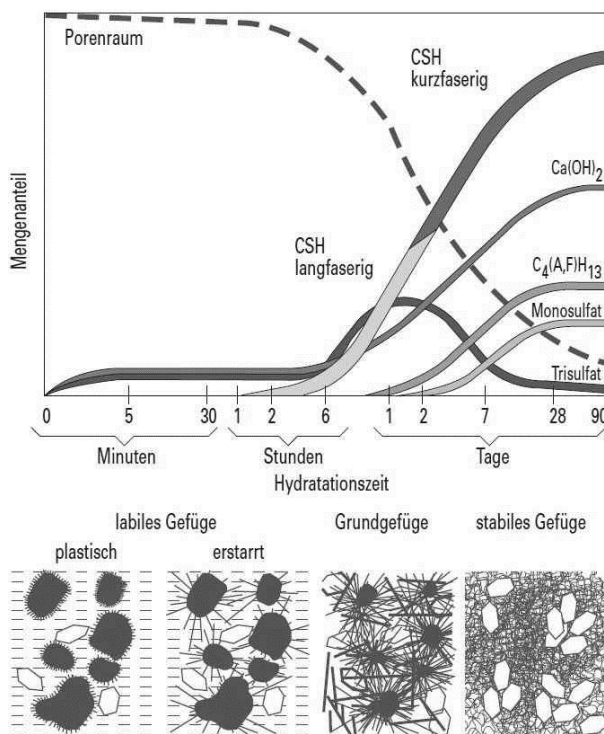


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Bildung der Hydratphasen und der Gefüge Entwicklung bei der Hydratation des Zements (Richartz, 1969)

Die **erste Hydratationsstufe** ist durch eine in den ersten Minuten stürmische Reaktion gekennzeichnet, bei der sich insbesondere Ettringit (Trisulfat, $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{ H}_2\text{O}$) auf den Zementkörnern und Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) bilden. Die dabei entstehende Wärme führt direkt zu einer Erhöhung der Frischbetontemperatur um ca. 1 bis 3 °C (Grube & Hintzen, 1993). Eine Verfestigung ist in dieser Phase noch nicht festzustellen. Anschließend kommen die Reaktionen in der sogenannten Ruheperiode weitgehend zum Stillstand.

Die **zweite Hydratationsstufe** beginnt nach etwa einer Stunde mit der Bildung von zunächst sehr feinen Calciumsilicathydratkristallen (CSH). Bis zu diesem Zeitpunkt hat die Größe der Zementkörner nicht wesentlich abgenommen, weil nur eine dünne Oberflächenschicht an der Reaktion beteiligt war und die neu entstandenen Hydratphasen sehr feinkörnig sind. Die wassergefüllten Zwischenräume zwischen den Zementkörnern haben deshalb noch praktisch die gleiche Größe wie bei Hydratationsbeginn. Infolgedessen haben Calciumsilicathydrat und Ettringit die Möglichkeit, langfaserig zu wachsen und dadurch die Poren zu überbrücken. Die Einzelporen werden dabei mehr und mehr unterteilt. So werden in der zweiten Hydratationsstufe durch den Aufbau eines Grundgefüges weitreichende Verstreubungen geschaffen. Die Endfestigkeit des Zementsteins ist umso höher zu erwarten, je größer der Anteil langfaseriger Calciumsilicathydrate bei sonst gleich dichtem Gefüge ist. Die zweite Hydratationsstufe, die bis zu etwa 24 Stunden andauert, ist daher für die Festigkeitsentwicklung von besonderer Bedeutung. In der zweiten Hydratationsstufe (ca. 6 bis 12 Stunden nach Wasserzugabe) wird bei allen Normzementen die größte Wärmemenge pro Zeiteinheit (=Wärmefluss) freigesetzt (Grube & Hintzen, 1993). Mit dem Abschluss der Hydratationsstufe ist auch die Ettringitbildung beendet, denn nach etwa 24 Stunden ist unter normalen Erhärtungsbedingungen der zugesetzte Gips verbraucht.

Die **dritte Hydratationsstufe** umfasst den Zeitraum von rund einem Tag bis zur vollständigen Hydratation. Dabei werden die noch vorhandenen Poren durch die jeweils entstehenden Hydratationsprodukte mehr und mehr ausgefüllt. Das Gefüge wird dadurch zunehmend dichter und die Festigkeit nimmt weiter zu. Voraussetzung dafür ist, dass im Zementstein das erforderliche Wasser verfügbar bleibt. Anstelle des Ettringits (Trisulfat) entsteht in der dritten Hydratationsstufe Tetracalciumaluminathydrat, in dem ein Teil der Tonerde durch Eisenoxid ersetzt ist. In diesem fortgeschrittenen Hydratationsstadium kann sich Ettringit in Monosulfat umwandeln. Deshalb ist seine Bedeutung für die Endfestigkeit zweifelhaft, mit Sicherheit ist er aber mitbestimmend für die Ausbildung des ersten Gefüges, d. h. für das Erstarren und die Frühfestigkeit des Zements. (Richartz, 1969, S.82ff)

2.2.3 Einflüsse auf die Hydratationswärme von Zement

Die gesamte Hydratation des Zements läuft als Summe exothermer Prozesse ab. Die dabei entstehende Hydrationswärme hängt von mehreren Einflussfaktoren ab. Diese sind im Wesentlichen (Grube & Hintzen, 1993):

- Chemisch-mineralogische Zusammensetzung
- Mahlfeinheit der Ausgangsstoffe

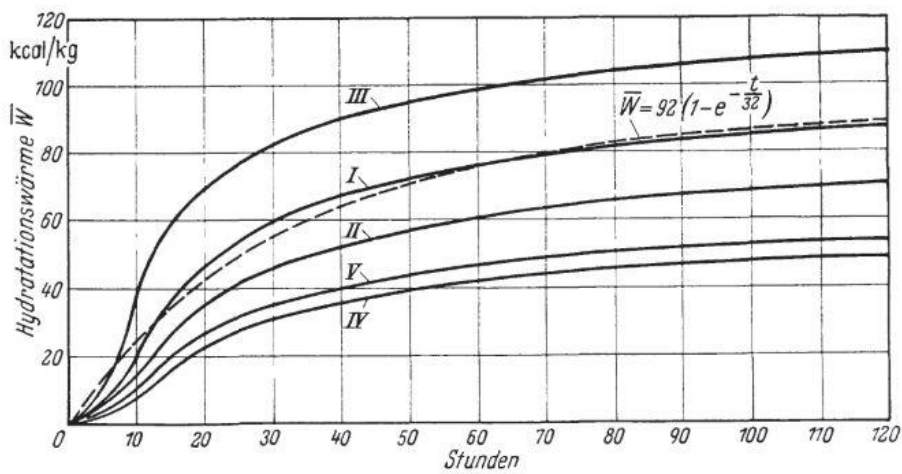
- Lagerung vor dem Verbrauch
- Wasserbindemittelwert
- Anfangstemperatur

Abhängig von der Zusammensetzung des Zements ergeben sich bei vollständiger Hydratation folgende typische Hydratationswärmen (VDZ, 2002):

Portlandzement	375 bis 525 J/g
Portlandhütten- und Hochofenzement	355 bis 440 J/g
Portlandpuzzolanzement	315 bis 420 J/g
Portlandschieferzement	360 bis 480 J/g
Tonerdezement	545 bis 585 J/g

Anhand der dargestellten Hydratationswärmen, die sich für die unterschiedlichen Zemente bei vollständiger Hydratation in Summe ergeben können, wird deutlich, dass sie sich nicht stark voneinander unterscheiden. Für die Wärmeentwicklung von Beton ist jedoch nicht nur der maximale Wärmeeintrag also die kumulative Wärmemenge entscheidend, sondern auch mit welcher Intensität der Wärmefluss bei der Hydratation abläuft und mit welcher Geschwindigkeit sich damit die entstehende Wärmemenge ergibt. Bei gegebenen Wärmeabflussbedingungen hat der sich schneller erwärmende Beton weniger Zeit abzukühlen und erreicht damit höhere Temperaturen als der sich weniger schnell erwärmende Beton.

Bereits in den frühen 30er Jahren konnte anhand von Untersuchungen an Portlandzementen mit unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung ein deutlicher Einfluss auf die Hydratationswärme gezeigt werden. Die folgende Abbildung zeigt den Einfluss auf die entstehende Hydratationswärme am Beispiel der fünf untersuchten Portlandzemente mit unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung (Lerch & Bogue, 1934):



Zusammensetzung

Typ	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	fr. CaO	CaSO ₄
I	49%	25%	12%	8%	0,8%	2,9%
II	46%	29%	6%	12%	0,6%	2,8%
III	56%	15%	12%	8%	1,3%	3,9%
IV	30%	46%	5%	13%	0,3%	2,9%
V	43%	36%	4%	12%	0,4%	2,7%

Abbildung 5: Wärmeentwicklung und mineralogische Zusammensetzung der fünf amerikanischen PZ (Mandry, 1961)

Besonders die Zemente II, IV und V, die einen niedrigen C₃A-Gehalt und dafür einen höheren C₄AF Gehalt aufweisen, zeigen dabei niedrige Hydrationswärmern. Ein niedriger C₃A-Gehalt im PZ kann erreicht werden, indem eisenoxydreiche Rohstoffe für die Herstellung des Zements verwendet werden. (Tonerdemodul $Al_2O_3/Fe_2O_3 \leq 0,64$). Anstelle des C₃A bildet sich dann C₄AF, das eine sehr viel niedrigere Wärmetönung besitzt (Mandry, 1961, S.5). Die folgende Abbildung veranschaulicht die unterschiedliche Wärmeentwicklung der einzelnen Klinkerphasen (Taylor, 1997).

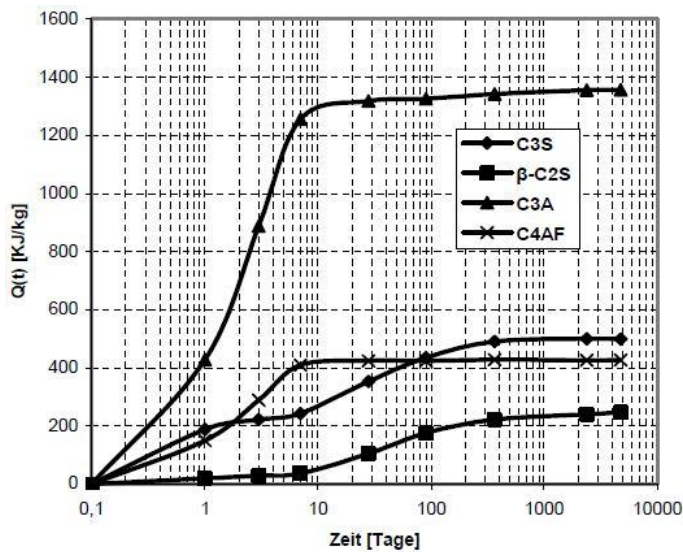


Abbildung 6: Wärmeentwicklung der einzelnen Zementphasen (Taylor, 1997)

Abhängig vom C_3A Gehalt ergeben sich für PZ, der sich aus > 90 M-% (bezogen auf die Gesamtmasse) aus den vier wesentlichen Klinkermineralien zusammensetzt, eine mehr oder weniger hohe Hydrationswärme. Die folgende Abbildung verdeutlicht den Einfluss auf die Wärmeentwicklung:

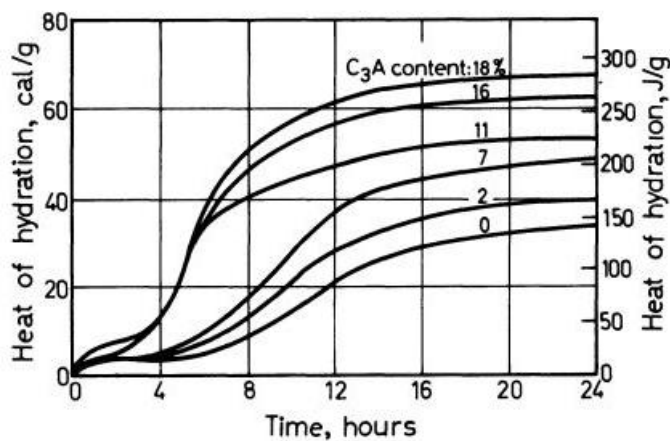


Abbildung 7: Hydrationswärmeentwicklung von PZ bei unterschiedlichem C_3A Gehalt und etwa gleichem C_3S Gehalt nach Lerch und Bogue

Einen wesentlichen Einfluss auf den Ablauf der Wärmeentwicklung hat neben der mineralogischen Zusammensetzung des Zements auch seine Mahlfineinheit. Die Zementindustrie nützt bekanntlich den Umstand beschleunigter Erhärtung durch Feinmahlung zur Herstellung frühhochfester Zemente. Durch die Feinmahlung können die Reaktionen im Zementleim zunächst schneller ablaufen was zu höheren Temperaturen und einer schnelleren Festigkeitsentwicklung führt. Der Grund für die anfangs beschleunigte Reaktion ist die höhere Oberfläche des fein gemahlene Zements, an der das Wasser reagieren kann.

Die Mahlfeinheit von Zement kann beispielsweise durch die massebezogene Oberfläche nach Blaine in cm^2/g beschrieben werden. Zemente mit einer Mahlfeinheit unter $2800 \text{ cm}^2/\text{g}$ gelten als grob, solche über $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ als fein. Als mittlere Mahlfeinheit kann ein Bereich von etwa $2800 - 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ angesehen werden. Sehr feine Zemente haben eine Mahlfeinheit zwischen 5000 und $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (VDZ, 2002).

Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch den Einfluss auf die Hydratationswärmeentwicklung von einem Hochofenzement mit unterschiedlicher Mahlfeinheit:

Tabelle 2: Einfluss der Mahlfeinheit auf die Hydratationswärme eines Hochofenzements nach R. Alègre (Schwiete & Roth, 1973)

Mahlfeinheit nach Blaine (cm^2/g)	Hydratationswärme (cal/g)						
	1 Tag	2 Tage	3 Tage	4 Tage	5 Tage	6 Tage	7 Tage
2040	5	9,5	13	18	20	22	24
3060	10	19	25,5	30	33,5	36	38,5
4060	12,5	24	31	35,5	38,5	41,5	44
5040	18,5	32	39,5	44	47,5	50,5	52,5
5000-6000	20	34,2	41,5	46	49	51,5	53

Wie man den Werten aus der Tabelle entnehmen kann, ergeben sich je nach Mahlfeinheit des Zements unterschiedliche Hydratationswärmen. Dabei zeigt sich am ersten Tag ein deutlich stärkerer Einfluss als am siebten Tag.

Wie aus der folgenden Grafik ersichtlich, hat gerade auch die Anfangstemperatur einen Einfluss auf den Verlauf der Wärmeentwicklung eines PZ. Es besteht ein starker Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit des Zementes mit dem Wasser und der Temperatur. Höhere Temperaturen erhöhen, niedrigere verringern die Wärmeentwicklung.

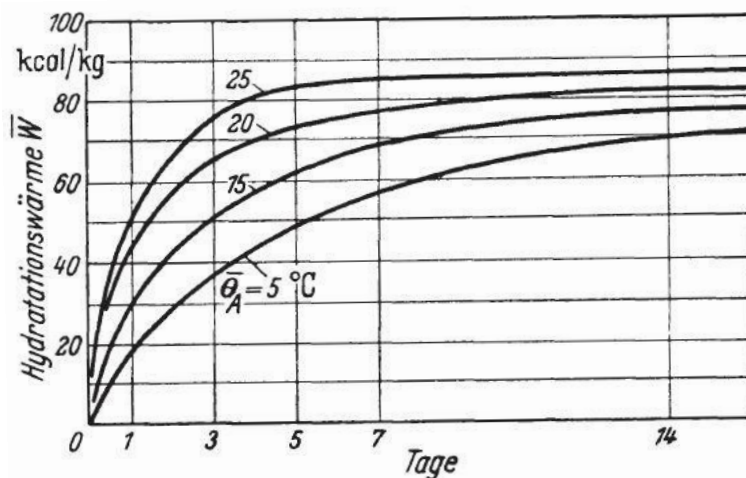


Abbildung 8: Beschleunigung der WE eines PZ durch höhere Anfangstemperaturen (Mandry, 1961)

2.2.4 Zemente mit niedriger Hydratationswärme

Wie bereits beschrieben wurde, gibt es viele grundlegende Einflüsse auf die Hydratationswärmeentwicklung von Zement. Für eine Klassifizierung legt die ÖN B 3327-1 – Zemente gem. ÖN EN 197-1 für besondere Verwendung - Anforderungen hinsichtlich zusätzlichen Zementeigenschaften fest (Austrian Standards Institute 2005). Diese sind u.a. ein garantierter C_3A -Gehalt, ein späterer Erstarrungsbeginn, eine begrenzte Schwankungsbreite der Mahlfeinheit, eine begrenzte Mahlfeinheit und Wasserabsonderung, eine garantierte Druck- und Biegezugfestigkeit nach 1 Tag, usw.

Diese Norm erlaubt eine Einteilung in sogenannte WT-Zemente mit einer begrenzten frühzeitigen Wärmeentwicklung. Die begrenzte frühzeitige Wärmeentwicklung wird nach 15 Stunden ab Wasserzugabe über ein teiladiabatisches Prüfverfahren, das „Langavant-Verfahren“, gem. ÖN EN 196-9 (Austrian Standards Institute 2010) ermittelt und angegeben.

Als Grenzwert für die nach diesem Verfahren ermittelten Hydratationswärmen und für die Klassifizierung als „WT“-Zement werden die in nachstehender Tabelle angegebenen Hydratationswärmemengen gefordert:

Tabelle 3: Einteilung der Zemente nach ihrer Wärmeentwicklung nach 15 h (gem. ÖN B 3327-1)

WT 27 und WT 27 C_3A -frei	< 210 J/g
WT 33 und WT 33 C_3A -frei	< 260 J/g
WT 38 und WT 38 C_3A -frei	< 290 J/g
WT 42	< 310 J/g

Die Hydratationswärme von Normalzementen mit niedriger Hydratationswärme darf den charakteristischen Wert 270 J/g nicht überschreiten. Die Hydratationswärme ist entweder nach 7 Tagen nach EN 196-8 (Lösungswärme) oder nach 41 h nach EN 196-9 („Langavant“) zu bestimmen. Normalzemente mit niedriger Hydratationswärme sind durch das Kurzzeichen „LH“ (low heat) zu kennzeichnen (Bosold & Pickhardt, 2017, S.3).

2.2.5 Prüfverfahren zur Ermittlung der Hydratationswärme

Die Messung der Hydratationswärme ist wichtig für die Beurteilung des Hydratationsablaufs von Zement, um daraus Abschätzungen des möglichen Temperaturanstieges im Beton abzuleiten.

Eine Unterscheidung der Prüfverfahren kann nach den Umgebungsbedingungen der Reaktion in isotherme, adiabatische und teiladiabatische Methoden erfolgen. Bei den isothermen Prüfverfahren verläuft, wie der Name schon sagt, die Reaktion unter konstanten Temperaturen (i.d.R. 20°C). Bei den adiabatischen Methoden findet kein Wärmeaustausch bei der Reaktion statt. Teiladiabatische Methoden zeigen einen praxisnahen Reaktionsverlauf. Die folgende Grafik (Grube & Hintzen, 1993, S.120) veranschaulicht die Hydratationswärmeentwicklung unter isothermen, teiladiabatischen und adiabatischen Bedingungen:

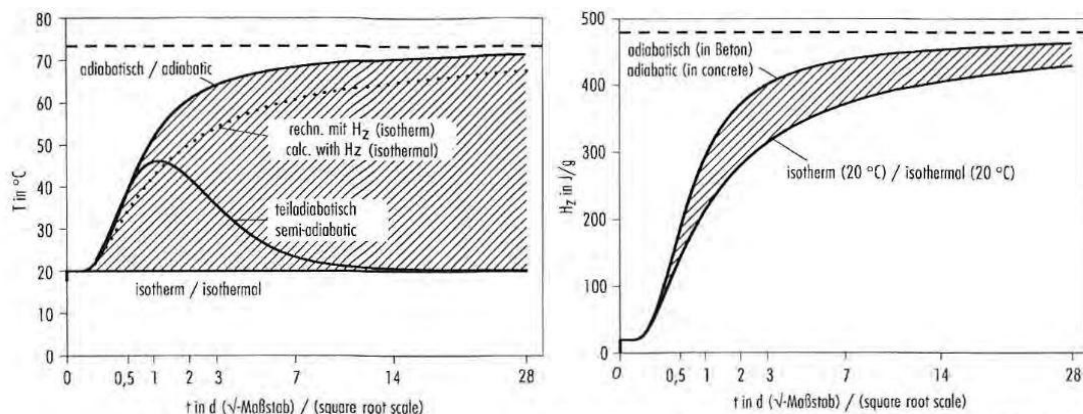


Abbildung 9: Hydrationswärmeentwicklung unter isothermen, teiladiabatischen und adiabatischen Bedingungen (Grube & Hintzen, 1993)

Isotherme Prüfverfahren

Für die Bestimmung der Hydrationswärme von Zement eignen sich u.a. isotherme Prüfverfahren. Bei diesen Verfahren werden die Probekörper-Temperaturen i.d.R. bei 20°C konstant gehalten.

Eine Möglichkeit der isothermen Wärmemessung bietet die Lösungswärmemessung im Lösungskalorimeter gemäß ÖN EN 196-8 (Austrian Standards Institute 2010). Mit diesem Verfahren kann die Hydrationswärmemenge auf indirektem Weg bestimmt werden. Es wird je Zementprobe, jeweils am nicht hydratisierten und am hydratisierten Zement (Zementstein mit $w/b = 0,4$), die Lösungswärme unter Zugabe von Salpeter- und Flußsäure ermittelt. Aus der Differenz der Lösungswärmen ergibt sich die Hydrationswärme $H_z(t)$. Dieses Messverfahren wird gem. einschlägiger Normen u.a. für die Klassifizierung als NW-Zement (NW = niedrige Wärmeentwicklung) bzw. als LH-Zement (LH = „low heat“) angewendet. Die freisetzbare Hydrationswärme $H_z(7)$ nach sieben Tagen soll für eine entsprechende Einordnung 270 J/g nicht übersteigen. Weiters ist dieses Messverfahren gut geeignet, um die insgesamt freisetzbare Wärmemenge $H_z(\infty)$, die nach vollständiger Hydratation erreicht werden kann (auch als Wärmetönung bezeichnet), zu bestimmen. Nachteil dieser Messmethode ist, dass lediglich die Bestimmung der Hydrationswärme zu definierten Zeitpunkten möglich ist und somit kein zeitlicher Verlauf der Wärmeentwicklung gemessen werden kann.

Im Gegensatz zu der Lösungswärmemessung bieten moderne Wärmeflusskalorimeter eine weitere Möglichkeit für die isotherme Wärmemessung. Dieser zählt neben dem Wärmebilanz- und dem adiabatischen Kalorimeter zu den Reaktionskalorimetern, welche in der chemischen Verfahrensentwicklung verwendet werden, um die bei einer Reaktion entstehenden Wärme und den zeitlichen Verlauf der Leistung zu messen. Das Wärmeflusskalorimeter besteht aus einer Laborreaktoranlage mit einem möglichst präzisen Temperaturmesssystem. Ein Manteltemperiersystem sorgt dafür, dass die Reaktor-Innentemperatur konstant gehalten wird. So ergibt sich, dass die, über die Wand, abgeführte Wärmeleistung identisch der bei der Reaktion erzeugten Wärme ist. Im Wärmeflusskalorimeter wird die Temperaturdifferenz zwischen Temperiermantel und Reaktorinhalt gemessen und daraus die über die Wand transportierte Wärmeleistung berechnet. Vorteil dieser Messmethode

ist, dass die Wärmeentwicklung schon ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe kontinuierlich gemessen werden kann. Es ist daher ein gut geeignetes Messverfahren, um die frühen Hydratationsreaktionen anhand der gemessenen Wärmefreisetzung zu untersuchen, da Rückschlüsse auf den Reaktionsverlauf bei der Hydratation gezogen werden können. Dazu werden auch nur wenige Gramm Zement benötigt. Gemessen werden geringste Temperaturerhöhungen in dem wärmeleitenden Träger der Probe. Je weniger Wärme die Probe dabei pro Zeiteinheit entwickelt, umso höher wird die Trägheit des Messsystems und umso ungenauer fallen die Messergebnisse aus. Das Gerät ist somit nicht geeignet, um die insgesamt freisetzbare Wärmemenge $H_z(\infty)$ ausreichend genau zu ermitteln. (Chemie.de, 2019)

Als Nachteil isothermer Messverfahren sollte hier erwähnt werden, dass ein Effekt der beschleunigten Hydratation aufgrund der eigenen Wärmeentwicklung nicht direkt untersucht werden kann, da die Messelektronik des Wärmeflusskalorimeters die Proben auf ein mehr oder weniger konstantes Temperaturniveau (meist 20 °C) reguliert bzw. die Proben auch bei der Lösungswärmemessung bei konstanten Umgebungsbedingungen gelagert werden. In der Praxis ist es bei der Herstellung von Betonbauteilen jedoch so, dass es je nach Bauteilgeometrie und anderen Einflussgrößen wie der Betonzusammensetzung, Bindemittelmenge und -zusammensetzung, Wärmekapazität und Leitfähigkeit und abhängig von den Umgebungs- und Wärmeabflussbedingungen zu mehr oder weniger großen Temperaturerhöhungen und damit zu teiladiabatischen Temperaturverläufen kommt, die wiederum Einfluss auf den Ablauf der Hydratation nehmen.

Adiabatische Prüfverfahren

Adiabatische Kalorimeter zeichnen sich dadurch aus, dass man eine Mörtel- oder Betonprobe in ein Gefäß füllt und dieses in einen weiteren Behälter einbringt. Durch mess- und regeltechnische Einrichtungen wird sichergestellt, dass die Temperatur zwischen Gefäß und Behälter stets dem zeitlichen Verlauf der Betontemperatur entspricht, damit keine Wärme aus der Probe abfließt. Die Temperaturentwicklung in der Probe entspricht dann adiabatischen Bedingungen. Die adiabatische Temperaturentwicklung kann mithilfe der spezifischen Wärme des Betons und des Zementgehalts in Hydratationswärme des Zements umgerechnet werden. (Grube & Hintzen, 1993, S. 125ff)

Teiladiabatische Prüfverfahren

Temperaturverläufe in Betonbauteilen weisen praktisch immer einen teiladiabatischen Charakter auf. Wie die folgende Abbildung am Beispiel Hochofenzement zeigt, ändert sich der Temperaturverlauf je nach Bauteildicke, mit steigender dicke der adiabatischen Wärmeentwicklung an.

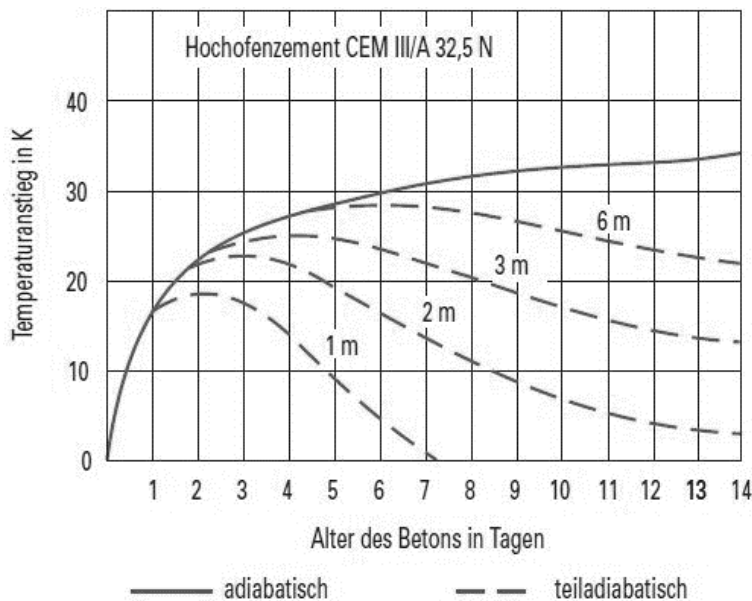


Abbildung 10: Verlauf des Temperaturanstiegs infolge Hydratationswärme im Kern von Betonbauteilen unterschiedlicher Dicke (Basalla, 1963; VDZ, 2002)

Als einfache Möglichkeit zur Bestimmung teiladiabatischer Temperaturverläufe eignen sich beispielsweise Temperaturmessungen an genormten wärmeisolierten Probewürfeln. Im Kapitel Eigene Voruntersuchungen am Beton werden entsprechende experimentelle Versuche aufgezeigt. Eine weitere Möglichkeit bietet das Verfahren nach Langavant.

2.2.6 Klassifizierung von Zement-Zusatzstoffen

Unterscheidung nach Wirkung im Beton

Hinsichtlich der Wirkung im Beton können Feinstoffe in inerte (beteiligen sich nicht an chemischen Vorgängen) und reaktive Stoffe unterteilt werden. Inerte Stoffe beteiligen sich nicht an den chemischen Vorgängen und haben im Wesentlichen nur eine physikalische Füllwirkung und dienen vornehmlich zur Substitution von Zementkörnern bzw. um Hohlräume zwischen den Zementkörnern auszufüllen und damit die Feinstoffpackungsdichte zu erhöhen. Die österreichischen Normen erlauben eine Unterscheidung von Zusatzstoffen nach Typ I (inert) und Typ II (hydraulisch wirksam).

Nach ÖNORM B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018) gelten die folgenden Zusatzstoffe des Typs I als allgemein geeignet:

- Füller nach ÖNORM EN 12620 oder ÖNORM EN 13055
- Pigmente nach ÖNORM EN 12878; für Stahlbeton nur Pigmente der Kategorie B

Als allgemein geeignet gelten die folgenden Zusatzstoffe des Typs II:

- Flugasche nach ÖNORM EN 450-1 (nur Flugasche der Kategorie A; ggf. zusätzliche Nachweise erforderlich bei besonderen Anforderungen an die Frostsicherheitsklasse)
- Silikastaub nach ÖNORM EN 13263-1
- AHWZ aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309 Teil 1-3
- Hüttensandmehl nach ÖNORM EN 15167-1

Beton der nach ÖNORM B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018) hergestellt werden soll, darf, je nach verwendetem Zement und bereits enthaltenen Zusatzstoffen, die in folgender Tabelle gezeigten Höchstgrenzen an Zusatzstoffen (Angaben in [M%-Zement]) nicht überschreiten. Bei der Verwendung von Zusatzstoffen, dürfen diese unter Anwendung des k-Wert-Ansatzes, mit entsprechendem Anrechnungsfaktor k, dem Bindemittel angerechnet werden. Gemäß der Richtlinie „Weiße Wanne“, werden, um die Wärmeentwicklung zu begrenzen, auch höhere Zusatzstoffmengen bis zu 40 M-% empfohlen (AHWZ), die ebenfalls unter Anwendung des k-Wertansatzes dem Bindemittel angerechnet werden dürfen.

Tabelle 4: Erlaubte Zusatzstoffmengen in [M%-BG] gem. ÖN B 4710-1

Normzement	AHWZ nach ÖN B 3309	Hüttensand nach ÖN EN 15167-1	Flugasche nach ÖN EN 450-1	Silikastaub nach ÖN EN 13263-1
CEM I	30%	25%	25%	10%
CEM II/A 32,5	15%	15%	15%	10%
CEM II/A 42,5	20%	20%	20%	10%
CEM II/B 42,5	10%	10%	10%	0%
k-Wert	0,8	0,4	0,4	2

Unterscheidung nach Reaktionsmechanismus

Wie oben geschrieben können Zusatzstoffe nach ihrer Wirkung im Beton in inerte und reaktive Stoffe (= hydr. Wirksame Stoffe) unterschieden werden. Unter hydraulisch wirksamen Stoffen versteht man jene Stoffe, die mit Wasser vermischt an der Luft als auch unter Wasser erhärten und der Einwirkung von Wasser dauerhaft widerstehen können. Eine wesentliche Komponente, die für die Erhärtung der hydraulischen Bindemittel verantwortlich ist, sind die bei der Zementherstellung entstehenden Calciumsilikate (C_2S und C_3S), die durch die Hydratation zu Calciumsilikathydraten reagieren (C-S-H-Phasen). Das Kalk/Kieselsäuregemisch der Silikate (= CaO/SiO_2 - Verhältnis) kann dabei in relativ weiten Grenzen schwanken und hat entscheidenden Einfluss auf die Hydratationsgeschwindigkeit. Abhängig vom CaO/SiO_2 Verhältnis der reaktiven Feinstoffe kann eine Einteilung in hydraulische, latent hydraulische und puzzolanische Stoffe erfolgen, wie folgende Tabelle zeigt:

Tabelle 5: Einteilung der reaktiven Feinstoffe (Teichmann, 2007)

Bindemittel	CaO/SiO ₂ -Verhältnis
hydraulisch	> 2
latent hydraulisch	1 – 1,5
puzzolanisch	< 0,5

Unter einem Puzzolan versteht man einen Stoff, der reaktionsfähige (= amorphe, glasige Struktur) Kieselsäure (SiO₂) enthält und der mit Kalk (CaO) und Wasser (H₂O) gemischt, hydraulisch erhärtet. Den benötigten Kalk beziehen die Puzzolane aus dem Calciumhydroxid, das überwiegend bei der Hydratation von C₃S entsteht. Charakteristisch für die puzzolanische Reaktion ist die gegenüber dem Zementklinker langsame Hydratationsgeschwindigkeit. Bei der Verwendung von puzzolanischen Stoffen kann daher eine längere Nachbehandlungsdauer erforderlich werden, um die Wirksamkeit der Stoffe besser auszunutzen. Die wohl bekanntesten Vertreter der Puzzolane sind sicherlich die Flugaschen (FA), die natürlich in feinverteilter vulkanischer Auswurfmasse (Vulkanasche) vorkommen und schon von den Römern für Wasserbauwerke genutzt wurden. FA fallen auch als Rückstand bei der Verbrennung in Kohlekraftwerken an und können über Elektrofilter aus dem Rauchgas als Sekundärrohstoff gewonnen werden. Weitere puzzolanische Stoffe sind beispielsweise in Deutschland handelsüblicher Trass, Silicastaube, die aus der Silizium Produktion gewonnen werden und getemperte Gesteinsmehle wie Metakaolin.

Latent hydraulische Stoffe wie etwa Hüttensandmehl (HÜS = granuliert, glasige Hochofenschlacke) sind in ihrer chemischen Zusammensetzung den Zementen ähnlicher als Puzzolane und unterscheiden sich von den Puzzolanen insofern, dass sie einen höheren CaO Gehalt aufweisen. Entsprechend dem gegenüber Puzzolanen höheren CaO/SiO₂-Verhältnis, laufen die Reaktionen von latent hydraulischen Stoffen schneller ab. Für die Reaktion mit Wasser benötigen latent hydraulische Stoffe Calciumhydroxid oder Sulfat als Anreger. Im Gegensatz zu den Puzzolanen geht das Calciumhydroxid jedoch keine Bindung ein und wird daher nicht verbraucht.

Unterscheidung nach granulometrischen Eigenschaften:

Eine weitere Möglichkeit Zusatzstoffe zu klassifizieren ist es, eine Einteilung nach granulometrischen Eigenschaften des jeweiligen pulverförmigen Stoffes vorzunehmen. (Spengler, 2006)

Eine Einteilung beispielsweise nach mittlerem Korndurchmesser kann demnach wie folgt definiert werden (Juhart u. a., 2019):

Mikrofüller	$d_{50} \leq 5 \mu\text{m}$
Eco-Füller	$5 \mu\text{m} \leq d_{50} \leq 30 \mu\text{m}$
Makrofüller	$d_{50} > 30 \mu\text{m}$

Mikrofüller, die so klein sind, dass sie zwischen den Zementkörnern die Hohlräume ausfüllen und so die Feinstoffpackungsdichte erhöhen können, unterscheiden sich von den Eco-Füllern die etwa der Größe von technischem Zement (ca. $10 \mu\text{m}$) entsprechen und von den Makrofüllern, die einen größeren Korndurchmesser aufweisen als Zement.

2.3 Festigkeitsentwicklung von Beton

2.3.1 Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung

Fast alle Festbetoneigenschaften werden von der Zusammensetzung der Matrix und dabei maßgebend vom Zementsteinporenraum, d.h. insbesondere vom Wasserbindemittelwert (W/B-Wert) und vom Hydratationsgrad bestimmt. Je kleiner der Zementsteinporenraum, desto höher ist die erreichbare Zementsteinfestigkeit.

Wasserbindemittelwert (W/B – Wert)

Definition:

Der Wasserbindemittelwert ist definiert als das dimensionslose Verhältnis zwischen der Masse des Wassers und des Bindemittels.

$$\frac{W}{B} = \frac{m_W}{m_B} [-] \quad \text{mit:} \quad m_W = \text{Masse Wasser [kg]} \quad \text{Glg. (1)}$$
$$m_B = \text{Masse Bindemittel [kg]}$$

Wirkungsprinzip:

Zementstein wird umso fester, je dichter die Zementkörner beisammen liegen, d.h. je weniger Wasser zwischen den Zementkörnern ist bzw. je niedriger der Wasserzementwert ist. Durch niedrige Wasserzementwerte können höhere Frühfestigkeiten erreicht werden, da die Gelschichten der einzelnen Zementkörner schneller zusammenwachsen. Die Festigkeit nimmt im jungen Alter rascher zu.

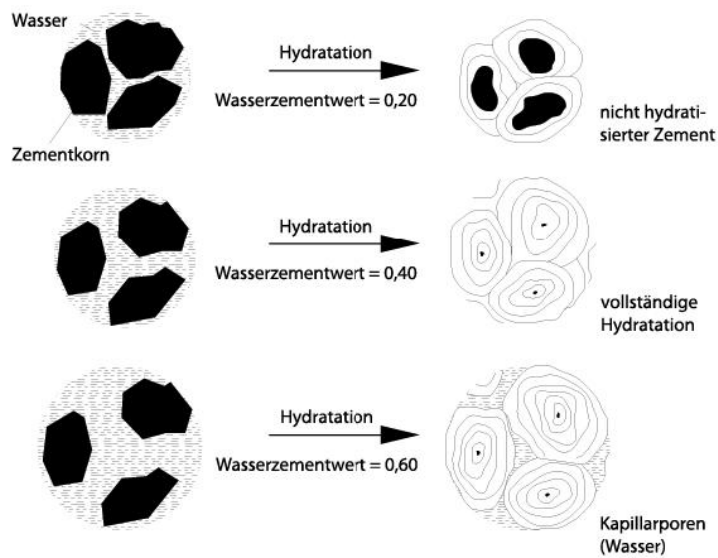


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Erhärtung von Zementen bei verschiedenen Wasserbindemittelwerten (hier als Wasserzementwerte bezeichnet) (Bayer, 1997)

Hydratationsgrad

Der Hydratationsgrad zu einem bestimmten Zeitpunkt t gibt an, wie weit die Hydratation bereits fortgeschritten ist und damit festigkeitsbildend wirkt. Der Hydratationsgrad wird gewöhnlich über Hilfsgrößen wie die Festigkeitsentwicklung oder die Wärmefreisetzung ermittelt. Die folgende Grafik veranschaulicht den Verlauf des Hydratationsgrades mit zunehmendem Hydratationsfortschritt:

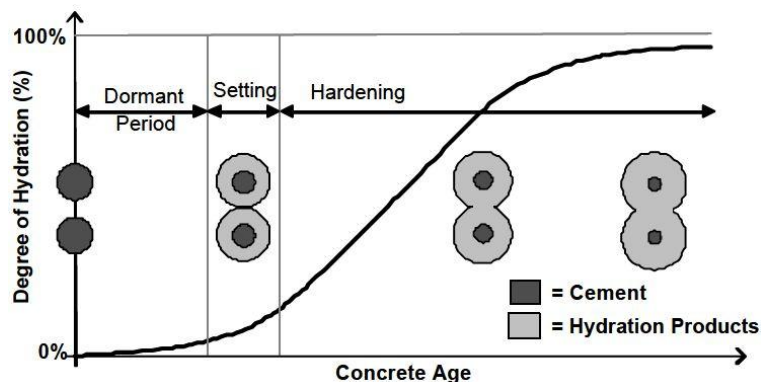


Abbildung 12: Interpretation des Hydratationsgrades (Schindler, 2005, S.3)

2.3.2 Abschätzung der Würfeldruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen

Eine Möglichkeit der raschen Abschätzung der Würfeldruckfestigkeit eines Betons nach 28 Tagen bieten die Kurvenbänder nach Walz(Walz, 1970). Abhängig vom Wasser/Zement-Wert und dem verwendeten Zement mit entsprechender Normzementfestigkeitsklasse, lassen sich die Druckfestigkeiten des Betons im Alter von 28 Tagen grob abschätzen. Folgende Abbildung soll dies verdeutlichen:

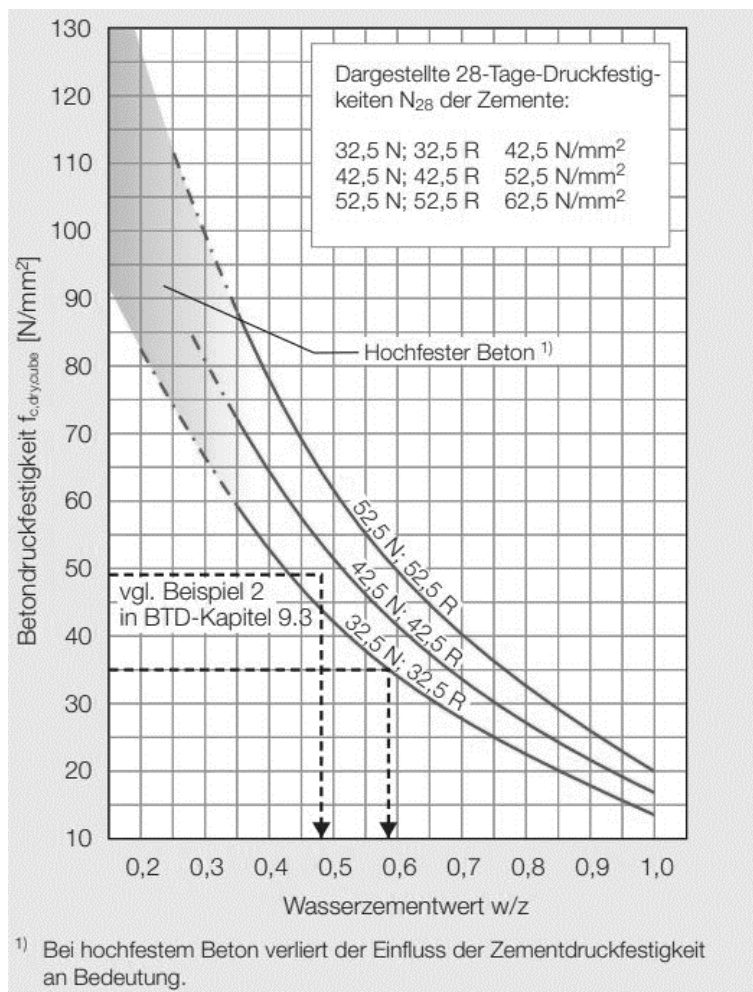


Abbildung 13: Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und der Zementdruckfestigkeitsklasse (Küchlin & Hersel, 2017)

Je höher die Festigkeitsklasse des Zements gewählt wird, desto schneller ist die Festigkeitsentwicklung des Betons. Die Endfestigkeit nach 90 Tagen und mehr ist bei gleichem Wasserbindemittelwert bei Zementen niedriger Festigkeitsklassen höher. Die folgende Tabelle zeigt Literaturwerte für die Festigkeitsentwicklung von Beton je nach verwendeter Festigkeitsklasse des Zements bei 20°C Lagerungstemperatur.

Tabelle 6: Richtwerte für die Festigkeitsentwicklung von Beton aus verschiedenen Zementen bei 20 °C Lagerung

Festigkeitsklasse des Zements nach DIN EN 197-1	Betondruckfestigkeit in % der 28-Tage-Werte nach			
	3 Tagen	7 Tagen	90 Tagen	180 Tagen
52,5 N; 42,5 R	70 bis 80	80 bis 90	100 bis 105	105 bis 110
42,5 N; 32,5 R	50 bis 60	65 bis 80	105 bis 115	110 bis 120
32,5 N	30 bis 40	50 bis 65	110 bis 125	115 bis 130

2.3.3 Modell zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung

Eine einfache Möglichkeit die Festigkeitsentwicklung von Beton als schnell bis sehr langsam erhärtend zu beschreiben ist es, die im jungen Alter erreichte Festigkeit auf die Festigkeit in einem späteren Alter zu beziehen. Der so errechnete Quotient gibt an, wie viel Prozent der späten Festigkeit schon im jungen Alter erreicht werden können. Als für die Praxis taugliche Prüftermine hat sich die Festlegung auf ein Prüfalter von 2 bzw. 28 Tagen als sinnvoll erwiesen. Zwei Tage sind in der Praxis häufig geforderte Ausschalzeitpunkte und unter praxisnahen Lagerungsbedingungen wird nach 28 Tagen die Endfestigkeit nahezu erreicht. Die folgende Tabelle zeigt die Festigkeitsentwicklung anhand der beschriebenen Festigkeits-Quotienten:

Tabelle 7: Festigkeitsentwicklung von Beton bei 20 °C (VDZ, 2002)

Festigkeitsentwicklung	Schätzung des Festigkeitsverhältnisses $f_{cm,2}/f_{cm,28}$ *)
schnell	$\geq 0,50$
mittel	$\geq 0,30$ bis $< 0,50$
langsam	$\geq 0,15$ bis $< 0,30$
sehr langsam	$< 0,15$

*) Verhältnis mittlere Druckfestigkeit nach 2 Tagen zur mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Mit Hilfe des Ansatzes aus dem *fib* Model Code 2010, kann die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit rechnerisch beschrieben werden. (CEB-FIP, 2010; Bergmeister u. a., 2016)

Die Festigkeitsentwicklung von Normal- und Schwebeton kann auf Basis der mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen abgeschätzt werden. Im zeitabhängigen Beiwert $\beta_{cc}(t)$ wird durch Einfügen des Beiwerts s die Festigkeitsklasse des Zements berücksichtigt.

Für die Lagerung bei einer Temperatur von 20°C gilt:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm28}; \quad \beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} := e^{\left\{ s \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right] \right\}} \quad \text{Glg. (2)}$$

mit:

- $f_{cm}(t)$ = mittl. Druckfestigkeit zum Zeitpunkt t in [N/mm²]
- f_{cm28} = mittl. Druckfestigkeit nach 28 Tagen [N/mm²]
- $\beta_{cc}(t)$ = zeitabhängiger Beiwert [-]
- t = Betonalter [d]
- s = Beiwert je nach Zementfestigkeitsklasse

Je nach Festigkeitsklasse eines Normzements sieht der fib Model Code 2010 folgende Beiwerte s für die Bestimmung des zeitabhängigen Beiwerts $\beta_{cc}(t)$ vor (gilt für Beton $f_{cm} \leq 60$ N/mm²). Für Beton mit $f_{cm} > 60$ N/mm² soll $s = 0,20$ angenommen werden.

Tabelle 8: Empfohlene Beiwerte s nach dem fib Model Code 2010

	CEM 52,5 N CEM 42,5 R	CEM 42,5 N CEM 32,5 R	CEM 32,5 N	
s	0,20	0,25	0,38	[-]

Setzt man nun in die Gleichung für $\beta_{cc}(t)$ unterschiedliche Beiwerte s [-] ein, so lassen sich bei selber 28-Tage-Druckfestigkeit ($f_{cm28} = 1$) unterschiedliche Verläufe der Festigkeitsentwicklung beschreiben. Je höher dabei der Beiwert s angenommen wird, desto langsamer entwickelt sich die Festigkeitskurve bezogen auf die Festigkeit nach 28 Tagen.

Beton mit CEM I 52,5 N lässt bekanntlich Aufgrund der höheren Mahlfineinheit des Zements bei sonst gleichen Erhärtungsbedingungen höhere Frühfestigkeiten erwarten als beispielsweise Beton mit CEM I 32,5 N. Diesem Effekt kann mit Hilfe des Beiwerts s Rechnung getragen werden. Die folgende Grafik soll dies veranschaulichen:

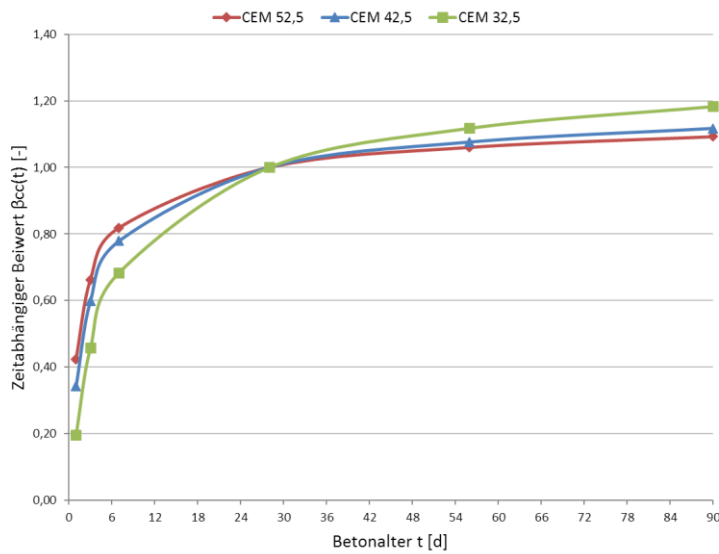


Abbildung 14: Beschreibung der Festigkeitsentwicklung bei unterschiedlichen Zementfestigkeitsklassen mit Glg. (2)

Unterstellt man Betondruckfestigkeiten f_{cm28} in Höhe der Mindestzementfestigkeit entsprechender Zementfestigkeitsklasse, also beispielsweise 52,5 N/mm² nach 28 Tagen für Beton mit CEM 52,5 N, ergeben sich bezogen auf das Betonalter t folgende mittlere Betondruckfestigkeiten $f_{cm}(t)$:

t [d]	CEM 52,5	CEM 42,5	CEM 32,5
	$f_{cm}(t)$ [N/mm ²]		
1	22,25	14,54	6,36
3	34,81	25,43	14,88
7	42,98	33,10	22,23
28	52,50	42,50	32,50
56	55,67	45,73	36,33
90	57,35	47,47	38,45

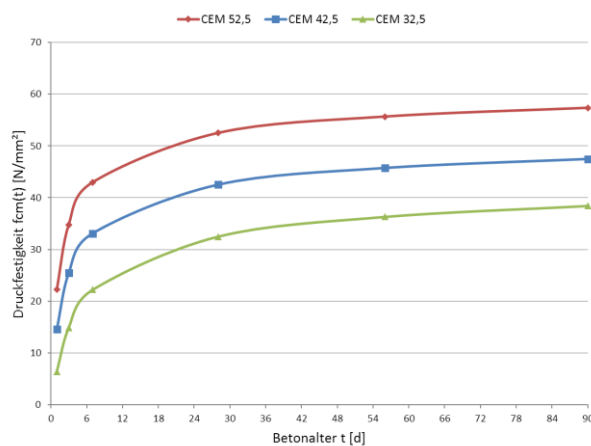


Abbildung 15: Fiktive Festigkeitsentwicklung verschiedener Zemente nach dem fib Model Code 2010

2.3.4 Möglichkeiten zur Steigerung der (Früh)Festigkeit

Nukleationskeimbildung mit CSH Partikeln („Nucleation Seeding“)

Besonders Zemente mit hohem Gehalt an Zusatzstoffen, haben eine geringe Frühfestigkeit auf Grund einer verminderten Hydratationstätigkeit, in den ersten Stunden und Tagen zur

Folge. Die Verwendung von „Seeding“ - Zusätzen mit CSH Nanopartikeln haben ein enormes Potential zur Beschleunigung der Hydratation, das den oben genannten Effekt kompensieren kann, ohne die Langzeitfestigkeit zu beeinträchtigen. (Land, 2017)

Der Grund für die Beschleunigung sind die CSH Nanopartikel die direkt als sekundäre Keimbildungs- oder Wachstumsstellen für die Hydratation fungieren. Gleichzeitig wird der CSH Wachstumsprozess direkt auf den Klinkerpartikeln verlangsamt und dadurch die C_3S Auflösung beschleunigt, was die Hydratation intensiviert. Die folgende Grafik veranschaulicht schematisch die Wirkung durch die Zugabe von „Seeding“ – Zusätzen (Land, 2017; John u. a., 2018):

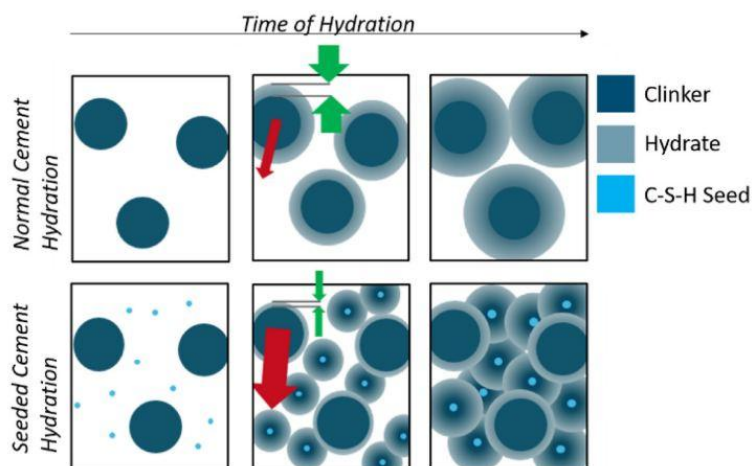


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Zementgelbildung bei beschleunigter Hydratation mit Nano CSH (John u. a., 2018)

Die Zugabe von Calciumsilikathydrat in Nanogröße zu den Zementpasten führt zu einer erhöhten Hydratation und Verkürzen die Induktions- und Ruheperiode. Dabei wird die Intensität der Hydratation, also der Wärmefluss bis zu 120% gesteigert und sie setzt auch bis zu 85% früher ein. Der stärkste Effekt wird bei einer Zugabe von 4% Seeding-Mittel erzielt was in der nachstehenden Abbildung (links) gut ersichtlich ist. Die Abbildung (rechts) zeigt auch, wie sich der Wärmefluss durch Zugabe von CSH Nanopartikeln mit unterschiedlicher Korngröße verändert:

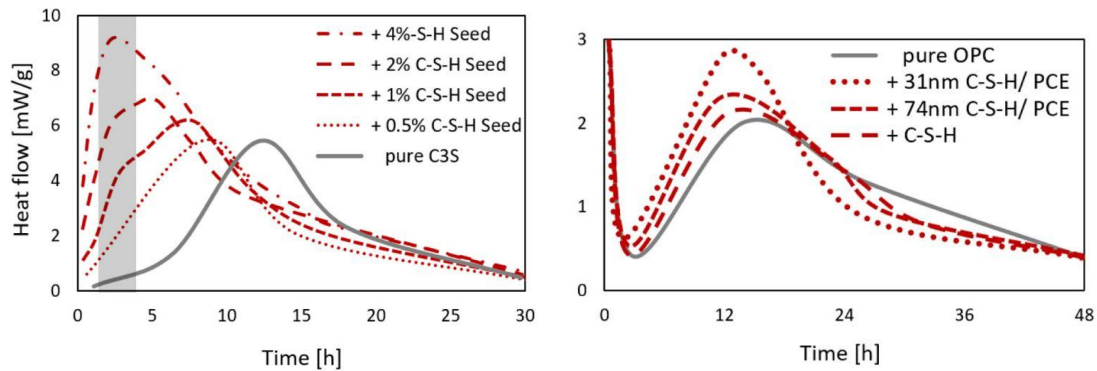


Abbildung 17: Effekt der beschleunigten Hydratation bei Verwendung von Nano CSH anhand von Wärmeflusskurven (John u. a., 2018)

Seeding-Mittel kommen vor allem dort zum Einsatz, wo eine schnelle Frühfestigkeit besonders wichtig ist. Sie sind auch eine Alternative für die Wärmeentwicklung, zur raschen Erreichung der erforderlichen Frühfestigkeit, von Betonteilen bei Fertigbetonwerken.

Karbonatisierung von Frischbeton („Early Age Carbonation“)

Die Karbonatisierung von Frischbeton kann durch die gezielte Einwirkung von CO₂-Gas die Betoneigenschaften verbessern. Die Karbonatisierungsreaktion bei der frühen Hydratation trägt zu einem dichteren und frühesten Beton bei.

Wirkungsprinzip:

Nach dem Einblasen in den Frischbeton reagiert das CO₂ unter Anwesenheit von Wasser mit Calcium-Ionen (Ca²⁺) aus dem Zement zu einem nanogroßen Calciumcarbonat-Mineral (CaCO₃), das dauerhaft in den Beton eingebettet wird.

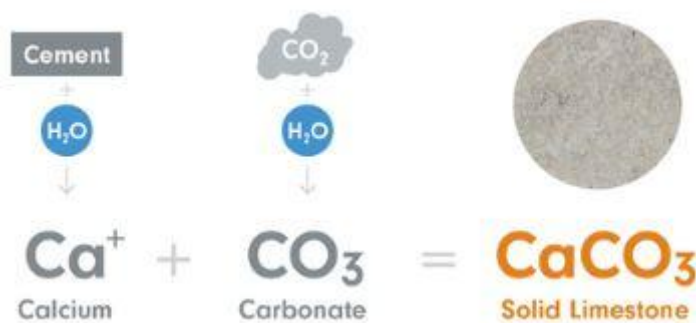
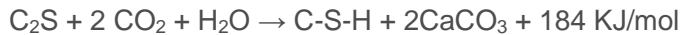


Abbildung 18: Wirkungsprinzip bei der frühen Karbonatisierung im frischen Beton (<https://www.carboncure.com/technology>)

Die allgemeine Reaktion von Kohlendioxid mit Tricalcium- und Dicalciumsilikatphasen im Zement wurde schon 1974 beschrieben als (Young u. a., 1974):





Die Karbonatisierungsreaktion des Frischbetons läuft dabei in 9 Schritten ab (Bertos u. a., 2004S. 196):

1. Der Frischbeton wird mit CO_2 Gas beaufschlagt.
2. Das Kohlendioxid diffundiert in die luftgefüllten Poren des Frischbetons
3. Das CO_2 löst sich in der flüssigen Phase des Frischbetons
4. Hydratation von CO_2 zu H_2CO_3
5. Ionisierung von H_2CO_3 zu H^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} . Dieser Vorgang führt zu einem fallenden pH Wert der sich später wieder erholt.
6. Auflösung der Zementphasen C_3S und C_2S . Die Zementkörner sind von einer losen Schicht aus CSH Gel bedeckt, die sich unter Freisetzung von Ca^{2+} und SiO_4^{4-} auflöst.
7. Nukleation von thermodynamisch stabilem CaCO_3 und konventionelle Bildung von CSH-Phasen.
8. Das CaCO_3 fällt als Feststoffphase aus. Calcit ist das bevorzugt entstehende Polymorph.
9. Es kommt auch zu einer sekundären Karbonatisierung. Eine anhaltende Reaktion von Kohlendioxid und dem Zementleim kann auftreten. CSH, das durch die parallele frühe Hydratation gebildet wurde, entkalkt und erzeugt ein Calciumarmes Gel.

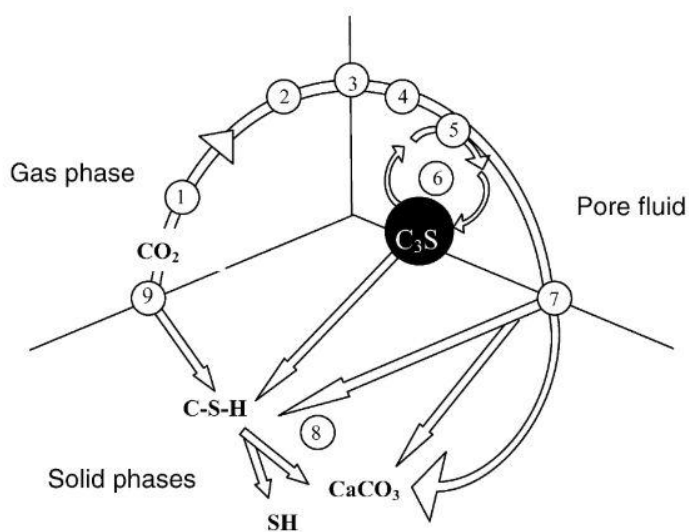


Abbildung 19 Schematische Darstellung der beschleunigten Karbonatisierung (Bertos u. a., 2004S. 196; Lim u. a., 2010S. 205)

In Kanada wird dieses Verfahren von der Firma Carboncure zur Verbesserung von Frischbetonen angewendet. Dabei soll es möglich sein, bis zu 8% Zement einzusparen und gleichzeitig durch die Karbonatisierung zusätzlich CO₂ zu binden.

Eine weitere Anwendung ist von der Firma Carbicrete bekannt, die sogar Beton aus 100% HÜS herstellt, der in geschlossener CO₂ Atmosphäre unter Druck ausgehärtet wird. Da dieses Verfahren mehr CO₂ bindet als es verbraucht, hat es sehr viel mediale Aufmerksamkeit und auch Umweltpreise erhalten. Da nur Platten hergestellt werden und auch auf Grund des Ansatzes nur HÜS zu verwenden, ist anzunehmen, dass die pH-Werte eines so erzeugten Betons für Bewehrung aus Betonstahl, mangels Bildung von Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und des Verbrauchs von Calciumhydroxid durch den CO₂-Eintrag, nicht geeignet sind.

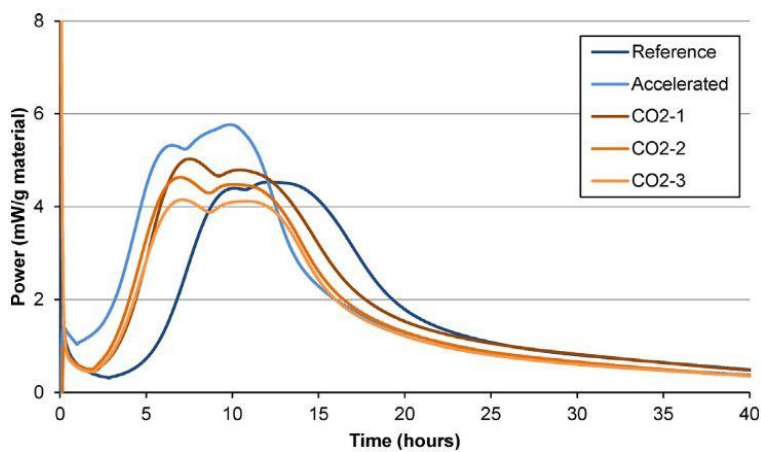


Abbildung 20: Steigerung der Wärmeintensität durch CO₂-Eintrag

2.4 Ökologische Betrachtung

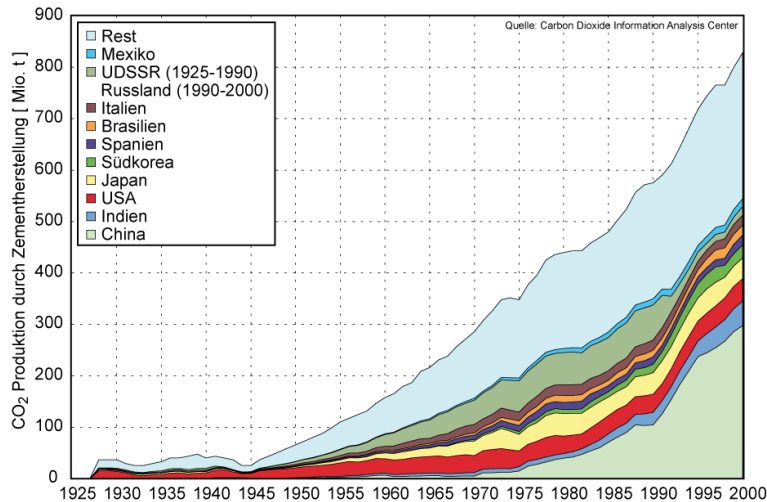


Abbildung 21: Jährlicher weltweiter CO₂-Ausstoß aufgrund von Zementherstellung (Von de: Florian.Arnd - CDIAC, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1144301>)

Wie aus der Grafik ersichtlich, sind die Kohlendioxid Emissionen durch das starke Ansteigen der Zementproduktion weltweit, in den letzten Jahrzehnten drastisch gestiegen. Durch moderne Filteranlagen, die die Staubemission senken, sowie die Weiterentwicklung der Drehrohröfen und der Feuerungstechnologie konnte der spezifische Energieverbrauch und der Ausstoß schädlicher Abgase wie Schwefeldioxid (SO₂), Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Stickoxid (NO_x) je Tonne Zement in den letzten Jahren verringert werden.

Zur Einsparung fossiler Brennstoffe wie Kohle, Erdgas und Erdöl werden zum Teil sogenannte Sekundär- oder Ersatzbrennstoffe eingesetzt. Diese alternativen flüssigen und festen Brennstoffe wie Altöl, wie auch aufbereiteter Haus- und Gewerbemüll, Autoreifen, Altholz oder Biomassen werden im Drehrohrföfen aufgrund extrem hoher Temperaturen ohne die Entstehung zusätzlicher schädlicher Abgase verbrannt. In ganz Europa ist man daher bestrebt, den Anteil sogenannter Sekundärbrennstoffe im Zementwerk bis auf ca. 70 % zu bringen.

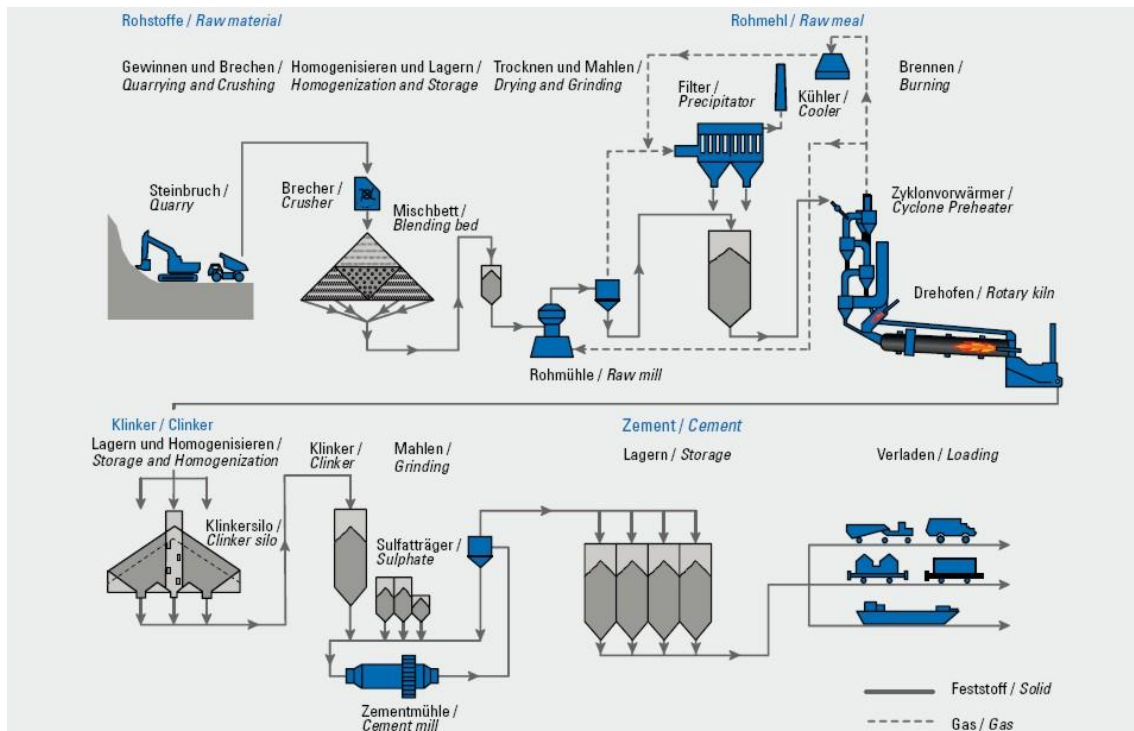


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses vom Steinbruch bis zum Versand (VDZ, 2018)

Die Zementindustrie gehört zu den Hauptemittenten von Kohlendioxid, die zur Erderwärmung beitragen. Weltweit werden jährlich 4,1 Milliarden Tonnen Zement hergestellt. Damit ergibt sich durch das Freisetzen des im Kalk gebundenen Kohlendioxids, das ca. 60% der CO₂ Emissionen ausmacht und durch den Wärmebedarf der ca. 40% ausmacht, ein Ausstoß von mindestens drei Milliarden Tonnen CO₂, das etwa 6% des jährlichen CO₂-Ausstoßes ausmacht. Um die Vorgaben des Pariser Klimaabkommens zu erfüllen, müssten die jährlichen Emissionen der Zementindustrie bis zum Jahr 2030 um mindestens 16 Prozent sinken. Dementsprechend werden Überlegungen angestellt, Zement mit umweltverträglicheren Methoden herzustellen (VDZ, 2018).

Da ein Großteil der heute produzierten Zemente sogenannte Kompositzemente sind, in denen Klinker durch andere Zuschlagstoffe zu gewissen Anteilen ersetzt wird, werden natürliche Rohstoffe geschont. Außerdem handelt es sich bei diesen Zuschlagstoffen, beispielsweise beim Hüttensand und der Flugasche, um Rest- und Abfallstoffe aus anderen Industriezweigen. So ist die Produktion von CEM I Zementen in Deutschland in den letzten 10 Jahren um ca. 50% zurückgegangen, die Produktion von CEM III Zementen hingegen um ca. 100% gestiegen. Gleichzeitig gibt es auch einen Trend hin zu feiner gemahlten Zementen. (VDZ, 2018)

Zur Bewertung der Baustoffe werden sogenannte Öko Bilanzen erstellt, die den gesamten Lebenszyklus der eingesetzten Baustoffe betrachten, deren Basis die Ökobilanz Kriterien wie Treibhauspotential, Ozonschichtstörungspotential, Primärenergiebedarf sind. Beim klassischen Beton ergibt sich z.B. das Treibhauspotential zu ca. 95% aus dem Zementgehalt. (VDZ, 2018)

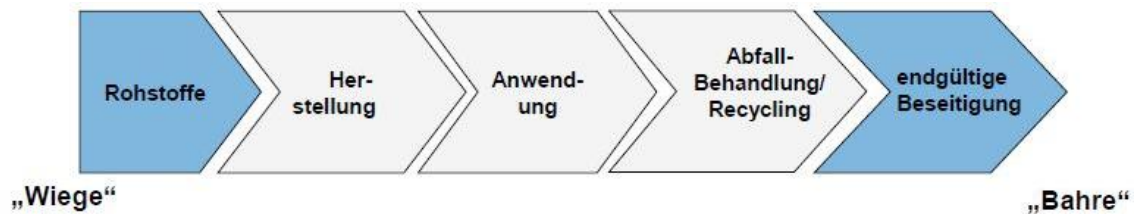


Abbildung 23: Gesamte Lebenszyklusbetrachtung der eingesetzten Baustoffe (Proske, 2012, S.8)

Bei der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden beispielsweise mit dem DGNB Zertifikat, das die Nachhaltigkeit nach ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Aspekten beurteilt, hat der Werkstoff Beton einen wesentlichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis.

Um umweltfreundlichere Betonbauteile zu entwickeln, spielen die Herstellung der Ausgangsstoffe, die Betontechnologie und die Baukonstruktion bzw. der Bauprozess eine wesentliche Rolle. In der Betontechnologie kann man durch eine höhere Packungsdichte, die Verwendung von Sekundärrohstoffen und reaktiveren Bindemitteln einen Beton mit geringerem Treibhauspotential erzeugen.

Um einen ökologischeren Beton zu erzeugen ist es wichtig den richtigen Zement auszuwählen, der sich durch höhere Festigkeit und ökologische Hauptbestandteile mit wenig Treibhauspotential auszeichnet. Dabei ist zu beachten, dass es eine begrenzte Verfügbarkeit von ökologischen Bestandteilen des Zements, wie z.B. des Hüttensandes geben kann.

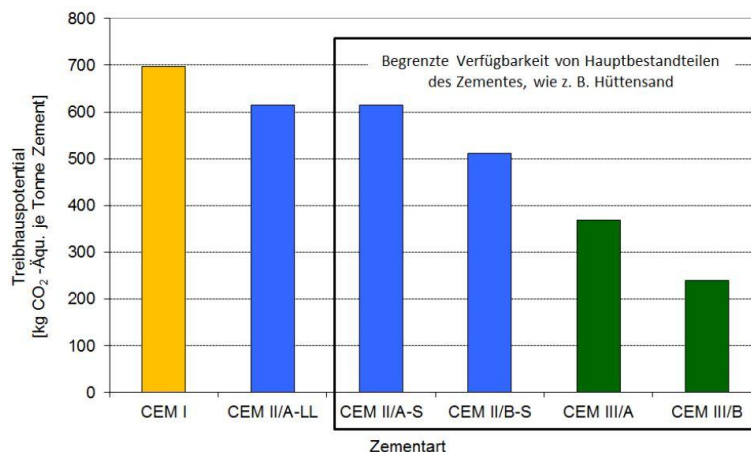


Abbildung 24: Treibhauspotential unterschiedlicher Zemente (Proske, 2012, S.16)

Als zweiten Schritt soll durch eine Reduktion des Wasserzementwerts durch die Reduktion von Wasser und auch Zement, bei gleichzeitiger Zugabe von Fließmitteln und Optimierung der Packungsdichte aller Feststoffe unter der Zugabe von inerten und reaktiven Betonzusatzstoffen die gleiche Druckfestigkeit erreicht werden, wie beim Ausgangsbeton. Dabei gilt es zusätzlich darauf zu achten, dass auch eine ausreichende Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit erreicht wird.

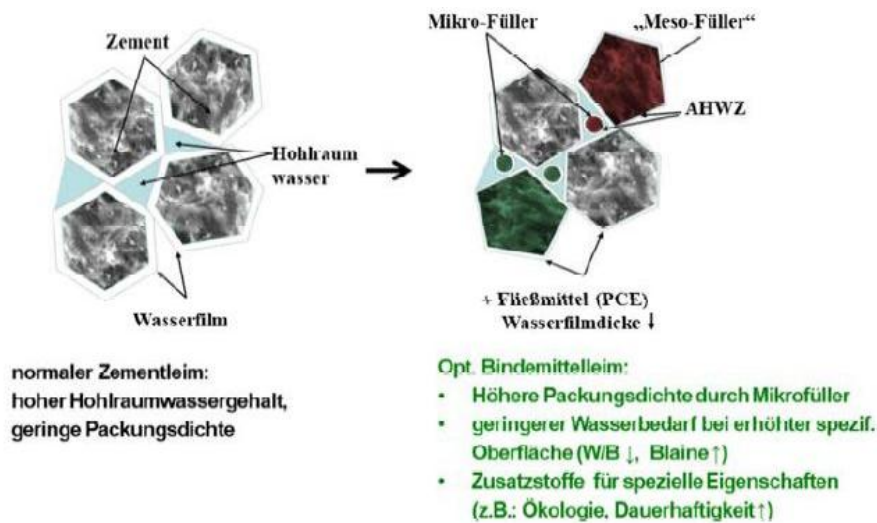


Abbildung 25: Feinstoffe im Beton – Optimierung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs (Juhart u. a., 2015, S.20)

In der folgenden Grafik, die die Druckfestigkeit, den Zementgehalt und die Umweltwirkung in den einzelnen Phasen der Optimierung zeigt, ist das betontechnische Prinzip noch einmal grafisch dargestellt.

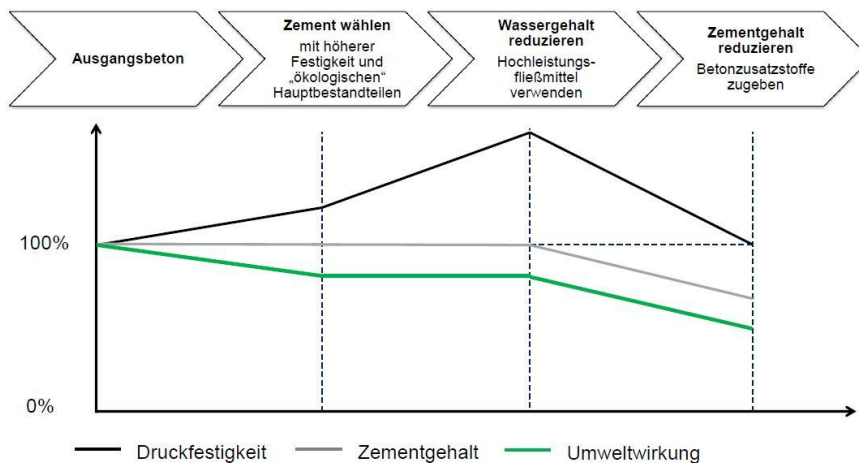


Abbildung 26: Umweltwirkung in den einzelnen Phasen der Optimierung (Proske, 2012, S.18)

Umweltwirkung unterschiedlicher Betonausgangsstoffe

Der Primärenergieverbrauch oder auch PEI (Primary Energy Input) ist ein wesentlicher Faktor bei der Ermittlung des Treibhauspotenzials, dass bei Beton im Wesentlichen das Kohlendioxid betrifft. Die nächste Abbildung (links) zeigt den Primärenergiebedarf für diverse benötigte Ausgangsstoffe (Juhart u. a., 2015):

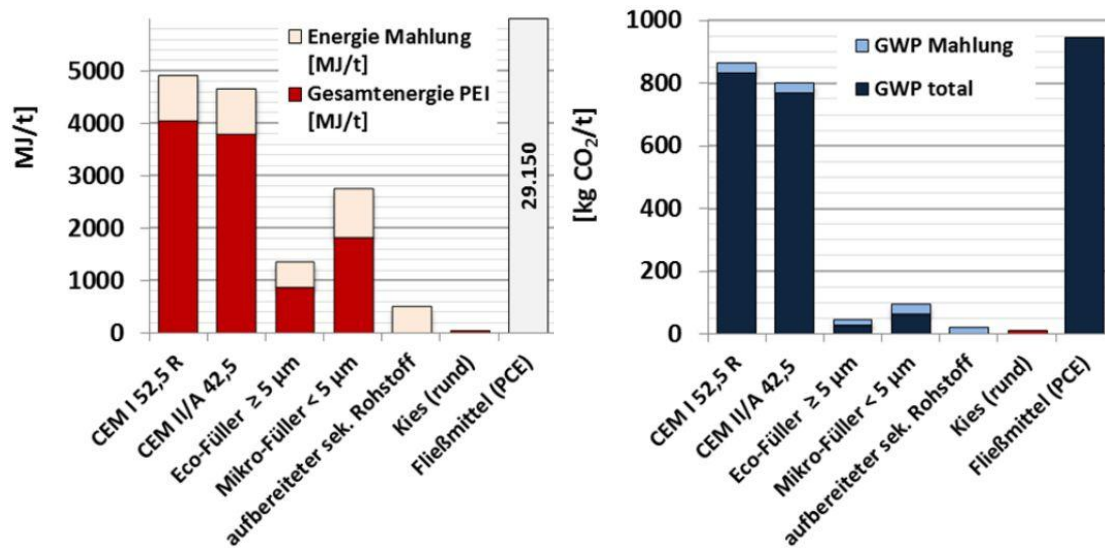


Abbildung 27: Primärenergieverbrauch PEI (links) und Treibhauspotenzial GWP (rechts) verschiedener Betonausgangsstoffe (Juhart u. a., 2015)

Das Treibhauspotenzial (GWP) wird in Relation zum Treibhausgas Kohlendioxid angegeben und beschreibt den Beitrag von Gasen zur Erderwärmung. Die Einheit des GWP ist [kg CO₂-equ.] (IPCC, 2007).

2.5 Ökonomische Betrachtung

Angesichts der enormen Zunahme des Kohlendioxid Ausstoßes bei der Zementproduktion, stellt sich die Frage, inwieweit mögliche Reduktionen beim CO₂ Ausstoß wirtschaftlich gefördert werden können. Das zentrale Steuerungselement für diese wirtschaftlichen Anreize sollte eigentlich der EU-Emissionshandel sein, wo CO₂ Zertifikate gehandelt werden.

In der jetzigen Phase 3 des EU-Emissionshandels, der auch die Zertifikatzuteilung für die Zementindustrie regelt, erhalten die Zementwerke je Tonne Zement 766 kg CO₂ Zertifikate nach dem „Grandfathering Prinzip“ gratis zugeteilt (de.wikipedia.org/wiki/Emissionsrechtehandel).

Da dies ziemlich genau dem CO₂ Bedarf von CEM I Zement entspricht, entsteht durch den Emissionshandel nahezu kein Allokationseffekt, der die Einsparung von CO₂ forciert. Da bisher durch die Gratiszuteilung nahezu keine Kostenerhöhung beim Zementhersteller durch die Zertifikate stattfindet, war der Druck bisher gering, CO₂ Einsparungen zu forcieren. Da für die „alternativen Brennstoffe“, die z.B. in Deutschland bereits 2/3 der zugeführten Energie ausmachen, keine CO₂ Zertifikate benötigt werden, fällt die Bilanz natürlich noch besser aus (VDZ, 2018). Aufgrund des in Deutschland bereits überwiegenden Einsatz von „alternativen“ Brennstoffen, sind die Zementwerke inzwischen eigentlich Müllverbrennungsanlagen mit angeschlossener Zementproduktion.

Bei einem aktuellen Listenpreis von €121.- pro Tonne, für einen CEM I Zementklinker, der einem CO₂ Äquivalent von ca. 700 kg (in Österreich 830 kg (Juhart u. a., 2015)) entspricht, war für lange Zeit (siehe Abb.28) der CO₂ Zertifikatspreis gerade einmal € 5.- pro Tonne

Zement, der jedoch nicht zu zahlen war, weil man die Zertifikate ja kostenfrei zugeteilt bekommt. Wenn ein CEM III/A Zement erzeugt wird, der einem CO₂ Äquivalent von ca. 370 kg entspricht, so konnte man gerade einmal € 2,3 pro Tonne CEM III/A Zement durch Verkauf der eingesparten Zertifikate einnehmen.

Alleine wenn man den Chart betrachtet (www.eex.com), sieht man schon die Schwächen des Systems. Da gibt es von zu geringen Preisen, über starke Schwankungen bis hin zu Mini-Crash-Szenarien alles zu sehen. Zeitweise musste die Börse sogar wegen Unregelmäßigkeiten geschlossen werden. Deshalb hat man sich durchgerungen, die Börse neu aufzustellen. Da eigentlich angedacht war, den Preis durch Verknappung der Zertifikate kontinuierlich, bis zu einem gewissen Preisniveau zu steigern, ist man inzwischen dazu übergegangen, den Zertifikatspreis mittels Kurspflege durch gezielte Zertifikatskäufe und Verkäufe zu steuern. Es werden auch weniger Gratiszertifikate ausgegeben und ein Teil der Zertifikate versteigert. Nur wenn es gelingt, einen gleichbleibenden entsprechend hohen „Zielkurs“ zu halten, der Investitionen in CO₂ Einsparungen attraktiv macht, wird das System funktionieren.

Zusätzlich könnte man sich überlegen, ob man nicht, bei „Massenbetonprojekten“ die ohnehin meist vom Staat beauftragt und finanziert werden, Betone mit weniger CO₂ Bedarf vorschreibt bzw. bevorzugt.

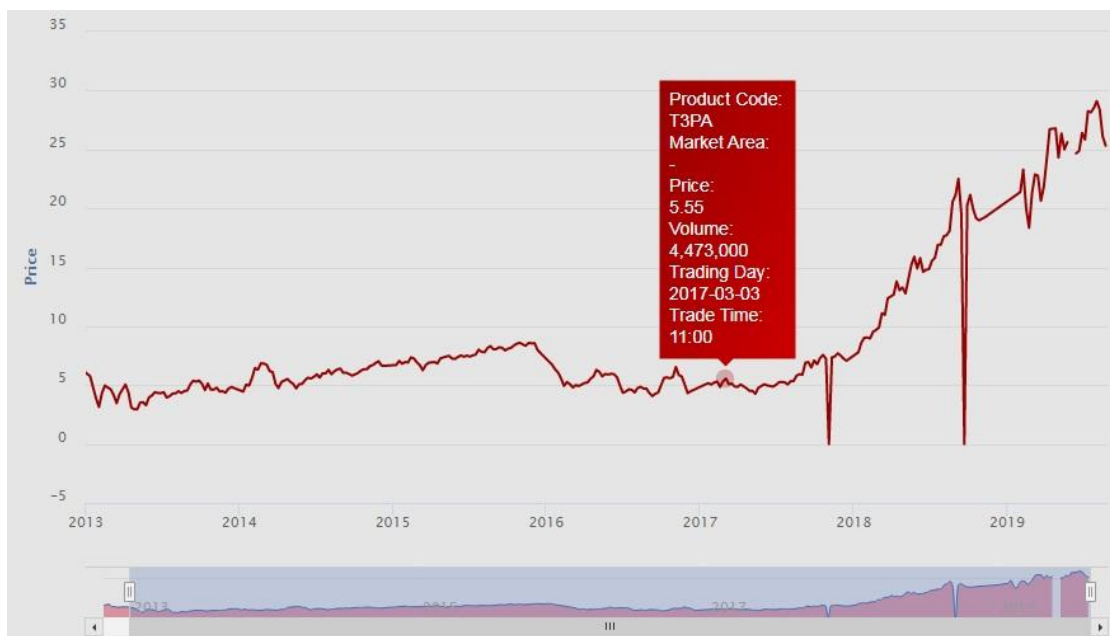


Abbildung 28: Kursverlauf der CO₂ – Zertifikate (European Energy Exchange (EEX), 2019)

Erst in den letzten zwei Jahren sind die Preise für die Zertifikate, auf Grund von massiven Änderungen im bisher unzureichenden System, bis auf aktuell rd. € 25,- gestiegen (siehe Abbildung oben).

Die Einsparung pro Tonne CEM III/A Zement macht so € 8,25 aus. Da die Vergütung ja auf Basis 766 kg CO₂ pro Tonne entspricht, ergibt dies bei einem CEM III/A Zement, der laut

Preisliste auch gleich wie der CEM I € 122.- kostet, eine „Einsparung“ von gerade einmal 6,5%.

Wenn man davon ausgeht, dass die aufbereitete Hochofenschlacke als Zuschlagstoff im CEM III/A günstiger sein muss, als der Zementklinker beim CEM I, dann werden in diesem Fall die geringeren Kosten, durch Zertifikatsverkauf und geringere Materialkosten durch HÜS Zusatzstoffe, nicht an den Kunden weitergegeben. Das erschwert zusätzlich die gewünschte verstärkte Verwendung von CO₂ reduzierten Zementen.

3 Ausgangsstoffe

Im folgenden Kapitel werden die Ausgangsstoffe, die für die Versuche verwendet werden beschrieben und charakterisiert. Die angegebenen Daten basieren teils auf eigenen Untersuchungen und teils auf Basis von Untersuchungen, die bereits zuvor im Rahmen von Arbeiten am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie durchgeführt wurden (Briendl, 2017; Heinrich, 2018; Prielinger, 2019). Als weitere Datenbasis dienen die Angaben der Hersteller lt. Datenblatt und Auskünften per Email. Die verwendeten Normzemente wurden mittels quantitativer Röntgendiffraktometrie (XRD) chemisch-mineralogisch untersucht. Außerdem konnten von allen Stoffen Partikelgrößenverteilungen (particle size distribution - psd) mittels lasergranulometrischen Messungen erhoben werden.

3.1 Zemente

Für die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen wurden vier verschiedene Zemente ausgewählt und für die untersuchten Bindemittelzusammensetzungen verwendet. Zum Einsatz kamen zwei Portlandzemente (CEM I), die sich grundlegend in ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung unterscheiden, ein Portlandkompositzement CEM II/A-M(S-L) mit hohem amorphen Anteil (überwiegend HÜS) und auch hohem Gehalt an KSM, und ein spezieller Hochofenzement CEM III/A, der ebenfalls ähnliche Mengen HÜS, jedoch weniger KSM als Zumahlstoff enthält. Die einzelnen handelsüblichen Zemente werden im Folgenden näher beschrieben.

CEM I 52,5 R

Technische Daten des Zements lt. Datenblatt des Herstellers:

Druckfestigkeit nach:

1 Tag:	ca. 27 N/mm ²
2 Tagen:	ca. 42 N/mm ²
28 Tagen:	ca. 64 N/mm ²
Mahlfeinheit (Blaine):	ca. 5000 cm ² /g
Erstarrungsbeginn:	ca. 110 min
Dichte:	ca. 3,13 cm ³ /g

CEM I 42,5 R - SR0 WT27 C₃A-frei

Technische Daten des Zements lt. Datenblatt des Herstellers:

Druckfestigkeit gem. EN 196 am Mörtelprisma nach:

1 Tag:	ca. 13 N/mm ²
2 Tagen:	ca. 25 N/mm ²

28 Tagen:	ca. 56 N/mm ²
Mahlfeinheit (Blaine):	ca. 4000 cm ² /g
Erstarrungsbeginn:	ca. 210 min
Hydratationswärme:	ca. 24 K Temperaturanstieg gem. ÖN B 3303
Dichte:	ca. 3,17 g/cm ³

CEM II/A-M(S-L) 42,5 N - WT38

Der für die Untersuchungen herangezogene Portlandkompositzement CEM II/A-M (S-L) hat neben dem PZ, Hüttensand und Kalksteinmehl als Zumahlstoff enthalten.

Technische Daten des Zements lt. Datenblatt des Herstellers:

Druckfestigkeit (Normenprüfung gem. ÖN EN 196) nach:

1 Tag:	ca. 15 N/mm ²
2 Tage:	ca. 27 N/mm ²
28 Tage:	ca. 54 N/mm ²
Mahlfeinheit (Blaine):	4200 cm ² /g
Erstarrungsbeginn:	ca. 170 min
WE nach 15 h:	ca. 260 J/g
Dichte:	ca. 3,03 cm ³ /g

CEM III/A 52,5 R

Bei diesem Zement handelt es sich um einen speziellen Hochofenzement. Laut Angaben des Herstellers enthält der Zement rund 60% CEM I 52,5 R und rund 40% HÜS. Der nach Norm für CEM III/A festgelegte max. Anteil von 64 M% Zementklinker wurde den Angaben zufolge annähernd ausgeschöpft. Der Zement ist granulometrisch optimiert. Abgestufte Anteile von Hüttensandmehlen sollen ein dichtes Gefüge und hohe Beständigkeiten sicherstellen.

Laut Datenblatt des Herstellers verspricht der ausgewählte CEM III/A Zement außerdem hohe Frühfestigkeiten sowie Endfestigkeiten.

Technische Daten lt. Datenblatt:

Druckfestigkeit gem. EN 196 am Mörtelprisma nach:

2 Tagen:	ca. 34 N/mm ²
7 Tagen:	ca. 60 N/mm ²
28 Tagen:	ca. 77 N/mm ²
Erstarrungsbeginn:	ca. 208 min

3.2 Quantifizierung der Zement Bestandteile

Die für die Untersuchungen ausgewählten Zemente wurden mittels quantitativer Röntgendiffraktometrie (XRD) analysiert. Die mineralogische Zusammensetzung der verwendeten Zemente wurde am Institut für Angewandte Geowissenschaften an der Technischen Universität Graz bestimmt. Neben den in nachstehender Tabelle gezeigten Bestandteilen, waren auch noch weitere Materialien wie Periklas, Magnetit, Muskovit, Kaolinit (weitere siehe digitaler Anhang), Teil des Strukturmodells für die durchgeführte Rietveld Analyse, jedoch ergaben diese Materialien keine Übereinstimmung und werden daher auch nicht dargestellt. Da sich alle für diese Arbeit untersuchten Bindemittelzusammensetzungen aus 100 oder 60 M-% Normzement zusammensetzen werden die Ergebnisse für eine bessere Übersichtlichkeit wie folgt dargestellt:

Tabelle 9: Mineralogische Zusammensetzung der für die Untersuchungen verwendeten Zemente mittels XRD-Messung ermittelt (Angaben in M-%)

Normbezeichnung	CEM I	CEM I	CEM II/A-M	CEM III/A	CEM I	CEM I	CEM II/A-M	CEM III/A
	52.5 R	42.5 R SR0	(S-L) 42.5 N	52.5 R	52.5 R	42.5 R SR0	(S-L) 42.5 N	52.5 R
Material	100% Normzement				60% Normzement			
Calcit	0	2,4	9,5	3,8	0	1,4	5,7	2,3
Dolomit	0	0	0	0,6	0	0	0	0,4
Gypsum	4,4	1	1,2	2,6	2,6	0,6	0,7	1,6
Anhydrit	0,1	2,2	1,6	0	0,1	1,3	1,0	0
Bassanit	2	1,8	1,1	1,8	1,2	1,1	0,7	1,1
Alit C ₃ S M3	68,8	55,9	40,1	40,8	41,3	33,5	24,1	24,5
Belit β-C ₂ S	6,2	19,1	6,3	5,5	3,7	11,5	3,8	3,3
Aluminat C ₃ A c	4,1	0,3	2,8	3,3	2,5	0,2	1,7	2,0
Aluminat C ₃ A o	7,7	1,4	2,6	3,4	4,6	0,8	1,6	2,0
Ferrit C ₄ AF	4,1	14,5	4,2	0,2	2,5	8,7	2,5	0,1
Aphtitalit	0	0	0	0	0	0	0	0
Arkanit	0	0,6	0,9	3,6	0	0,4	0,5	2,2
Portlandit	0	0,3	0,2	0	0	0,2	0,1	0
Freikalk CaO	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	2,7	0,5	0	0	1,6	0,3	0	0
Quarz	0	0	0,2	0	0	0	0,1	0
Amorph	0	0	29,5	34,3	0	0	17,7	20,6
SUM	100	100	100	100	60	60	60	60
Klinker	93,6	92,0	56,2	53,2	56,2	55,2	33,7	31,9
Kalzium-Sulfat	6,5	5	3,9	4,4	3,9	3,0	2,3	2,6
Alkali-Sulfat	0,0	0,6	0,9	3,6	0,0	0,4	0,5	2,2
Inerte Stoffe	0	2,4	9,7	4,4	0	1,4	5,8	2,6
Amorph	0	0	29,5	34,3	0	0	17,7	20,6

Die Summe der einzelnen Klinkermineralien Alit (C₃S), Belit (C₂S), Aluminat (C₃A) und Ferrit (C₄AF) inkl. dem Portlandit, Freikalk CaO und freiem MgO, ergeben den in der Tabelle ausgewiesenen Klinkergehalt. Die beiden Portlandzemente CEM I setzen sich erwartungsgemäß zu einem Großteil aus Klinker zusammen, nämlich 92,0% beim CEM I 42,5 R – SR0

und 93,6% beim CEM I 52,5 R Zement. Der in der ÖN EN 197-1 (Austrian Standards Institute 2011) geforderte Mindestklinkergehalt von 95 M-% für PZ wird gemäß der Analyse nicht ganz erreicht. Der verwendete Hochofenzement CEM III/A und der Portlandkompositzement CEM II/A-M (S-L) weisen einen deutlich niedrigeren Klinkergehalt von 53,2 M-% bzw. 56,2 M-% auf. Spätestens hier fällt auf, dass der im CEM II/A-M (S-L) enthaltene Klinkergehalt deutlich tiefer ist als Normgemäß ausgewiesen und zunächst angenommen. Von besonderem Interesse im Hinblick auf die Festigkeits- und Wärmeentwicklung ist jedoch nicht nur der absolute Klinkergehalt im Zement, sondern auch die Verteilung der einzelnen Hauptklinkerminerale:

Tabelle 10: Klinkerverteilung bezogen auf den Gesamtklinkergehalt im jeweiligen Zement

Norm-Zement	CEM I 42.5 R - SR0	CEM I 52.5 R	CEM III/A 52.5 R	CEM II/A-M (S-L) 42.5 N
100% Klinker				
C3S	61,3	75,7	76,7	71,6
C2S	20,9	6,8	10,3	11,3
C3A	1,9	13,0	12,6	9,6
C4AF	15,9	4,5	0,4	7,5

Hier fällt besonders auf, dass der „C₃A-freie“ Zement CEM I 42,5 R SR0 WT27 nicht nur einen sehr geringen Gehalt an C₃A, sondern auch einen deutlich niedrigeren C₃S Gehalt, gegenüber den anderen Zementen aufweist. Der C₂S und C₄AF Gehalt fällt dafür entsprechend höher aus. Die Hydratationsreaktion von C₂S läuft um ein Vielfaches langsamer ab, als die von C₃S. Je nach Modifikation des C₂S, ist die Hydratation von C₃S um das 3 bis 10 fache schneller (Jelenic u. a., 1978).

Alle nicht dem Klinker zugerechneten Bestandteile werden als Nebenbestandteile zusammengefasst und beinhalten auch den Sulfatträger, welcher als Erstarrungsregler dem Zement zugemahlen wird. Der Sulfatträger setzt sich aus den CaSO₄ Verbindungen Gips, Bassanit und Anhydrit zusammen und schwankt bei den untersuchten Zementen zwischen 3,9 und 6,5 M-%. Der Sulfatträgergehalt sollte erfahrungsgemäß 5 M-% nicht übersteigen, um eine späte Ettringit Bildung (= Sekundärettringitbildung) und damit einhergehende Treiberscheinungen zu vermeiden. Die als Überbegriff zusammengefassten unterschiedlichen Calciumsulfate nehmen, je nach Art und Beschaffenheit Einfluss auf die Hydratationsgeschwindigkeit der Silikate C₂S und C₃S. Sowohl der Gehalt an SO₃ - Sulfationen als auch die Reaktivität der Sulfate spielt dabei eine wichtige Rolle (Hesse, 2009; Häcker und Benz, 2000). Die Reaktivität der Sulfate hängt wiederum von deren Löslichkeit und einhergehenden Einflüssen auf die Löslichkeit, wie der Temperatur (Löslichkeit sinkt mit steigender Temperatur) und dem pH-Wert, ab (Hesse, 2009).

Als inerte Bestandteile können Dolomit, Kalkstein (Calcit CaCO₃) und Quarz als Gesteinsmehle zusammengefasst werden. Diese liegen bei den untersuchten Zementen zwischen 0 und 9,7 M-%.

Der Portlanditgehalt (Ca(OH)_2) ist neben den Alkali Sulfaten wie beispielsweise Arkanit (K_2SO_4), überwiegend für den hohen pH-Wert im Beton verantwortlich. Der ermittelte Ca(OH)_2 Feststoffgehalt (Luftkalk) ist bei allen untersuchten Zementen verschwindend gering und wurde dem Klinker hinzugerechnet.

Freies Magnesium Oxid (MgO) liegt beim reinen Portlandzement CEM I 52,5 R mit 2,7 M-% etwas höher. Das freie MgO ist derjenige Anteil im Zement, der nicht in den Klinkermineralien eingebaut vorliegt. Der Gehalt sollte 5 M-% bezogen auf den glühverlustfreien Zementklinker nicht übersteigen, da sich sonst die Gefahr des unerwünschten Effekts des Magnesiatreiben erhöht. Etwaige MgO-Anteile wurden dem Klinker zugerechnet.

Für die Bestimmung des amorphen Anteils im Zement, wurde den Zement Präparaten für die Messungen eine bestimmte Menge eines hochkristallinen Stoffes hinzugefügt, der später bei der Auswertung (Rietveld-Analyse) entsprechend berücksichtigt wurde. So konnte der amorphe Anteil im Zement bestimmt werden, der auf den Gehalt an Hüttensand und anderen amorphen Bestandteilen wie Flugasche im Zement schließen lässt.

Die durchgeführte XRD-Analyse ergab zusammenfassend teils gute Übereinstimmungen und teils andere Ergebnisse als von den Zementherstellern angegeben. Laut Angaben der Hersteller der im Folgenden tabellarisch gezeigten Zemente, wurden die Bestandteile gem. ONR 29196-4 – Prüfverfahren für Zement - Quantitative Bestimmung der Bestandteile (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2008) durchgeführt. Die Zusammensetzungen wurden sulfatträgerfrei angegeben:

Tabelle 11: Zementzusammensetzung gem. ONR 29196-4 ermittelt (Angaben der Hersteller)

Normzement	Bestandteile (sulfatträgerfrei)						
	Stoffbez.:	Σ	Klinker	HÜS	KSM	FA	QM
CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT38	[M-%]	100	81	9	8	2	0
CEM I 42,5 R – SR 0 WT27 C3A-frei		100	97	3	0	0	0

Die in der Tabelle angegebenen Bestandteile der beiden Zemente basieren also auf Grundlage nasschemischer Analyseverfahren die von einschlägigen Normen für die Bestimmung der Bestandteile und die Klassifizierung als Normzement vorgesehen sind. So müssen die Bestandteile grundsätzlich nach den in EN 196 beschriebenen Prüfverfahren bestimmt werden (Also gem. ÖN ENV 196-4 bzw. ONR 29196-4). Möglicherweise kommt es unter Anwendung unterschiedlicher Prüfverfahren zu stärkeren Divergenzen. Dem sollte nachgegangen werden.

Was die Zusammensetzung des CEM III/A 52,5 R Zement betrifft, wurde auf Nachfrage vom Hersteller per Email angegeben, dass sich der Zement aus rd. 60% CEM I 52,5 R und rd. 40% HÜS zusammensetzt. Die Angaben decken sich relativ gut mit der durchgeführten mineralogischen Untersuchung. Auffallend bei diesem Zement ist neben seiner hohen Mahlfineinheit (siehe Partikelgrößenanalyse) ein nicht geringer Anteil von 3,8% Calcit. Der inerte Füllstoff wird bei diesem und auch den anderen Zementen möglicherweise als Mikrofüller zur Optimierung der Packungsdichte genutzt. Beim untersuchten CEM II/A-M (S-L) Zement war ein besonders hoher Calcit Anteil von 9,5 % festzustellen.

Für den CEM I 52,5 R Zement lagen keine Herstellerangaben über die Bestandteile vor.

3.3 Verwendete Zusatzstoffe

Hüttensand (HÜS)

Hüttensand wird aus Hochofenschlacke durch Aufbereitungsprozesse wie Feinmahlung gewonnen. Die chemischen Hauptbestandteile der Hochofenschlacke sind ähnlich dem PZ. Diese sind CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO und Fe_2O_3 . Der für die Untersuchungen verwendete HÜS weist eine Mahlfeinheit nach Blaine von etwa 4000 auf.

Kalksteinmehl (KSM)

Kalksteinmehle sind inerte Füllerstoffe, die nicht oder nur im geringen Maße mit den Zementbestandteilen reagieren. Hauptaufgabe der Füllerstoffe ist es, die Zwischenräume zwischen den Zementpartikeln auszufüllen und so den Wasseranspruch zu senken, bzw. die Packungsdichte zu erhöhen. Grundsätzlich kommen als Füllerstoffe viele Gesteinsmehle in Betracht, aufgrund der leichten Mahlbarkeit kommen heute aber fast ausschließlich Kreide-, oder Kalksteinmehle zur Anwendung. Das Calciumcarbonat CaCO_3 im Kalkstein beteiligt sich jedoch auch an den Hydratationsreaktionen des PZ. Unter Anwesenheit von Wasser bildet es gemeinsam mit Tricalciumaluminat (C_3A) Monoaluminatcarbonathydrat ($3 \text{CaO} \text{ Al}_2\text{O}_3 \text{ CaCO}_3 \cdot 11 \text{H}_2\text{O}$) oder Hemicarboaluminathydrat

Das verwendete Kalksteinmehl besteht zu 99,9% aus Calcit.

Calciumcarbonat – wässrige Suspension (KSM Susp.)

Bei diesem Stoff handelt es sich um ein sehr feines Kalksteinmehl, das in Form einer wässrigen Suspension vorliegt. Der Feststoffgehalt der verwendeten Suspension beträgt lt. Herstellerangaben 75 M-%. Der in der Suspension enthaltene Wassergehalt wurde bei den Mörtelmischungen hinsichtlich des wirksamen Wassergehalts berücksichtigt und dem Mörtel wurde entsprechend weniger Anmachwasser zugegeben.

Metakaolin (MK)

Metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) ist ein pulverförmiger Stoff aus der Gruppe der Puzzolane. Ausgangsstoff für Metakaolin ist Kaolin, welches hauptsächlich (40-70%) aus Kaolinit ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) besteht. Die Nebenbestandteile von Kaolin sind unter anderem Quarz, Muskovit ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) und Rutil (TiO_2). Die Herstellung von MK erfolgt durch einen Brennvorgang, bei dem das Kaolin auf 650-900°C erhitzt (kalziniert) wird.

Quarzmehl (QM)

Quarzmehle gehören, wie Kalksteinmehle, in die Gruppe der inerten Füllerstoffe. Sie werden durch Nass- oder Trockenvermahlung von Quarzsanden hergestellt. Hauptanwendung von Quarzmehlen ist wärmebehandelter UHPC. Die bei RT inerten Quarzkörner beteiligen sich bei sehr hohen Temperaturen an der Hydratation und bilden C-S-H Phasen. Als Maß für die Reaktivität von Quarzmehlen gilt der Amorphisierungsgrad. Dieser kann mittels Röntgendiffraktometrie bestimmt werden. Je höher dieser ist, desto schneller und bei niedrigeren Temperaturen reagieren die Quarzpartikel.

Das in den Untersuchungen verwendete Quarzmehl (QZ-16900) hat einen etwa doppelt so großen mittleren Korndurchmesser als die verwendeten Zemente. Das Quarzmehl ist daher gut geeignet um Zementpartikel zu substituieren, nicht aber um kleine Hohlräume zwischen den Zementpartikeln auszufüllen, um so die PD des Korngemisches zu erhöhen. Laut Herstellerangaben ist das Quarzmehl durch Trockenvermahlung hergestellt und chemisch inert. Der SiO_2 - Anteil liegt bei >98 M%.

Aufbereitete hydraulisch wirksame Zusatzstoffe (AHWZ)

AHWZ - Kombinationsprodukt ausgewählt gem. ÖN B 3309 – 1 (Austrian Standards Institute 2010). Für die Anrechenbarkeit sogenannter Kombinationsprodukte als Bindemittel sieht die Norm einen k-Wert von 0,8 vor.

Laut Angaben des AHWZ-Herstellers besteht der Zusatzstoff zu 70 % aus HÜS, zu 15 % aus FA und zu 15 % aus KSM. In einer vorangegangenen Untersuchung die im Rahmen einer Masterarbeit (Heinrich, 2018) durchgeführt wurde, ergab sich eine vergleichbare Zusammensetzung mit 66 % HÜS, 19% FA und 15 % KSM (Analyse nach ONR 29196-4). Auch die durchgeführte Röntgendiffraktometrieanalyse einer weiterführenden Masterarbeit (Prielinger, 2019) ergab 16 % inerte Stoffe (13,7 % Kalkstein CaCO_3 und 2,3 % Quarz SiO_2) und 84 % hydraulisch wirksame Stoffe, was die Zusammensetzung des AHWZ wiederum bestätigt. Das AHWZ "Supermix C" setzt sich somit aus 66 – 70 M-% HÜS, 15 – 19 M-% FA und inertem Gesteinsmehl (überwiegend Kalksteinmehl) zusammen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick:

Tabelle 12: Bestandteile des verwendeten AHWZ

AHWZ - Zusammensetzung					
Stoffbez.:	Σ	HÜS	KSM	FA	QM
[M-%]	100	66	13,7	18	2,3
	40	26,4	5,5	7,2	0,9

Technische Daten des AHWZ lt. Datenblatt des Herstellers:

Mahlfeinheit (Blaine): ca. $5000 \pm 250 \text{ cm}^2/\text{g}$

Aktivitätsindex 28d: $\geq 90\%$

Kornrohddichte: ca. $2,75 \pm 0,15 \text{ g}/\text{cm}^3$

3.4 Zusatzmittel

Neben den verwendeten Zusatzstoffen wurden teilweise auch Zusatzmittel bei den Untersuchungen eingesetzt, um die Beton- und Mörtel Eigenschaften gezielt zu beeinflussen. Dabei kamen Fließmittel und Erhärtungsbeschleuniger zum Einsatz.

Fließmittel (FM)

FM bewirkt im Frischbeton durch Absenkung der Wasserfilmdicke eine starke Verflüssigung und ermöglicht damit niedrigere Wasserbindemittelwerte bzw. Betonzusammensetzungen mit geringem Wasseranspruch bei ausreichender Verarbeitbarkeit herzustellen. Als FM wurde ein Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) verwendet.

Weitere Daten lt. Datenblatt des Herstellers:

Dichte	1,06 g/cm
pH-Wert	ca. 4
Chloridgehalt	≤ 0,10 %
Alkaligehalt (Na ₂ O-Äquivalent)	≤ 1,0 %
Dosierbereich	0,4 – 1,8 % vom Zementgewicht

Für die untersuchten Betonsorten wurden zwischen 0,37 bis 0,70 % bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt $B_G = 318,6 \text{ kg/m}^3$ verwendet. Für die Mörtelmischungen wurde kein FM verwendet.

Erhärtungsbeschleuniger (EB)

Erhärtungsbeschleuniger verringern die Erhärtungszeit und beschleunigen somit die Anfangsfestigkeit mit oder ohne Einfluss auf die Erstarrungszeit. Dies resultiert in einer schnelleren Wärmeentwicklung. Die Zugabe von Erhärtungsbeschleunigern hat i.d.R den gravierenden Nachteil von Verminderung der Endfestigkeit und der Dauerhaftigkeit des Betons. Um dem entgegenzuwirken, wird vermehrt die Seeding Technologie (Zugabe von Kristallkeimen) eingesetzt. Hier werden sehr feine, synthetisch hergestellte Nanopartikel (CSH-Kristalle) als Seeding Material in der Porenlösung zwischen den Zementpartikeln eingebracht (Beton, 2014). (Wirkungsprinzip siehe Kapitel 2.3.4)

3.5 Gesteinskörnung

Für die Herstellung der Beton- und Mörtelprobekörper wurde als Zuschlag ein quarzreiches Gesteinsmaterial verwendet.

Für die Betonprobekörper wurden Kornfraktionen mit Körnung 0–4 mm und 4-16 mm verwendet. Eine massenmäßige Aufteilung von 50% je Kornfraktion hat sich dabei als günstige Zusammensetzung erwiesen. Für die Mörtelprismen wurde die gleiche Kornfraktion mit Körnung 0-4 mm herangezogen und auf die Verwendung von speziellem Normensand verzichtet.

Die verwendeten Gesteinskornfraktionen wurden bei 105 °C mindestens 24 Stunden in einem dafür geeigneten Trocknungsschrank bis zur Massekonstanz getrocknet. So konnte auf eine gesonderte Bestimmung des Wassergehalts der Gesteinskörnung verzichtet werden (Wirksamer Wassergehalt = Anmachwasser). Die folgende Abbildung zeigt die verwendeten Gesteinskornfraktionen und die Durchführung der Trocknung:

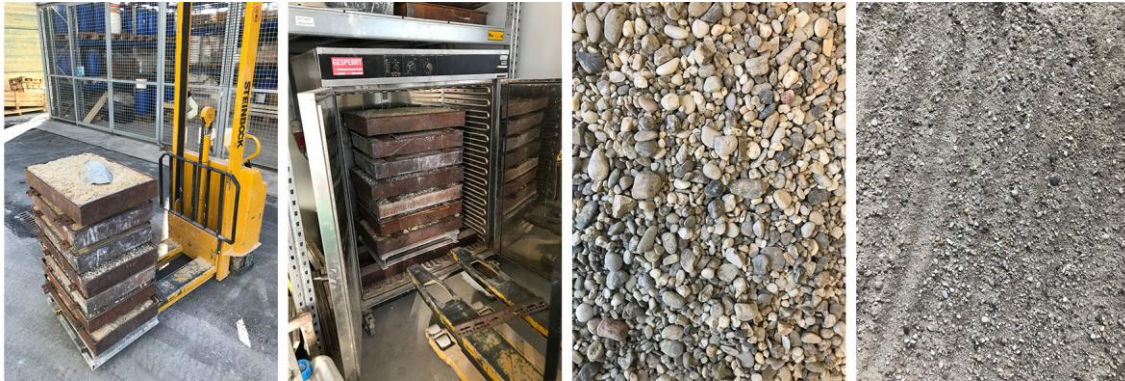


Abbildung 29: Trocknung der verwendeten Gesteinskornfraktionen 0-4 und 4-16

3.6 Partikelgrößenanalyse

Wie bereits im Kapitel Grundlagen thematisiert wurde, hat die Mahlfineinheit der Ausgangsstoffe einen großen Einfluss auf den Ablauf der Hydratation und damit auch auf die Wärme- und Festigkeitsentwicklung von Beton. Da für die meisten Zemente lediglich Herstellerangaben über Blaine Werte als Indikator der Mahlfineinheit vorlagen, wurde eine Partikelgrößenanalyse mittels lasergranulometrischer Messungen am Institut für Prozess- und Partikeltechnik (IPPT) an der Technischen Universität Graz für sämtliche Ausgangsstoffe durchgeführt. Die Auswertung ergab die in den folgenden beiden Grafiken gezeigten volumetrischen Summenverteilungen der Partikel für die verwendeten Zemente und die verwendeten Zusatzstoffe.

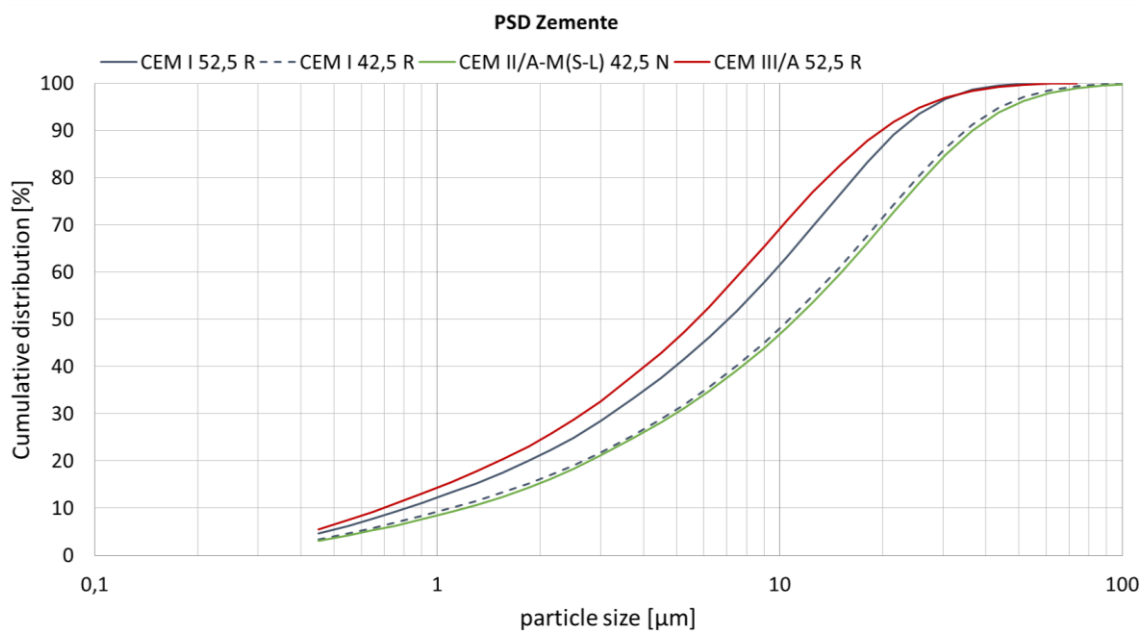


Abbildung 30: Partikelgrößenverteilung der Zemente (Durchgang in V-%)

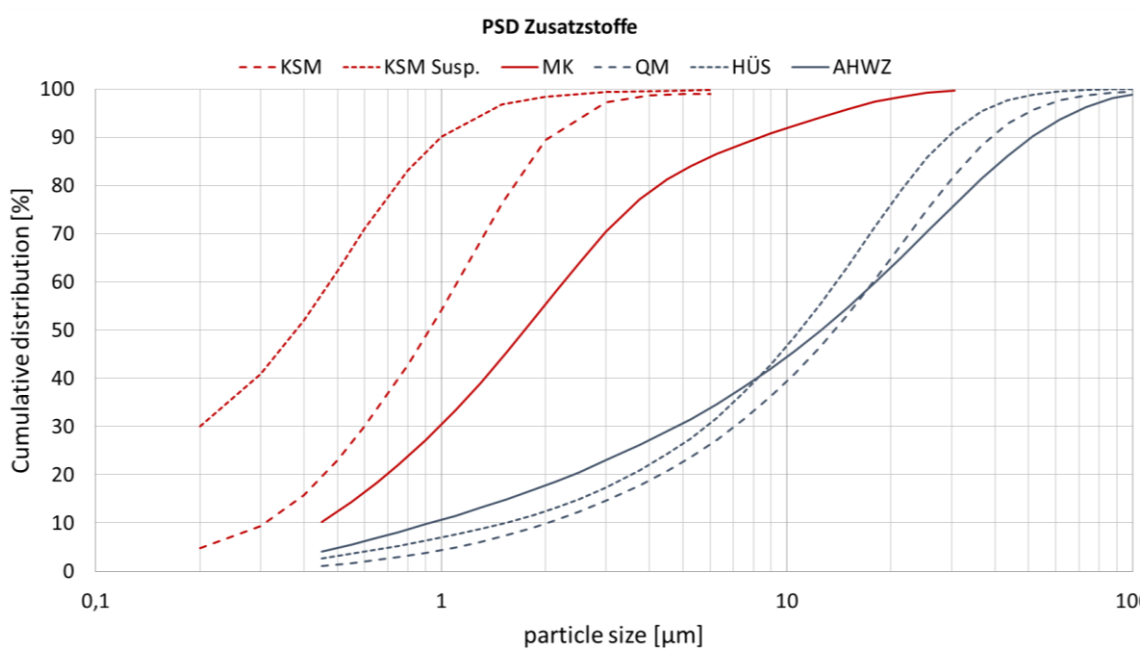


Abbildung 31: Partikelgrößenverteilung der verwendeten Zusatzstoffe (Durchgang in V-%)

Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Kenndaten der Ausgangsstoffe noch einmal zusammen:

Tabelle 13: Übersicht über wichtige Kenngrößen der für die Bindemittelzusammensetzungen verwendeten Stoffe

Bezeichnung		Stoffart	Kornroh-	Blaine	BET (SSA)	d ₅₀	
			dichte ρ_k				
			[g/cm ³]	[cm ² /g]	[m ² /g]	[μ m]	
Zemente	CEM I	CEM I 52,5 R	3,13	≈ 5000	1,87	7,09	
	CEM I SRO	CEM I 42,5 R SRO WT27 C ₃ A-frei	3,17	≈ 4000	1,17	10,67	
	CEM II/A-M	CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT 38	3,03	≈ 4200	1,70	11,14	
	CEM III/A	CEM III/A 52,5 R	3,00	5450	nicht bestimmt	5,74	
Zusatzstoffe	HÜS/ AHWZ	AHWZ	HÜS+FA+KSM+QM	2,75	≈ 5000	4,60	12,55
		HÜS	Hüttensand	2,84	≈ 4000	0,72	10,93
	Meso- füller	QM	Quarzmehl	2,67	3944	2,62	13,77
	Microfüller	KSM	Kalksteinmehl	2,72	23594	8,20	0,92
		KSM Susp.	Kalksteinmehl - Suspension	2,70	nicht bestimmt	18,40	0,38
		MK	Metakaolin	2,50	27600	nicht bestimmt	1,75
Zusatz- mittel	EB	Feststoff: Synth. CSH	2,70	nicht bestimmt	nicht bestimmt	nicht bestimmt	

4 Eigene Voruntersuchungen am Beton

Die im Folgenden gezeigten Untersuchungen wurden im Rahmen einer studentischen Projektarbeit „Untersuchung von Betonsorten mit geringer Wärmeentwicklung und ihre Festigkeitsentwicklung“ (Wilpernig, 2019) am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie vom Verfasser durchgeführt und stellen die Ausgangsbasis und Referenz für ergänzende Untersuchungen am Beton und für Optimierungsversuche am Mörtel dar. Das Versuchslayout und die bereits gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse aus den bereits vorgenommenen Untersuchungen sollen daher in diesem Kapitel der Arbeit noch einmal gezeigt werden. Das im Folgenden gezeigte Versuchsprogramm, das die Untersuchung der Wärme- und Festigkeitsentwicklung von 4 Betonsorten umfasst wurde entsprechend auch für neue Untersuchungen am Beton angewendet.

Zur Untersuchung kamen vier Betonsorten „Öko, HOZ, WW und B3“. Als Referenzbeton mit geringer Wärmeentwicklung diente der „WW-Beton“, der als Regelbetonsorte, nach Maßgabe der ÖBV Richtlinie für wasserundurchlässige Bauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) entworfen wurde. Zusätzlich wurde ein in Österreich üblicher Transportbeton (B3 Normbeton gem. ÖN B 4710-1), eine Betonmischung mit einem speziellen Hochofenzement aus der Zementindustrie („HOZ-Beton“) und eine Ökobetonmischung für Vergleichszwecke untersucht.

4.1 Betonentwurf und untersuchte Betonsorten

Für die Untersuchungen am Beton war es zunächst notwendig ein Betonkonzept zu entwickeln, das den Kriterien (deskriptives Konzept) einschlägiger österreichischer Normen und Richtlinien, wie der ÖN B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018) und der Richtlinie für Wasserundurchlässige Bauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) als Referenz genügen sollte. Gleichzeitig sollte sichergestellt werden, dass möglichst alle Parameter, abgesehen vom verwendeten Bindemittel, in der Zusammensetzung konstant sind, um die untersuchten Betonsorten vergleichbar zu machen. Besonderes Augenmerk lag dabei, Beton mit geringer Wärmeentwicklung und geringer Zwangs-Rissneigung zu entwerfen. Zwangsspannungen resultieren aus behinderten Verformungszuständen, die sich materialtypisch aus dem Schwinden und aus der Wärmedehnung des Betons ergeben. Der Wassergehalt wurde daher sehr gering gewählt, wodurch einerseits mit vermindertem Schwinden gerechnet werden kann und andererseits bei konstantem Wasserbindemittelwert entsprechend wenig Bindemittel benötigt wird. Ein niedriger Bindemittelgehalt (kg Bindemittel je m^3 Beton) resultiert naturgemäß in eine geringere Wärmeentwicklung des Betons, die ja im Hinblick auf eine geringe Zwangs-Rissneigung erwünscht ist.

Setzung der Parameter

Durch die richtige Wahl der Parameter war es möglich für alle untersuchten Betonsorten ein einheitliches Design mit niedrigem Wassergehalt (170 l/m^3), konstanter Bindemittelmenge ($B_G = 318,6 \text{ kg/m}^3$) und etwa gleichbleibendem Leimvolumen zu finden. Gleichzeitig konnte unter Anwendung des in den Normen vorgesehenen k-Wert-Ansatzes für die

Anrechenbarkeit von Zement-Zusatzstoffen dem deskriptiven Konzept der Normen hinsichtlich Mindestbindemittelgehalt und maximalem Wasserbindemittelwert entsprochen werden.

Um die Zielvorgabe einer ausreichenden Verarbeitbarkeit für in Österreich üblichen Transportbeton zu erreichen (weiche Konsistenz F52), wurde aufgrund des niedrigen Wassergehalts hochwirksames Fließmittel verwendet. Auch hier wurden die additiv zugegebenen Mengen möglichst konstant gehalten.

Wasserbindemittelwert

Der Wasserbindemittel W/B_G wurde für alle untersuchten Betonsorten mit 0,53 definiert.

Es soll an dieser Stelle erwähnt sein, dass der Begriff Bindemittel als Überbegriff alle Zemente sowohl mit als auch ohne Zumahlstoffe und Kombinationen aus Zement und Zusatzstoffen beinhalten kann (Zusatzstoff = Stoff, der beim Betonmischen hinzugegeben wird). Bei der Angabe von W/B -Werten soll daher immer klar abgegrenzt werden, welche Bestandteile im Bindemittel berücksichtigt wurden. Für die in dieser und einer vorangegangenen Arbeit untersuchten Betonsorten und auch für weiterführende Untersuchungen am Mörtel, wird daher der Bindemittelgehalt B und der Wassergehalt W wie folgt definiert:

B_G = Gesamtbindemittelgehalt [kg/m^3]

... beinhaltet das gesamte Gemisch aus Zement, puzzolanischen und latent hydraulischen, sowie inert wirksamen pulverförmigen Stoffen mit einem Korndurchmesser $< 125 \mu\text{m}$

B_H = hydr. wirksamer Bindemittelgehalt [kg/m^3]

...Gesamtbindemittelgehalt abzüglich inerter Bestandteile

B_a = anrechenbarer Bindemittelgehalt [kg/m^3]

...Zusatzstoffe mittels k -Wert-Ansatz abgemindert ($B_a = \text{Zement} + k \cdot \text{Zusatzstoff}$) – für informative Zwecke; auch als äquivalenter Bindemittelgehalt bezeichnet

B_{Pz} = Portlandzementgehalt [kg/m^3]

W = Gesamtwassergehalt [kg/m^3]

Wahl der Sieblinie

Um eine dicht gepackte Gesteinskornzusammensetzung zu erhalten, sollte eine Sieblinie im günstigen Bereich A-B, nahe B gewählt werden. Für das Versuchsprogramm wurden Korngruppen 0/4 und 4/16, die in ausreichender Menge am Institut vorhanden waren, für die Versuche herangezogen. Als Größtkorn wurde GK 16 gewählt.

Bei der Zusammensetzung wurde versucht, möglichst nahe an die gewünschte Sollsieblinie nach Fuller heran zu kommen (siehe Anhang: Gesteinskornzusammensetzung). Dabei hat sich eine massenmäßige Aufteilung der beiden Fraktionen zu 50 M-% 0/4 und 50 M-% 4/16 als günstigste Zusammensetzung erwiesen (rote und gelbe Sieblinie).

Im Nachgang zu den in diesem Kapitel gezeigten Untersuchungen wurde eine weitere Betonsorte „Öko_SR0-Beton“ hergestellt und untersucht. Dazu wurde eine andere Kornfraktion 0-4 mm mit weniger Feinkornanteil verwendet (gelbe Sieblinie).

Die folgende Abbildung zeigt die Grenzsieblinien für Gesteinskornzusammensetzungen mit GK 16 gem. ÖN B 4710-1 (Austrian Standards Institute 2018), wo zusätzlich die beiden verwendeten Korngrößenverteilungen eingezeichnet wurden. Die Linien liegen im günstigen und brauchbaren Bereich:

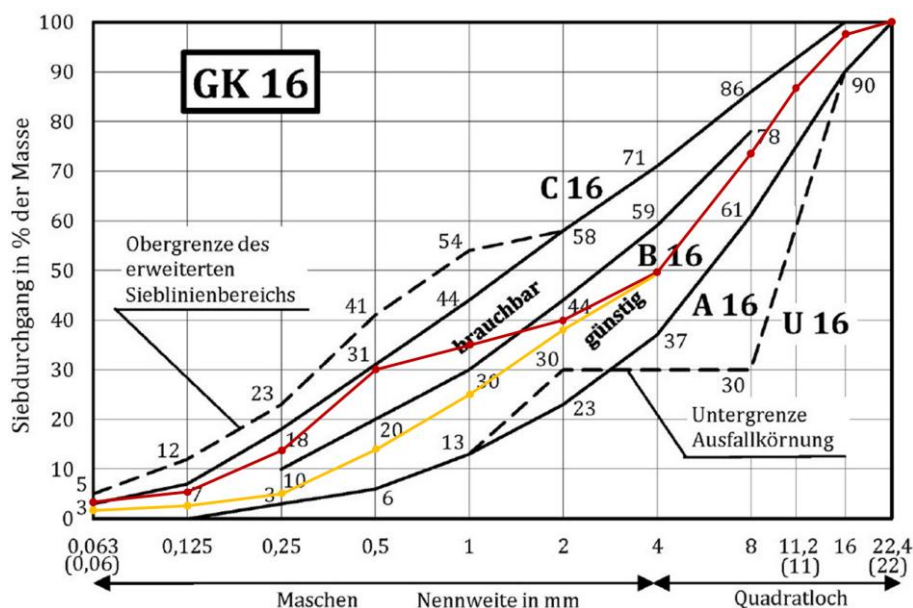


Abbildung 32: Grenzsieblinien für GK16 und verwendete Gesteinskornzusammensetzungen und Sieblinien der hergestellten Betone (Vgl. Austrian Standards Institute 2018)

Betonsorten

Wie schon einleitend in diesem Kapitel geschrieben, unterscheiden sich die untersuchten Betonsorten lediglich in ihrer Bindemittelzusammensetzung, also vom verwendeten Zement und den zugegebenen Zusatzstoffen. Der Öko- und der WW-Beton wurden mit jeweils 60 M-% PZ und 40 M-% Zusatzstoff hergestellt. Die beiden anderen Betonsorten wurden ohne Zusatzstoffe mit Portlandkompositzement CEM II/A-M (S-L) 42,5 N bzw. Hochofenzement CEM III/A 52,5R hergestellt. Die Betonsorten werden im Folgenden beschrieben. Zusätzlich wird hier auch die neue Betonsorte Öko_SR0 vorgestellt.

„WW-Beton“

Der „WW-Beton“ wurde als Regelbetonsorte nach Betonstandard BS 1 A PLUS gem. Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) entworfen und als Referenzbeton mit geringer Wärmeentwicklung definiert.

Nachstehende Expositionsklassen gilt es laut der ÖBV-Richtlinie für den Regelbeton BS 1 A PLUS nachzuweisen: XW2 / XF3 / XAT-B / XAL-B / XC2 / XD. Der Nachweis kann gem. dieser Richtlinie größtenteils, wie nachstehend ausgeführt, mittels Wasserundurchlässigkeitsprüfung unter Einhaltung max. zulässiger Wassereindringtiefen erfolgen:

Wasserundurchlässigkeit XW2: Grenzwert Wassereindringtiefe $t \leq 2,0$ cm; Die ÖBV-Richtlinie für dichte Betonbauwerke verlangt für die Eignungsprüfung den Nachweis am Festbeton mit dem Prüfverfahren gem. ONR 23303.

Korrosion durch Chloride XD1 und XD2: Unter Einhaltung von XW2 und einer Mindestüberdeckung $c_{\min, \text{dur}} \geq 35$ mm gilt die Expositionsklasse als nachgewiesen.

Frostangriff ohne Taumittel XF3: Die ÖBV-Richtlinie für dichte Betonbauwerke verlangt für die Eignungsprüfung folgende Nachweise:

Luftporenkennwert $L_{300} \geq 1,2$ % und Abfall des stat. E-Moduls nach 28 Frosttauwechsel ≤ 5 % sonst nach 56 Frost-Tauwechsel ≤ 25 %

Chemischer Angriff XAT-B und XAL-B:

Nachweis XAT-B: Wassereindringtiefe $t \leq 20$ mm und „C₃A-freier“ Zement erforderlich (für XAT-C --> $t \leq 16$ mm)

Nachweis XAL-B: Wassereindringtiefe $t \leq 20$ mm (für XAL-C --> $t \leq 16$ mm)

C3A-freier Zement (z.B. CEM I 42,5 - **SR0 WT33**) weist einen hohen Sulfatwiderstand auf.

Carbonatisierung XC2:

Bei einer Mindestbetondeckung von $c_{\min, \text{dur}} \geq 35$ mm wird die Expositionsklasse XC4 als äquivalent eingehalten betrachtet. Für eine fundierte Bewertung des Karbonatisierungsverhaltens der Betonsorten, wird auf eine Analyse mittels beschleunigtem Verfahren nicht verzichtet.

Für den WW-Beton wurde ein Portlandzement CEM I 42,5 R SR0 WT27 (C₃A frei), gem. ÖN EN 197-1 und ÖN B 3327-1, ausgewählt. Der gewählte Zement macht 60 M-% der Bindemittelzusammensetzung aus.

Als Zusatzstoff, der 40 M-% des Gesamtbindemittels ausmacht, wurde ein AHWZ - Kombinationsprodukt "Supermix C" gem. ÖN B 3309 – 1 (Austrian Standards Institute 2010) ausgewählt.

„HOZ-Beton“

Beim „HOZ-Beton“ handelt es sich um einen Beton, hergestellt mit einem speziellen Hochofenzement CEM III/A 52,5 R. Bei dieser Betonsorte wurden keine Zusatzstoffe hinzugegeben.

„Öko-Beton“

Der Öko-Beton ist ein Beton mit hohem Zusatzstoffanteil. PZ, der sehr CO₂ intensiv produziert werden muss soll durch den Einsatz von Zusatzstoffen nach Möglichkeit eingespart werden. Durch die Substitution von PZ durch geeignete Zusatzstoffe, konnten bereits

gleichwertige Eigenschaften für bestimmte Anwendungen aufgezeigt werden. (Juhart u. a., 2015)

Bindemittelzusammensetzung lt. Fachgespräch mit Herrn Dr. Juhart:

60 M-%	CEM I 52,5 R	
40 M-%	Zusatzstoffe:	
	7,5 M-%	KSM fein (Rohdichte ca. 2,72 kg/dm ³ , Partikelgröße ca. d ₅₀ ≈ 1 µm)
	32,5 M-%	HÜS (Rohdichte ca. 2,84 kg/dm ³ , Partikelgröße etwa gleich wie PZ)

Tabelle 14: „Öko-Zusatzstoffzusammensetzung“

Zusatzstoff - "Öko"					
Stoffbez.:	Σ	HÜS	KSM	FA	QM
[M-%]	100	81,3	18,8	0	0
	40	32,5	7,5	0	0

„B3-Beton“

Beim B3-Beton handelt es sich um einen in Österreich üblichen Transportbeton, der mit handelsüblichem Portlandkompositzement CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT38 hergestellt wurde. Bei dieser Betonsorte wurden keine Zusatzstoffe hinzugegeben. (S-L) steht bei dem Normzement für „slag“ (= HÜS) und „limestone“ (= KSM). Diese Stoffe sind neben dem Klinker als Hauptbestandteile im Zement enthalten (Zumahlstoffe).

4.2 Beton- und Probekörperherstellung

Betonherstellung

Zunächst wurden die zu mischenden Stoffe auf einer Waage dem Mischungsentwurf entsprechend eingewogen. Die Gesteinskörnungen wurden auf einer Waage mit einer Ablesegenauigkeit von 0,1 kg genau eingewogen. Die Zusatzstoffe und Zemente wurden grammgenau eingewogen

Der verwendete Zyklon-Mischer war gerade ausreichend um 50 Liter Frischbeton je Mischung herzustellen. Für die Herstellung der Probekörper war etwa die doppelte Menge (ca. 85 Liter) je Betonsorte notwendig. So wurden je Betonsorte zwei separate Mischungen benötigt. Entsprechend wurden die Probekörper stets nach dem selbem Schema hergestellt und auch gekennzeichnet (z.B. A1 für die Betonsorte HOZ, Mischung 1). Mischung 1 wurde dabei stets für die Herstellung der Druckwürfel und der Karbonatisierungsprismen, Mischung 2 für die Temperaturmessungen im XPS-Würfel und Untersuchungen der

Wassereindringtiefe, herangezogen. Alle Probekörper wurden auf einem Rütteltisch verdichtet und anschließend 16 bis 24 Stunden mit einer Folie abgedeckt vor Austrocknung geschützt und bei Laborbedingungen (20°C, 65% rel. LF) gelagert. Anschließend wurden die Probekörper ausgeschalt und es erfolgte bis zum jeweiligen Prüfalter eine Wasserlagerung bei rund 20 °C Wassertemperatur. Die Würfel die für die jeweils erste Druckprüfung (1d-Festigkeit) verwendet wurden, wurden keiner Wasserlagerung unterzogen.

Je herzustellender Betonmischung wurde stets auf einen konstanten Versuchsablauf geachtet, der wie folgt beschrieben werden kann. Die Stoffe wurden im ersten Schritt 1,5 Minuten trocken gemischt. Anschließend wurde das Anmachwasser hinzugegeben und weitere 3 Minuten gemischt. Zur Konsistenzsteuerung fungierte ein hochwirksames Fließmittel was im nächsten Schritt additiv beigemischt wurde (Menge siehe Anhang Ergebnisse Frischbetonprüfung). Nach der Zugabe wurde weitere 2 Minuten gemischt (Näheres siehe digitaler Anhang „Beton_Protokoll Betonherstellung_Betonsorte“). Wurde die gewünschte Konsistenz erreicht (Ziel: Konsistenzklasse F52), wurde gleich anschließend mit den weiteren Frischbetonprüfungen begonnen.



Abbildung 33: Mischen der einzelnen Stoffe trocken, mit Wasser und mit FM (links nach rechts)

Frischbetonprüfung

Wie in der Betonforschung üblich, werden im Zuge der Betonherstellung diverse Frischbetonprüfungen durchgeführt. Diese sind wichtig, um die Eignung von Beton nach vorgegebenen Kriterien zu prüfen und um Eigenschaften wie beispielsweise die Porigkeit des späteren Festbetons, anhand des Luftgehalts im Frischbeton nach Erfahrung abschätzen zu können bzw. um beim Vergleich verschiedener Betonsorten ausreichend gleichbleibende Voraussetzungen untereinander zu schaffen. Als Steuerglied zur Erreichung gleichbleibender Eigenschaften wie der Verarbeitbarkeit, wurde bei allen Betonsorten hochwirksames Fließmittel (FM) verwendet. Ohne den Einsatz von FM wären alle untersuchten Betonsorten nicht ausreichend verarbeitbar gewesen, da zur Vermeidung von Rissbildung (zufolge Schwindspannungen) nur wenig Anmachwasser (170 l/m³ Frischbeton bei GK16) rezeptiert wurde. Der für Transportbeton üblichen Konsistenz F52 konnte so bei allen Betonsorten entsprochen werden.

Am Frischbeton wurde die Frischbetontemperatur, die Konsistenz, die Frischbetonroh-dichte, der Frischbetonluftgehalt und der Gesamtwassergehalt ermittelt. Die folgende

Abbildung zeigt beispielhaft die durchgeführten Frischbetonprüfungen. Ergebnisse der Frischbetonprüfung sind dem Anhang beigefügt.



Abbildung 34: Frischbetonprüfung - Ausbreitmaß, Rohdichte, Luftgehalt, Gesamtwassergehalt

Im Folgenden sind die Ergebnisse aus der Frischbetonprüfung tabellarisch dargestellt. (Die detaillierten Herstellungsprotokolle sind dem digitalen Anhang beigefügt)

Tabelle 15: Ergebnisse der Frischbetonprüfung der untersuchten Betonsorten

Betsort:		HOZ				Öko			
Mischung:		A1		A2		B1		B2	
		Zeit n. Wasserzug.		Zeit n. Wasserzug.		Zeit n. Wasserzug.		Zeit n. Wasserzug.	
		[min]		[min]		[min]		[min]	
Herstellungsdatum:		21.01.2019		21.01.2019		15.01.2019		15.01.2019	
Absolutzeit Wasserzug.:		11:53 Uhr		13:17 Uhr		13:43 Uhr		14:50 Uhr	
Lufttemperatur:	[°C]	9	17,7 °C	2	18,0 °C	13	18,9 °C	8	19,9 °C
Luftfeuchte rel.:	[%]	9	35,0 %	2	44,2 %	13	31,2 %	8	35,8 %
Frischbetontemperatur:	[°C]	13	21,3 °C	18	21,6 °C	13	20,9 °C	12	19,8 °C
Ausbreitmaß:	[cm]	13	53,5 cm	37	51,5 cm	10	55,5 cm	12	59,5 cm
		95	43,0 cm	96	39,0 cm				
Frischbetonrohddichte:	[kg/m ³]	25	2298,1	42	2308,6	17	2261,5	21	2315,0
Luftgehalt:	[%]	29	4,8 %	47	4,3 %	20	6,5 %	27	3,8 %
FM - Menge	[kg/m ³]		1,18 kg/m ³		1,78 kg/m ³		1,66 kg/m ³		1,66 kg/m ³

B3		WW		Öko_SRO	
D1	D2	C1	C2	E1	E2
Zeit n. Wasserzug.	Zeit n. Wasserzug.	Zeit n. Wasserzug.	Zeit n. Wasserzug.	Zeit n. Wasserzug.	Zeit n. Wasserzug.
[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]
05.02.2019	05.02.2019	05.02.2019	05.02.2019	21.5.2019	21.5.2019
10:25 Uhr	12:19 Uhr	15:13 Uhr	16:42 Uhr	12:46 Uhr	13:47
0	7	12	1	0	0
17,6 °C	18,5 °C	19,2 °C	19,3 °C	20 °C	20 °C
0	7	12	1	0	0
35,0 %	54,4 %	45,1 %	53,9 %	65,0 %	65,0 %
13	11	10	17	7	9
22,2 °C	21,4 °C	21,4 °C	21,2 °C	22,6 °C	22,4 °C
13	24	19	17	13	9
49,0 cm	51,0 cm	52,5 cm	52,0 cm	53,0 cm	51,0 cm
90	96	95	93	113	90
41,5 cm	42,5 cm	34,5 cm	40,5 cm	36,0 cm	41,5 cm
18	27	24	24	19	16
2335,9	2320,6	2360,8	2298,8	2293,63	2331,4
22	30	28	29	23	21
2,8 %	4,0 %	2,4 %	5,0 %	4,4 %	3,2 %
1,82 kg/m ³	2,23 kg/m ³	2,01 kg/m ³	1,91 kg/m ³	1,96 kg/m ³	1,94 kg/m ³

Probekörperherstellung und -lagerung

Für die Ermittlung der Druckfestigkeiten wurden je Betonsorte und je Prüftermin zwei Würfel mit 150 mm Kantenlänge hergestellt (Form und Maße gem. ÖNORM EN 12390-1). Dabei wurde für jede Betonsorte jeweils Beton-Mischung 1 verwendet, also Mischung A1 bis D1. Die Probewürfel wurden auf einem Rütteltisch verdichtet und anschließend 16 bis 24 Stunden mit einer Folie abgedeckt gelagert. Anschließend wurden die Probekörper ausgeschalt und es erfolgte bis zum jeweiligen Prüftermin eine Wasserlagerung bei rund 20 °C Wassertemperatur.

Für die Messung der Temperatur wurden je Betonsorte zwei Würfel mit 200 mm Kantenlänge hergestellt. Dazu wurden Schalungen aus 100 mm dickem XPS mit einer Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{\text{XPS}} = 0,035 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$ angefertigt und verwendet (gem. ONR 23303). Die Temperaturfühler wurden jeweils in der Mitte des Würfels eingebaut. Die verwendeten Betonproben (jeweils Mischung 2) wurden auf einem Rütteltisch verdichtet und bis zum Ende der

Temperaturaufzeichnungen in der XPS-Schalung bei Laborbedingungen von rd. 20°C und 65% rel. Luftfeuchte gelagert.

Zusätzlich wurden für ergänzende Dauerhaftigkeitsuntersuchungen Probekörper für die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes (Prisma 100 x 100 x 400 mm) und für die Prüfung der Wassereindringtiefe (Platte 200 x 200 x 120 mm) hergestellt. Für die Beurteilung der Karbonatisierung und der Wassereindringtiefe wurde ein Prüfalter von 56 Tagen gewählt. Abweichend zur Norm ergibt sich daher eine über 28 Tage hinausgehende Wasserlagerung von 42 Tagen. Die „Null-Messung“ der Karbonatisierungstiefe erfolgt nach weiteren 14 Tagen Konditionierung im Klimaraum bei 65% rel. Luftfeuchtigkeit und rund 20°C am Tag 56. Anschließend kommen die Proben unter beschleunigten Bedingungen in den CO₂-Schrank (2% CO₂-Konzentration). Die Proben werden zu jedem Prüfalter zur Beurteilung gebrochen. Die Probekörper für die Wassereindringtiefe werden nach 42 Tagen Wasserlagerung in die Prüfmaschine eingebaut und 3 Tage mit 1,75 bar und 11 Tage mit 7,0 bar Wasserdruck beaufschlagt. Am Tag 56 werden die Proben gebrochen und auf ihren Widerstand gegen Wassereindringen untersucht.

Tabelle 16: Übersicht über die hergestellten Beton Probekörper

Betonprobekörper	laufende Probekörper-bezeichnung	Material	Anzahl	Form	Nennmaß [mm]			Volumen [l]	Volumen-Bedarf [l]
Druckfestigkeit f_c	D1 bis D10	Beton	10	Würfel	150	150	150	3,38	33,75
Temperaturanstieg ΔT	T1 T2	Beton	2	Würfel	200	200	200	8,00	16,00
Wassereindringtiefe t	W1 W2 W3	Beton	3	Platte	200	200	120	4,80	14,40
Karbonatisierungswiderstand	C1 C2	Beton	2	Prisma	100	100	400	4,00	8,00



Abbildung 35: Beton Probekörperlagerung Unterwasser nach dem Ausschalen

4.3 Methoden der Untersuchung und Versuchsdurchführung

4.3.1 Temperaturmessungen

Für die Beurteilung der Wärmeentwicklung der Betonsorten wurde ein teiladiabatisches Verfahren (gem. ONR 23303 9.16) ausgewählt, das für gewöhnlich zur Beurteilung des Temperaturanstiegs von Beton angewendet wird. Dabei wird die Temperatur im Kern der Betonproben gemessen und liefert als Konvention einen unter definierten Randbedingungen gemessenen Temperaturanstieg und Temperaturverlauf. Die Messung der Temperatur im Kern der Probekörper wird dabei alle 15 Minuten gemessen und aufgezeichnet. Eine Frischbetontemperatur von 19 bis 22°C und eine Lagerungstemperatur von $20 \pm 2^\circ\text{C}$ soll während den Messungen eingehalten werden, was aufgrund der Laborbedingungen auch möglich war (Raumluftkonditionierung auf 20°C Lufttemperatur und 65% rel. Luftfeuchte).

Für die Messung und Aufzeichnung der Temperatur wurde ein geeigneter Datenlogger der Firma Testo (Modell 177) mit 4 Kanälen verwendet. Die Temperaturfühler wurden stets in der Mitte der Betonwürfel platziert. Die Aufzeichnung der Temperatur erfolgte dabei in einem Intervall von 15 Minuten. Die folgende Abbildung zeigt den Versuchsaufbau:



Abbildung 36: Temperaturmessungen im Kern der wärmeisolierten Betonproben

4.3.2 Druckfestigkeitsprüfung am Probewürfel

Zur Beurteilung der Festigkeit der Betonproben wurde ein gängiges Verfahren der zerstörenden Werkstoffprüfung ausgewählt. Die Durchführung erfolgt gemäß ÖN EN 12390-3 und ONR 23303 9.2 – Prüfverfahren Beton. Dabei werden Probewürfel mit einer Seitenlänge von 150 mm (mit entsprechender Toleranz) bis zum Bruch in einer Druckprüfmaschine gem. ÖN EN 12390-4 belastet. Die Belastungsgeschwindigkeit sollte $0,6 \pm 0,2 \text{ Mpa/s}$ betragen und wurde entsprechend auf $0,6 \text{ MPa/s}$ eingestellt. Nach Aufbringen der Ausgangsbelastung, die etwa 30 % der Bruchlast nicht übersteigen darf, wird die Belastung stoßfrei auf den Probekörper aufgebracht und stetig mit der eingestellten Geschwindigkeit $\pm 10 \%$ bis zum Erreichen der Höchstlast erhöht. Die erreichte Höchstlast wird aufgezeichnet und die Druckfestigkeit $f_{c(t)}$ des Betons wird wie folgt berechnet.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Dabei ist:	f_c	die Druckfestigkeit, in MPa (N/mm ²)	
	F	die Höchstkraft beim Bruch, in N	
	A_c	die Fläche des Probenquerschnitts, in mm ²	Glg. (3)

Zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung werden je Betonsorte mehrere Prüftermine festgelegt. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt daher im Alter von 1, 3, 7, 28 und 56 Tagen. Je Prüftermin und Betonsorte werden zwei Druckfestigkeitsprüfungen durchgeführt und daraus ein Mittelwert $f_{cm}(t)$ gebildet.

Abweichend zur genormten Druckfestigkeitsprüfung (gem. ÖN EN 12390 – 3) werden die Probewürfel durchgehend wassergelagert. Dies hat den Vorteil, dass die Probekörper ideal vor Austrocknung geschützt sind und so ausreichend Wasser für die voranschreitende Hydratation zur Verfügung stehen. Außerdem muss nicht über Faktoren zur Berücksichtigung der Lagerungsart umgerechnet werden.

Eine Umrechnung der Druckfestigkeit von Normalbeton abhängig von der Lagerungsart, kann über folgende Beziehung erfolgen (gilt für W150 bis zur Festigkeitsklasse C55/67):

$$f_{c, cube} = 0,92 \cdot f_{c, dry, cube}$$

Glg. (4)

Durchführung

Die Druckfestigkeitsprüfungen wurden wie schon geschrieben gem. ÖNORM EN 12390 – 3 bzw. ONR 23303 9.2 durchgeführt. Abweichend dazu wurden die Probekörper nach dem Ausschalen durchgehend Wassergelagert. Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte zur Beurteilung der Festigkeitsentwicklung im Prüfalter von 1, 3, 7, 28 und 56 Tagen. Je Betonsorte und Prüftermin wurden 2 Würfel mit einer Seitenlänge von 150 mm verwendet (Mischung 1).

Nach erfolgter Probekörperlagerung, unmittelbar vor der jeweiligen Druckfestigkeitsprüfung erfolgte zunächst die Vermessung und die Wiegung der zu prüfenden Probewürfel um später die Festbetonrohddichte als Materialkennwert zu bestimmen. Für jede Seitenlänge (a und b) der Probewürfeldruckflächen (1 und 2) wurden jeweils zwei Messungen (gegenüberliegende Seitenlänge) mit einer geeigneten Schiebelehre (Ablesegenauigkeit: 0,1 mm) vorgenommen und ein Mittelwert gebildet und notiert. Für die jeweils zu ermittelnde Probewürfel Höhe h wurden entsprechend vier Messungen vorgenommen und daraus ein Mittelwert gebildet. Anhand der Probekörpervermessung und -wiegung wurde die Festbetondichte wie folgt bestimmt (Ergebnisse siehe Anhang):

$$D = \frac{m}{V}$$

Dabei ist: D die Rohdichte, in g/cm^3 ($= \text{t/m}^3$)
 m die Masse, in g
 V das Volumen, in cm^3 **Glg. (5)**

Die folgende Abbildung zeigt Ausschnitte aus den vorgenommenen Druckfestigkeitsprüfungen:



Abbildung 37: Druckfestigkeitsprüfung am Beton Probewürfel W150

4.4 Ergebnisse aus Voruntersuchungen am Beton

4.4.1 Wärmeentwicklung

In der folgenden Abbildung sind die gemessenen Temperaturverläufe der untersuchten Betonsorten veranschaulicht. Es handelt sich dabei, wie bereits erwähnt um teiladiabatische Temperaturkurven. Die Grafik zeigt die absoluten Verläufe, gemessen ab 70 Minuten (± 4 min.) nach Wasserzugabe, wobei zu diesem Zeitpunkt unterschiedliche Frischbetontemperaturen vorhanden waren (siehe T_0 in nachstehender Tabelle).

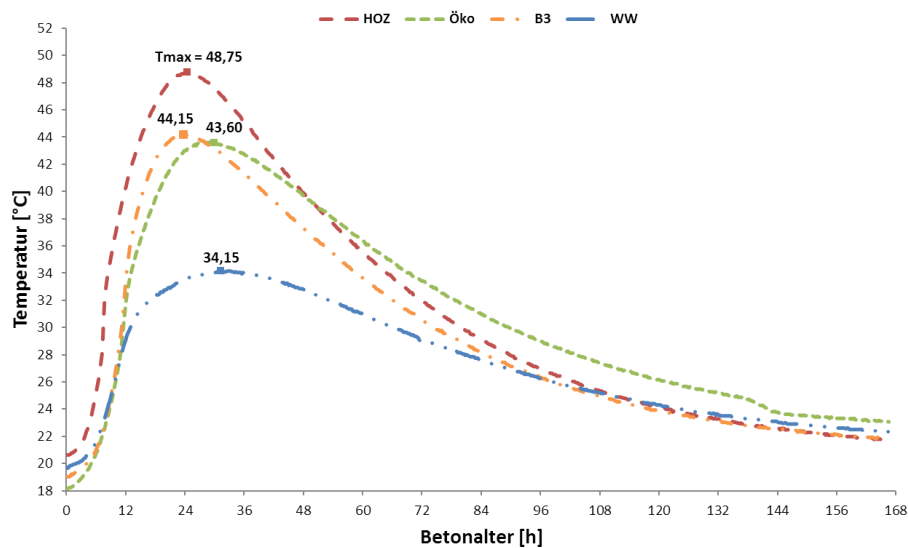


Abbildung 38: Temperaturverläufe der untersuchten Betonsorten (Ist-Messung)

Da die Temperaturmessungen mit dem Datenlogger erst nach erfolgter Frischbetonprüfung und Probekörperherstellung beginnen konnten, wurden die Mindesttemperaturen T_{\min} ab dem „Null-Zeitpunkt“ t_0 , 70 ± 4 Minuten nach Wasserzugabe, für die Auswertungen herangezogen. Die gemessene Frischbetontemperatur vor dem Null-Zeitpunkt wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt (Temperaturverhältnisse während der Herstellung siehe Ergebnisse Frischbetonprüfung). Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Temperaturverhältnisse der untersuchten Betonproben:

Tabelle 17: Temperaturwerte der untersuchten Betonsorten in [°C]

ΔT	Öko	HOZ	B3	WW
	25,45	28,10	25,10	14,50
T_{\max} :	43,60	48,75	44,15	34,15
T_{\min} :	18,15	20,65	19,05	19,65
$T_{\text{Frischbetonpr.}}$:	19,8	21,6	21,4	21,2
Zeit n. Wasserz.	12	18	11	17

Zur besseren Veranschaulichung wird in der folgenden Grafik lediglich der Temperaturanstieg dargestellt ($\Delta T = T(t) - T_{\min}$). Die Temperaturkurven sind hier im Gegensatz zur oberen Grafik um T_{\min} vertikal verschoben, sodass sie eine gemeinsame Start-Temperatur $T_0 = 0$ °C zum Zeitpunkt t_0 aufweisen und so besser im Verlauf verglichen werden können. Die folgende Abbildung soll dies veranschaulichen:

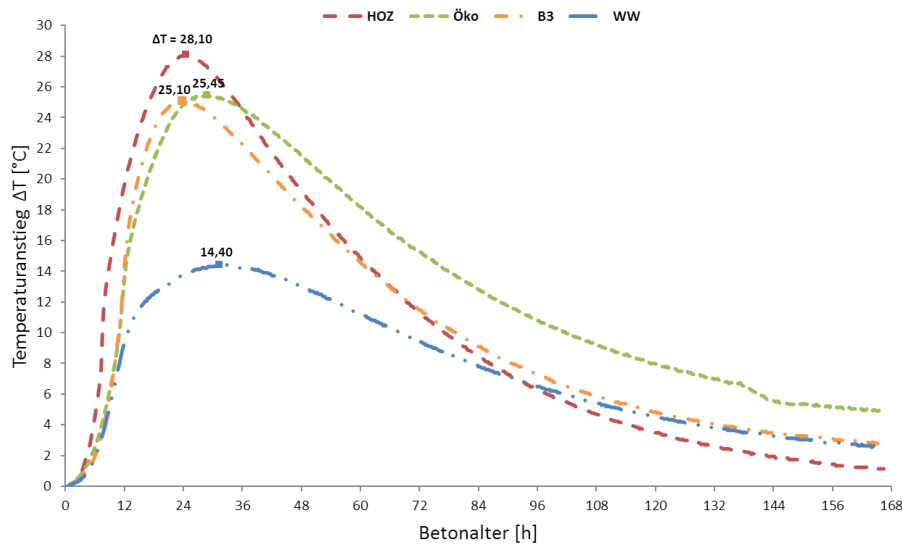


Abbildung 39: Temperaturkurven $\Delta T(t)$ der untersuchten Betonsorten

Vergleicht man den Temperaturverlauf der einzelnen Betonmischungen, so kann man feststellen, dass sie sich sowohl in der absoluten Höhe als auch im zeitlichen Verlauf deutlich unterscheiden.

So erreicht der B3-Beton nach knapp 24 Stunden als Erster das Temperaturmaximum, direkt gefolgt vom HOZ-Beton nach 24 Stunden. Der Öko-Beton erreicht sein Temperaturmaximum nach knapp 29 Stunden und der WW-Beton nach etwa 31 Stunden. (Gemessen vom „Null-Zeitpunkt“ etwa 70 Minuten nach Wasserzugabe)

Beim Referenzbeton „WW“ konnte ein sehr geringer Temperaturanstieg von 14,5 °C gemessen werden. Der max. zulässige Temperaturanstieg, der in der Richtlinie Wasserundurchlässige Betonbauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) für die Eignungsprüfung des Betons für die Betonsorte BS 1 B PLUS mit bis zu 15 °C begrenzt wird, konnte beim WW-Beton mit 0,5 °C Differenz eingehalten werden. Die drei anderen Betonsorten erreichten deutlich höhere Temperaturen.

Die übrigen Betonsorten Öko, B3 und WW wiesen einen deutlich höheren Temperaturanstieg auf und konnten die Vorgabe der Richtlinie für einzelne Betonsorten nach dem Konzept „Weiße Wanne klassisch“ ($\Delta T \leq 23$ °C) nur knapp nicht erfüllen. Nach dem Kriterium eines begrenzten Temperaturanstiegs wären sie daher nicht mehr als Beton für wasserundurchlässige Bauwerke gem. Richtlinie (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) geeignet.

Hauptgrund für den niedrigen Temperaturanstieg des WW-Betons dürfte vor allem der verwendete „C₃A-freie“ Zement sein. Zemente mit niedrigem C₃A-Gehalt besitzen bekanntlich geringe Hydratationswärmen.

Was den Temperaturverlauf betrifft so ist deutlich sichtbar, dass der HOZ-Beton und der B3-Beton eine ähnliche Kurvenform mit spitzem Temperaturmaximum und dann relativ rascher Abkühlung besitzen. Überraschend ist, dass der HOZ Beton in den ersten Stunden die höchste Wärmeentwicklung aufweist. Eigentlich würde man bei einem PZ Anteil von rd.

60 M-% und rd. 40 M-% Hüttensand eine flachere Spitze erwarten. Ein entscheidender Grund für den starken Temperaturanstieg könnte die deutlich höhere Anfangstemperatur des HOZ-Betons gegenüber den anderen Betonsorten sein (2,5°C höher als der Öko-Beton). Eine höhere Anfangstemperatur beschleunigt zumindest die Wärmeentwicklung von PZ. Dies Ergaben schon Untersuchungen über das Kühlen von Beton in den frühen 60er Jahren (Mandry, 1961). Weiters nehmen Parameter wie die Mahlfineinheit der Bindemittel Ausgangsstoffe großen Einfluss auf den zeitlichen Ablauf der frühen Hydratation und damit auf die Wärme- und Festigkeitsentwicklung.

Beim Öko- und beim WW-Beton fällt auf, dass nach ca. 6 Stunden deutlich langsamere Temperaturveränderungen stattfinden und sich ein deutlich flacheres Temperaturmaximum ausbildet.

Die gemessenen Temperaturen im Kern der Proben mit der Würfelkantenlänge 200 mm und der XPS-Dämmung von 100 mm, geben natürlich nur die Testsituation wieder und können daher nur schwer auf andere Gegebenheiten übertragen werden. Um dies zu ermöglichen, wurde ein Modell entwickelt, das die gemessenen Kerntemperaturen auf adiabatische Wärmeentwicklung im Probewürfel und auch auf andere Würfelgrößen und Dämmungen umrechnen kann.

Kern des Modells ist, dass die Abkühlleistung bzw. der Abwärmestrom am Würfel rechnerisch ermittelt wird. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass es im Betonwürfel selbst kein Temperaturgefälle gibt, und somit die Kerntemperatur gleich der Oberflächentemperatur des Betonwürfels ist. Tatsächliche Untersuchungen an einem 2 m Würfel (BAW Karlsruhe, 2012) und modellhafte eigene Berechnungen zeigen, dass diese Vereinfachung durchaus zulässig ist, da die Temperaturdifferenzen nur marginal sind und somit die Berechnung nicht wesentlich beeinflussen. Die Abkühlleistung wird als Funktion des Temperaturunterschiedes zwischen Kern- und Umgebungstemperatur (Lufttemperatur) bei gegebener bzw. anzunehmender Isolierung berechnet. Die Abkühlung Q_K wurde schrittweise je Stunde über folgende Beziehungen und Setzung folgender Parameter berechnet:

$Q_K = A \cdot U \cdot \Delta T \cdot dt$... Wärmemenge (Abkühlleistung je Stunde) [Wh = 3,6 Joule]

mit: $A = 0,24 \text{ m}^2$... Oberfläche Betonwürfel

$\Delta T = (T_{\text{Beton}} - T_{\text{Luft}})$... Temperaturdifferenz [K]

mit: $T_{\text{Luft}} = 20^\circ\text{C}$

$U = \frac{1}{\frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha}}$... Wärmedurchgangskoeffizient [$\text{W}/\text{m}^2 \text{ K}$]

mit: $d = 0,1 \text{ m}$... Dicke der XPS-Dämmung

$\lambda = 0,035 \text{ W}/\text{m K}$... Wärmeleitfähigkeit XPS

$\alpha = 7,7 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ K}$... Wärmeübergangskoeffizient Luft

Glg. (6)

Bei der Modellrechnung zeigte sich, dass die modellhaft errechnete Kühlleistung nicht ausreicht um einen klassischen adiabatischen Temperaturanstieg zu gewährleisten. Erst Anpassungen (Erhöhungen) des Wärmedurchgangskoeffizienten der Isolierung um 20 bis 65% (je nach Betonmischung) erbrachten die gewünschten Ergebnisse. Warum dies so ist, konnte nicht eindeutig geklärt werden. Eine genauere Temperaturmessung an mehreren Stellen des Würfels sollte hier noch durchgeführt werden um die Differenzen aufzuklären. Ein möglicher Grund könnte eine schwankende Raumlufthtemperatur gewesen sein, die ja für die Bestimmung der Kühlleistung mit konstant 20°C angenommen wurde.

Tabelle 18: Beiwerte für die Kalibrierung der Abkühlleistung

	Öko	HOZ	B3	WW
Kalibrierungs-faktor	1,25	1,65	1,55	1,20

Aus der errechneten Abkühlleistung und der gemessenen Kerntemperatur lässt sich dann eine modellhaft ermittelte adiabatische Wärmeentwicklung und ad. Temperaturkurve rechnen. Diese kann dann dem errechneten adiabatischen Temperaturanstieg aus der Bindemittelzusammensetzung (Berechnung über $H_z(t)$) gegenübergestellt werden.

$$\Delta T_b = \frac{z \cdot H_z(t)}{Q_b} = T(t) - T_0 \dots \text{Ad. Temperaturanstieg im Beton [K]}$$

$$\rightarrow H_z(t) = \frac{\Delta T_b \cdot Q_b}{z} \dots \text{freisetzbare Wärmemenge des Bindemittels (Enthalpie) [kJ/kg]}$$

mit: $z = 318 \text{ kg/m}^3 \dots$ Zementgehalt/Bindemittelgehalt je m^3 Beton

$$Q_b = c_b \cdot \rho_b \dots \text{Wärmekapazität [kJ/m}^3 \text{ K]}$$

mit: $c_b = 1,1 \text{ kJ/kg K} \dots$ spez. Wärme Beton

$$\rho_b = 2350 \text{ kg/m}^3 \dots \text{Dichte Beton}$$

Glg. (7)

Für die untersuchten Betonproben ergeben sich anhand der Modellrechnung folgende Hydratationswärmen $H_z(t)$:

Tabelle 19: Hydratationswärme $H_z(t)$ der untersuchten Betonproben in [J/g]

[J/g]	Öko	HOZ	B3	WW
H_{z1}	239	307	257	137
H_{z3}	293	352	293	182
H_{z7}	300	360	300	190

Die modellhaft ermittelten Temperatur- und Wärmekurven der untersuchten Betonsorten wurden dem Anhang beigefügt. Die folgende Grafik veranschaulicht die Modellhaft ermittelten adiabatischen Temperatur- und Wärmeverhältnisse anhand der Betonsorte HOZ. Wie ersichtlich, ist die modellhaft ermittelte adiabatische Temperaturerhöhung deutlich höher als die gemessene Kerntemperatur an der Probe.

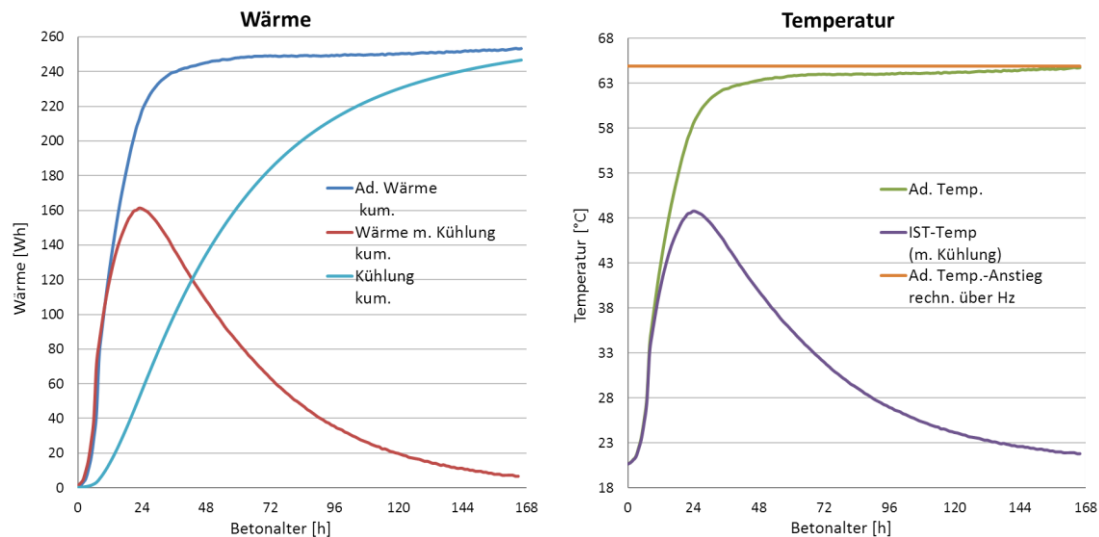


Abbildung 40: Modellhaft ermittelte ad. Temperatur- und Wärmeverhältnisse am Beispiel „HOZ“-Beton

Beim Durchspielen des Modells mit unterschiedlichen Würfelgrößen und Isolierungen zeigte sich, dass die Temperaturerhöhungen stark von der Würfelgröße und der gewählten Isolierung (Wärmeabflussbedingungen) abhängen. Bei sehr großen Würfeln nähert sich die Temperaturlinie der adiabatischen Temperaturentwicklung an, die ja naturgemäß deutlich höher als diejenige ist, die am Probewürfel gemessen wurde. Es wird schön sichtbar, dass ein definierter Probewürfel eine nur sehr eingeschränkte Aussagekraft über die Ist Situation der Temperaturentwicklung in einem Anwendungsfall hat. Deshalb werden für konkrete Anwendungsfälle dann auch entsprechende Programme zur Simulation des Temperaturverlaufes im Bauteil verwendet.

4.4.2 Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betonsorten

In der folgenden Abbildung sind die Verläufe der Festigkeitsentwicklung der vier untersuchten Betonsorten veranschaulicht. Wie in der Abbildung zu sehen ist, haben sich die Betonsorten sehr unterschiedlich in ihrer Festigkeit entwickelt, obwohl wesentliche Parameter in der Betonzusammensetzung konstant gehalten wurden.

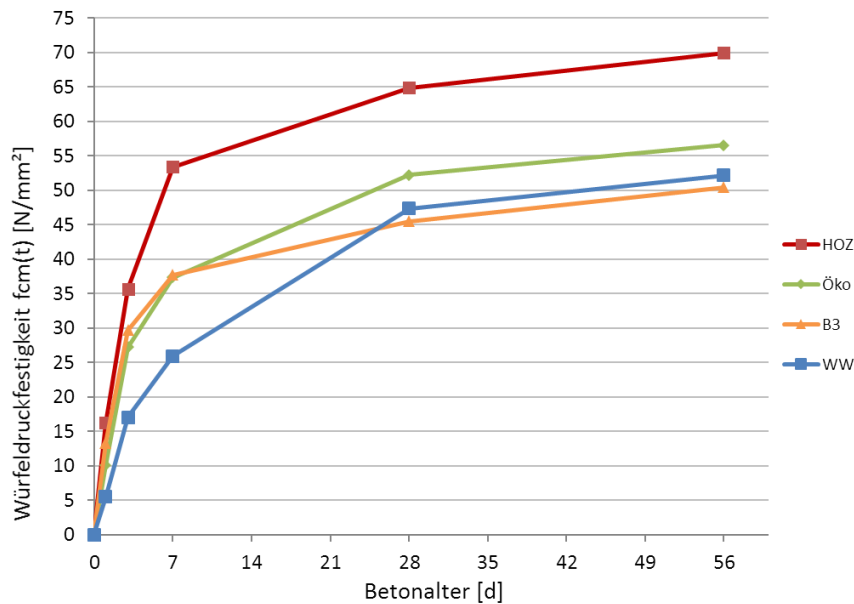


Abbildung 41: Mittlere Würfeldruckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ der untersuchten Probewürfel im jeweiligen Betonalter t ; $n = 2$

Da sich die erreichten Festigkeiten der untersuchten Betonsorten auch in höherem Betonalter stark unterscheiden, erscheint es zunächst sinnvoll die Festigkeiten zu normieren. Man bezieht dabei die im jeweiligen Betonalter erreichten Festigkeiten auf die Festigkeit im Betonalter von beispielsweise 28 Tagen. So können relative Festigkeiten dargestellt werden und die Betonsorten in ihrer Festigkeitsentwicklung besser verglichen werden. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse aus den Druckfestigkeitsprüfungen (Absolutwerte) und zeigt die erreichten Festigkeiten bezogen auf die jeweilige 28-Tage-Festigkeit ausgedrückt in Prozent (Relativwerte).

Tabelle 20: Ergebnisse $f_{cm}(t)$ aus den Druckfestigkeitsprüfungen und rel. Druckfestigkeiten bezogen auf die jeweils erreichte mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Betonsorte Alter [d]	Absolutwerte $f_{cm}(t)$ aus Druckfestigkeitsprüfung [N/mm²]				Relativwerte bezogen auf $f_{cm}(28)$ [%]			
	Öko	HOZ	B3	WW	Öko	HOZ	B3	WW
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	10,2	16,2	13,3	5,5	19	25	29	12
3	27,2	35,7	29,7	17,0	52	55	65	36
7	37,4	53,4	37,7	25,9	72	82	83	55
28	52,2	64,9	45,5	47,4	100	100	100	100
56	56,5	69,9	50,4	52,1	108	108	111	110

Die folgende Grafik zeigt die Festigkeitsentwicklung der vier Betonsorten normiert auf die jeweilige 28-Tage-Festigkeit:

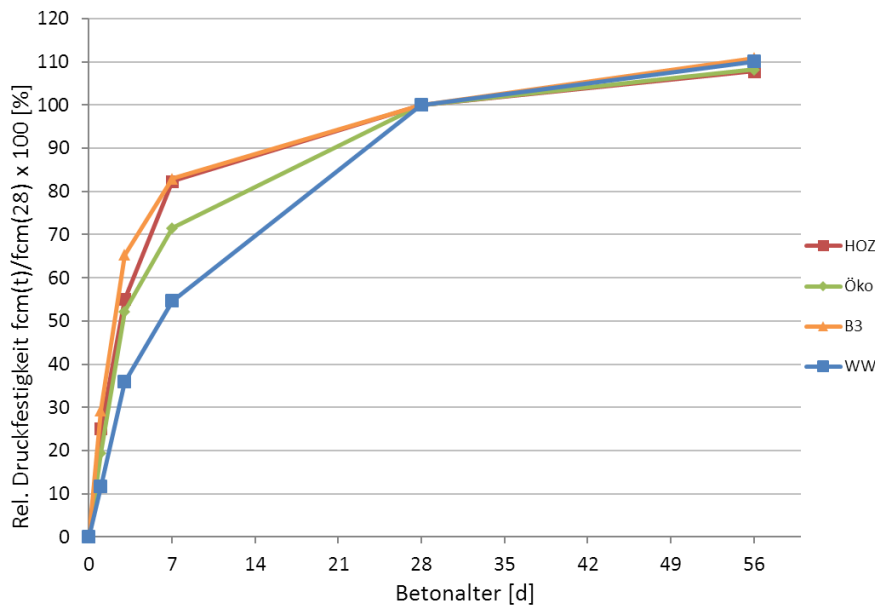


Abbildung 42: Relative Würfeldruckfestigkeiten $f_{cm}(t) : f_{cm}(28)$

Mithilfe des bereits vorgestellten Modells zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung wurde anhand der jeweils mittleren 28-Tage-Druckfestigkeit f_{cm28} und dem Beiwert s [-], die Festigkeitsentwicklung der Betonsorten beschrieben. Mit den aus dem fib model code (CEB-FIP, 2010) vorgesehenen s -Beiwerten für die Berücksichtigung der jeweiligen Zementfestigkeitsklasse konnte jedoch keine ausreichende Übereinstimmung zu den gemessenen mittl. Druckfestigkeiten der jeweiligen Betonsorte hergestellt werden. Dennoch erwies sich das Modell durch Anpassung des Beiwerts s [-] als sehr gut geeignete Nichtlineare Regressionskurve, um die Festigkeitsentwicklung mit nur zwei Parametern (f_{cm28} und s) zu beschreiben. Der Beiwert s [-] konnte für die jeweils untersuchte Betonsorte anhand einer Extremwertaufgabe so optimiert werden, dass die Festigkeitsentwicklung bestmöglich mit der Funktion $\beta_{cc}(t)$ beschrieben werden konnte. Dabei wurde der Beiwert s [-] so bestimmt, dass die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen optimierter Kurve und IST-Daten aus den Druckfestigkeitsprüfungen sein Minimum erreicht. Die folgende Grafik verdeutlicht die Optimierung:

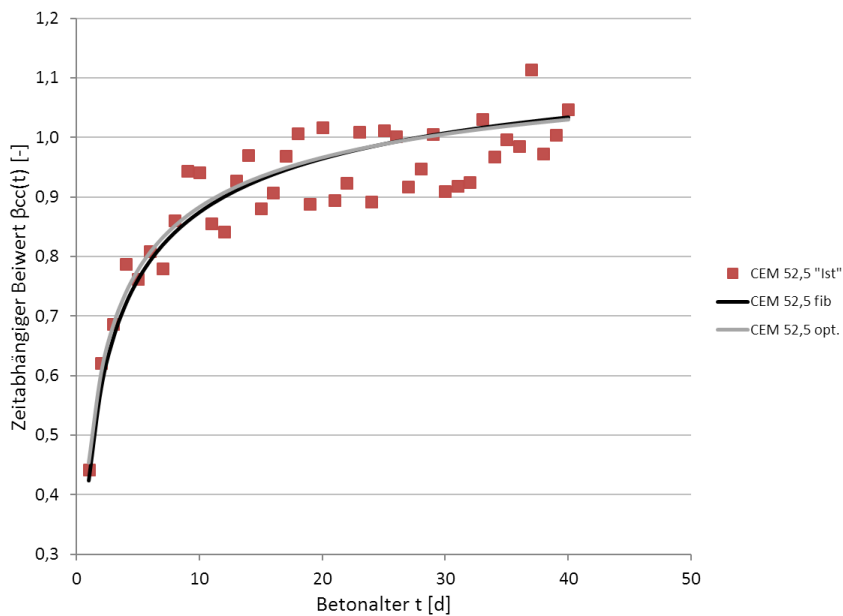


Abbildung 43: Nichtlineare Regression anhand der Funktion $\beta_{cc}(t)$ durch Optimierung des Beiwerts s

Die folgende Tabelle und Abbildung zeigen die Ergebnisse aus der Optimierung für die jeweils untersuchte Betonsorte:

Tabelle 21: Optimierung der Beiwerte s [-] für die jeweils untersuchte Betonsorte

Öko (s = 0,34)

t	"Öko" IST	Abw. \wedge^2	"Öko" opt.
[d]	fcm(t) [N/mm 2]		fcm(t) [N/mm 2]
1	10,15	3,163	11,93
3	27,24	2,207	25,75
7	37,36	0,113	37,02
28	52,22	0,000	52,22
56	56,52		57,76
Σ Abw. \wedge^2 :		5,482	

HOZ (s = 0,29)

t	"HOZ" IST	Abw. \wedge^2	"HOZ" opt.
[d]	fcm(t) [N/mm 2]		fcm(t) [N/mm 2]
1	16,24	6,991	18,89
3	35,70	0,050	35,93
7	53,40	22,497	48,66
28	64,86	0,000	64,86
56	69,92		70,56
Σ Abw. \wedge^2 :		29,538	

B3 (s = 0,24)

t	"B3" IST	Abw. \wedge^2	"B3" opt.
[d]	fcm(t) [N/mm 2]		fcm(t) [N/mm 2]
1	13,34	7,521	16,08
3	29,69	4,186	27,65
7	37,74	4,182	35,70
28	45,49	0,000	45,49
56	50,41		48,83
Σ Abw. \wedge^2 :		15,889	

WW (s = 0,53)

t	"WW" IST	Abw. \wedge^2	"WW" opt.
[d]	fcm(t) [N/mm 2]		fcm(t) [N/mm 2]
1	5,52	0,502	4,81
3	17,01	1,370	15,84
7	25,90	3,597	27,80
28	47,37	0,000	47,37
56	52,14		55,38
Σ Abw. \wedge^2 :		5,469	

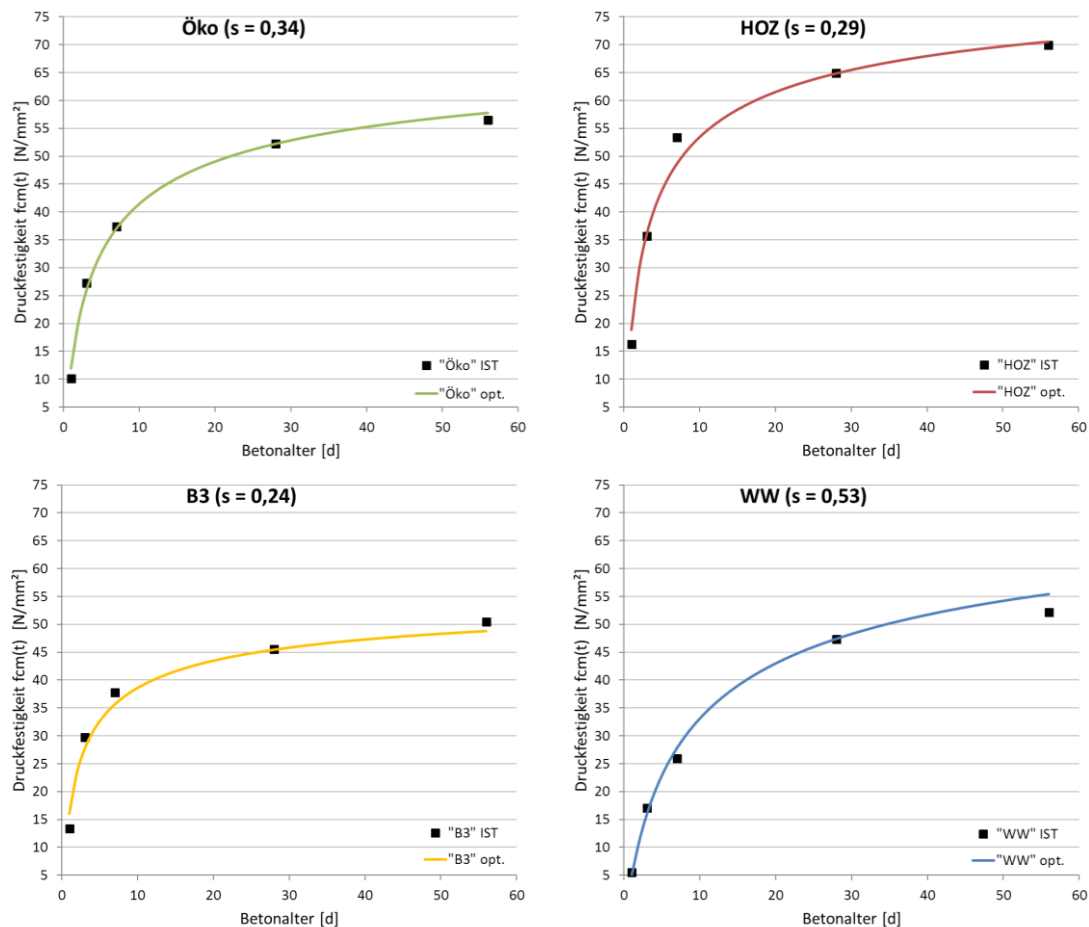


Abbildung 44: Regressionsfunktion $f_{cm}(t)$ zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betonsorten durch Optimierung der Beiwerte s [-]

Wie an obigen Abbildungen gut zu erkennen ist, konnte mithilfe der analytischen Funktion aus dem fib Model Code 2010 die Festigkeitsentwicklung der untersuchten Betonsorten mit entsprechender geringer Abweichung beschrieben werden. Die Festigkeitsentwicklung des HOZ-Betons konnte dabei nicht so gut beschrieben werden wie beispielsweise die des Öko-Betons, was die jeweiligen Abweichungen aufzeigen. Bei Optimierung der Summe der quadratischen Abweichungen auf ein Minimum ergaben sich bei der 7-Tage-Festigkeit des HOZ-Beton eine Differenz von 4,93 N/mm^2 zum Ist-Wert, während der Öko-Beton beispielsweise nur 0,24 N/mm^2 vom gemessenen Ist-Wert abweicht. Der HOZ-Beton konnte also eine rund 10% höhere 7-Tage-Festigkeit erreichen, als es mit optimiertem Beiwert s und bekannt sein von f_{cm28} zu beschreiben möglich gewesen wäre.

Dennoch erwies sich das Modell als gut geeignet, um Aussagen über die Festigkeitsentwicklung treffen zu können. So war beispielsweise der HOZ-Beton mit $s = 0,29$ deutlich schneller in seiner Festigkeitsentwicklung als der Öko-Beton mit $s = 0,34$.

Auch konnte Anhand der Regressionsfunktion die Festigkeiten nach 56 Tagen, die zum Zeitpunkt der Auswertungen nicht bekannt waren, im Voraus durch Extrapolation abgeschätzt werden. Es galt jedoch noch zu klären, ob die Ergebnisse zuverlässig vorausbestimmt werden konnten, da ja ein Effekt der Nacherhärtung, insbesondere bei Verwendung

puzzolanischer Stoffe im Bindemittel, in der Funktion unberücksichtigt bleibt. Es wird durch die analytische Funktion unterstellt, dass Beton mit einer schnelleren Festigkeitsentwicklung langsamer nacherhärtert, was ja nicht zwingend der Fall sein muss.

4.4.3 Zusammenhang Wärme und Festigkeit

Die folgende Grafik zeigt den Zusammenhang des Temperaturanstiegs ΔT in Abhängigkeit der erreichten mittleren Druckfestigkeit $f_{cm}(t)$ im Betonalter von 1, 3, 7 und 28 Tagen:

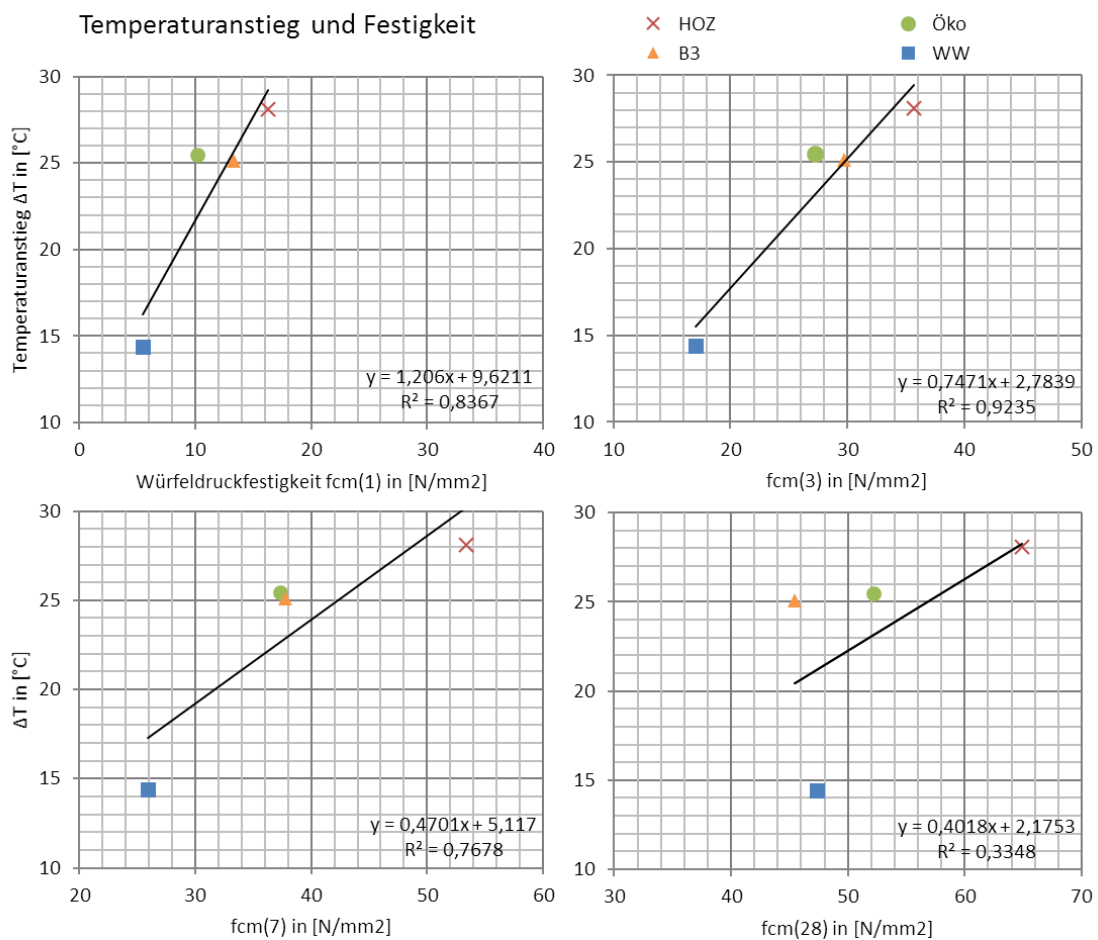


Abbildung 45: Zusammenhang Temperaturanstieg ΔT [°C] und Betondruckfestigkeit im Alter von 1, 3, 7 und 28 Tagen

Wie in oben dargestellter Grafik ersichtlich, gibt es einen klaren Zusammenhang zwischen dem Temperaturanstieg und der Festigkeitsentwicklung, wobei die Bestimmtheit R^2 der linearen Regression im Alter von 28 Tagen deutlich abnimmt. Die folgende Abbildung verdeutlicht noch einmal den starken Zusammenhang in den ersten 7 Tagen, anhand der modellhaft ermittelten ad. Hydratationswärmern $H_z(t)$:

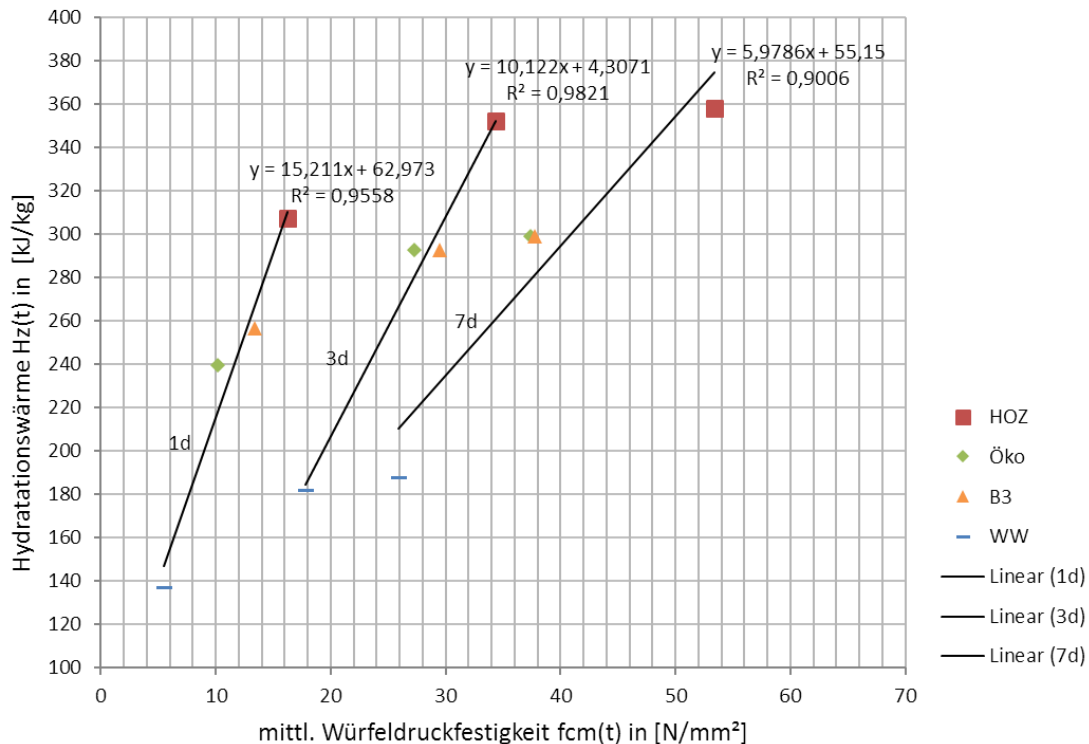


Abbildung 46: Zusammenhang der Hydrationswärme und der Würfeldruckfestigkeit der untersuchten Betonsorten im Betonalter von 1, 3 und 7 Tagen

Vergleicht man die 4 Betonmischungen, wird deutlich ersichtlich, dass die niedrige maximale Wärmeentwicklung im WW Beton mit großen Einbußen bei der Druckfestigkeit erkauft werden muss. Auch gut ersichtlich ist, dass der Öko-Beton sehr nahe am B3-Beton mit höherem PZ-Anteil liegt und somit diesen auch u.U. ersetzen könnte. Mit einer etwas genauer angepassten Rezeptur müsste die etwas höhere B3 Betonfestigkeit erreichbar sein.

Etwas nach „oben“ abgesetzt hat sich der HOZ-Beton. Bei einer Mischung von angeblich 60% PZ und 40% HÜS überrascht die hohe Temperatur und hohe Festigkeit, vor allem auch im Verhältnis zum Öko-Beton, der eine ähnliche Rezeptur hat. Eine Erklärung wäre, dass der Hüttensand im HOZ-Beton eine andere Zusammensetzung/Beschaffenheit hat und damit zur höheren Temperatur und Festigkeit beiträgt, als der im Öko-Beton enthaltene Hüttensand. Dem sollte nachgegangen werden.

Um die Beziehungen zwischen der Wärmentwicklung und der Festigkeitsentwicklung über die Zeitachse bei den 4 Betonsorten zu untersuchen, wurden Quotienten aus der modellhaft ermittelten Hydrationswärme $H_z(t)$ und der gemessenen mittleren Druckfestigkeit $f_{cm}(t)$ im jeweiligen Betonalter gebildet. In den nachfolgenden Tabellen und Grafiken sind die Werte dargestellt.

Tabelle 22: Hydratationswärmen Hz(t), mittl. Druckfestigkeiten fcm(t) und Verhältniszahlen für die Betonsorten HOZ und Öko

Betonalter [h]	Öko						HOZ					
	Hz(t) [kJ/kg]	fcm(t) [N/mm ²]	fcm(t) opt.	fcm(t)/ fcm(28)	Hz(t)/ fcm(t)	fcm(t)/ Hz(t)	Hz(t) [kJ/kg]	fcm(t) [N/mm ²]	fcm(t) opt.	fcm(t)/ fcm(28)	Hz(t)/ fcm(t)	fcm(t)/ Hz(t)
24	239,4	10,15	11,93	0,19	23,58	0,04	307,3	16,24	18,36	0,25	18,92	0,05
48	288,0		20,33		14,16	0,07	346,5		28,96		11,97	0,08
72	292,7	27,24	25,75	0,52	10,74	0,09	352,2	34,36	35,44	0,53	10,25	0,10
96	293,8		29,65		9,91	0,10	352,2		39,97		8,81	0,11
120	296,2		32,64		9,08	0,11	353,7		43,40		8,15	0,12
144	293,9		35,03		8,39	0,12	355,8		46,11		7,72	0,13
166	299,1	37,36	37,02	0,72	8,01	0,12	358,1	53,40	48,33	0,82	6,71	0,15

Tabelle 23: Hydratationswärmen Hz(t), mittl. Druckfestigkeiten fcm(t) und Verhältniszahlen für die Betonsorten B3 und WW

Betonalter [h]	B3						WW					
	Hz(t) [kJ/kg]	fcm(t) [N/mm ²]	fcm(t) opt.	fcm(t)/ fcm(28)	Hz(t)/ fcm(t)	fcm(t)/ Hz(t)	Hz(t) [kJ/kg]	fcm(t) [N/mm ²]	fcm(t) opt.	fcm(t)/ fcm(28)	Hz(t)/ fcm(t)	fcm(t)/ Hz(t)
24	256,6	13,34	16,01	0,29	19,24	0,05	136,9	5,52	5,06	0,16	24,81	0,04
48	290,5		23,34		12,45	0,08	176,1		11,34		15,52	0,06
72	292,8	29,51	27,59	0,65	9,92	0,10	182,1	17,80	16,23	0,51	10,23	0,10
96	293,3		30,48		9,62	0,10	183,3		20,09		9,13	0,11
120	294,3		32,62		9,02	0,11	184,3		23,23		7,93	0,13
144	296,5		34,30		8,65	0,12	185,9		25,87		7,19	0,14
166	298,7	37,74	35,66	0,83	7,91	0,13	187,8	25,90	28,12	0,74	7,25	0,14

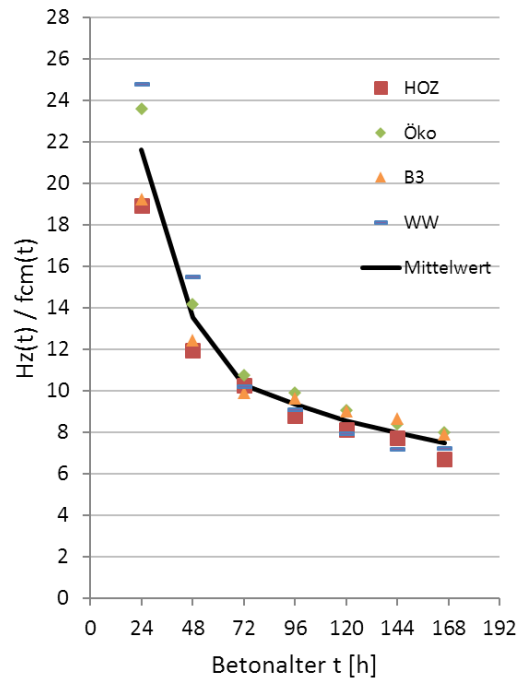
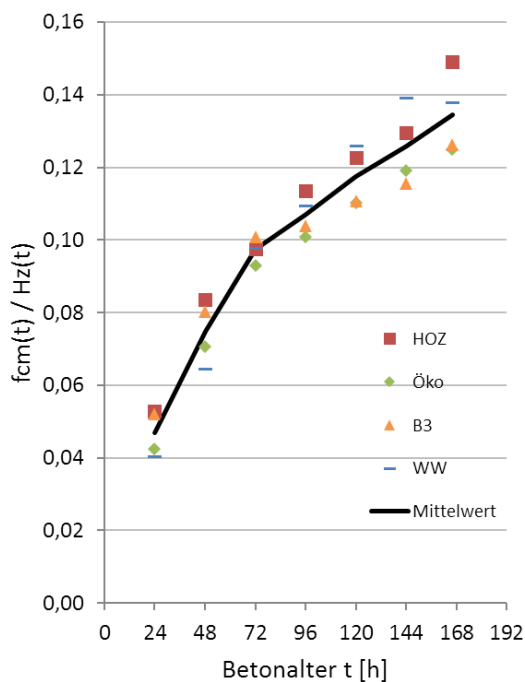


Abbildung 47: Verhältniszahlen fcm(t) / Hz(t) links und Hz(t) / fcm(t) rechts, aufgetragen über die Zeit

Wie aus der Grafik ersichtlich gibt es einen exponentiellen Zusammenhang zwischen den Verhältniszahlen aus Wärme und Festigkeit (Ordinate) und der Zeit (Abszisse).

Wie aus der linken Grafik ersichtlich, ergibt sich bei 1 J/g freigesetzter Wärme am ersten Tag ein Festigkeitszuwachs von ca. 0,05 N/mm² und, mit abnehmender Tendenz, am siebenten Tag ein Festigkeitszuwachs von 0,15 N/mm². Dies ist rund das 3-fache des Anfangswertes. In der rechten Grafik ist derselbe Zusammenhang mit inversen Quotienten dargestellt. Hier sieht man, dass für 1 N/mm² Festigkeitszuwachs am ersten Tag ca. 21 J/g und am 7 Tag nur ca. 7 J/g Wärme freigesetzt wird. Vereinfacht lässt sich der Zusammenhang folgendermaßen erklären. In der frühen Phase der Hydratation, setzt eine chemische Reaktion ein, die eine starke Wärmeentwicklung bewirkt, die jedoch nicht, auf Grund des noch größeren Porenraums und der Abstände der Kristalle zueinander, proportional in Festigkeit umgesetzt werden kann. Erst nach Tagen, wenn die Hydratationswärme nur noch langsam zunimmt, kann die Reaktion deutlich stärker in Festigkeit umgewandelt werden, da die Porenräume kleiner werden und die Kristalle der Hydratationsprodukte aufeinanderstoßen.

Was die Datenbasis betrifft, gilt es hier noch anzumerken, dass die verwendeten Tabellenwerte auf Basis der gemessenen Ist-Werte und der Modelle aus dem „fib Model Code 2010“ und dem „Wärmemodell“ ermittelt wurden.

5 Versuchsprogramm

Die für diese Arbeit durchgeführten Optimierungsversuche zur Erreichung besserer Verhältniswerte aus der Wärme- und Festigkeitsentwicklung wurden am Mörtel durchgeführt. Dazu wurden insgesamt 22 Mörtelmischungen untersucht. Außerdem wurde zusätzlich zu den im vorherigen Kapitel gezeigten eigenen Untersuchungen an vier Betonsorten (Wilpernig, 2019), eine weitere Betonsorte mit den gleichen Methoden auf ihre Wärme- und Festigkeitsentwicklung untersucht. Ergänzend zu den Untersuchungen der Wärme- und Festigkeitsentwicklung wurden für alle fünf Betonsorten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zum Wassereindringwiderstand und Karbonatisierungswiderstand durchgeführt.

5.1 Untersuchungen am Mörtel

5.1.1 Mörtelentwurf und Bindemittelzusammensetzungen

Für die vorgenommenen Untersuchungen am Mörtel war es zunächst notwendig eine geeignete Mörtelzusammensetzung auszuwählen. Die Mörtelzusammensetzung wurde, wie für die genormte Mörtel-Druckfestigkeitsprüfung gem. ÖN EN 196-1 (Austrian Standards Institute 2016) üblich, massenmäßig zu drei Teilen Sand 0/4 (gleicher Sand wie bei Betonmischungen), einem Teil Bindemittel und einem halben Teil Wasser ausgewählt. Unter Berücksichtigung der Definition des Gesamtbindemittelgehalts B_G (= gesamtes Gemisch aus Zement, puzzolanischen und latent hydraulischen, sowie inert wirksamen pulverförmigen Stoffen mit einem Korndurchmesser $< 125 \mu\text{m}$), ergibt sich so für die überwiegende Mehrheit der untersuchten Mörtelmischungen ein Wasserbindemittelwert $W/B_G = 0,50$. Erst für spätere Untersuchungen, wo der Wasserbindemittelwert bei gleichem Leimvolumen auf einen Wasserbindemittelwert $W/B_G = 0,46$ gesenkt wurde, kam es zu leichten Verschiebungen in der massenmäßigen Relation der Mörtelzusammensetzung (Näheres siehe folgende Tabelle). Verwendete Zusatzmittel wie etwa Erhärtungsbeschleuniger wurden additiv hinzugegeben (4 %-von B_G), wodurch sich der Wasserbindemittelwert für die Mischungen „CEM I_CSH Seed“ und „Öko_SR0_CSH-Seed“ auf 0,53 erhöht.

Die Bindemittelzusammensetzungen der einzelnen Mörtelmischungen setzen sich bis auf wenige, analog zu den Bindemittelzusammensetzungen der untersuchten Betonsorten, entweder aus 100% Normzement zusammen, oder enthalten 60 M-% Normzement und 40 M-% Zusatzstoffe (jeweils bezogen auf den Gesamtbindemittelgehalt B_G). Die Bindemittelzusammensetzungen sollten außerdem in das Zielfeld der Spezifikationen aus der Richtlinie „Weiße Wanne“ passen (u.a. Zusatzstoffanteil ≤ 40 M-% bei Verwendung von C_3A -reduziertem CEM I). Zwei der verwendeten Normzemente sind keine reinen Portlandzemente und weisen daher einen deutlich geringeren Klinkergehalt auf und beinhalten andere Bestandteile wie HÜS oder Calcit (Kalkstein). Die XRD Analyse zeigte damit, dass die beiden verwendeten Normzemente CEM II/A-M und CEM III/A eine ähnliche chemisch-mineralogische Zusammensetzung aufweisen, wie die eigens variierten Bindemittelzusammensetzungen, die

Die Zusatzstoffzusammensetzungen wurden für die meisten Untersuchungen nur geringfügig, massenmäßig und bei etwa gleichbleibendem mittleren Korndurchmesser d_{50} variiert. So konnte ohne massenmäßige Verschiebungen ein etwa gleich großes Leimvolumen von rd. 750 ml für nahezu alle Mischungen erreicht werden (siehe Versuchsdurchführung – Mörtelkonsistenz). Dies ermöglicht es, hinsichtlich der Verarbeitbarkeit der frischen Mörtelmischungen, vergleichende Aussagen treffen zu können. Stärkere Abweichungen beim Leimvolumen ergaben sich bei den Mörtelmischungen, wo CSH-Seeding-Mittel, die additiv dazu gegeben wurden, zum Einsatz kamen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Bindemittelzusammensetzung der untersuchten Mörtelmischungen:

Tabelle 24: Bindemittelzusammensetzung der Untersuchten Mörtelmischungen in [%-B_G]

Bindemittel- zusammensetzung B _G					Aufteilung in [%-B _G]												Zusatz- mittel
					Normzement (CEM)					Zusatzstoffe							
Mörtelbez.	B _G	W/B _G	W/B _H	V _{Leim}	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 R SRO WT27 C ₃ A-frei	CEM II/ A-M(S-L) 42,5 N WT 38	CEM III/A 52,5 R	Σ	AHWZ	HÜS	QM	KSM	KSM Susp.	MK	Σ	EB (Fest- stoff)
Ref_Öko	900	0,50	0,54	749,5	60				60		32,5		7,5			40	
Ref_HOZ	900	0,50	0,52	750,0				100	100							0	
Ref_B3	900	0,50	0,55	747,0			100		100							0	
Ref_WW	900	0,50	0,54	751,3		60			60	40						40	
Ref_CEM I	900	0,50	0,50	737,5	100				100							0	
Ref_CEM I_SRO	900	0,50	0,51	733,9		100			100							0	
Öko_SRO	900	0,50	0,55	747,1		60			60		32,5		7,5			40	
Öko_CEM 50/50	900	0,50	0,54	749,2	30	30			60		32,5		7,5			40	
HOZ_Öko	900	0,50	0,56	757,8				60	60		32,5		7,5			40	
Öko_HÜS 100	900	0,50	0,50	749,3	60				60		40					40	
WW_CEM I	900	0,50	0,53	753,4	60				60	40						40	
Öko_SRO_KSM Susp.	900	0,50	0,54	750,5	60				60		32,5			7,5		40	
Öko_SRO_MK	900	0,50	0,52	749,5		60			60		32,5		3		4,5	40	
Öko_SRO_CSH-Seed	908	0,53	0,58	776,2		59,5			59,5		32,2		7,4			39,6	0,9
CEM I_CSH-Seed	908	0,53	0,53	768,5	99,1				99,1							0	0,9
CEM I_CO2	900	0,50	0,50	737,5	100				100							0	
Öko_0,46	942	0,46	0,50	749,5	60				60		32,5		7,5			40	
Öko_QM	900	0,50	0,54	749,9	60				60		32,5		7,5			40	
Öko_QM_0,46	942	0,46	0,50	749,9	60				60		32,5		7,5			40	
Öko_SRO_0,46	942	0,46	0,51	747,1		60			60		32,5		0	7,5		40	
Öko_SRO_QM	900	0,50	0,55	748,6		60			60		32,5		7,5			40	
Öko_SRO_QM_0,46	940	0,46	0,51	748,6		60			60		32,5		7,5			40	

Aus den chemisch-mineralogischen Untersuchungen der Ausgangsstoffe, die mittels XRD erfolgten, konnten die verwendeten Zemente näher charakterisiert werden (siehe Kapitel Ausgangsstoffe). Die Bestandteile der untersuchten Bindemittelzusammensetzungen, die sich aus den schon beschriebenen Zementen (inkl. etwaiger Zumahlstoffe) und Zusatzstoffen zusammensetzen, wurden gem. folgender Tabelle in Klinker, Sulfate, inerte Stoffe und sonstige hydr. wirksame Stoffe unterschieden und entsprechend der Mörtelmischungen und jeweiligen Bindemittelzusammensetzung aufgeschlüsselt. Die darauffolgende Abbildung veranschaulicht die aus den XRD-Messungen¹ abgeleitete Zusammensetzungen anhand einer Säulen-Grafik.

¹ * Amorphe Stoffe gem. Herstellerangaben aufgeteilt in HÜS und FA: CEM II/A-M(S-L) Zement sulfatträgerfrei gem. ONR 29196-4 vom Hersteller angegeben. CEM III/A enthält lt. Email des Herstellers nur HÜS und CEM I. AHWZ gem. Diplomarbeit Heinrich 2018 (nach ONR 29196-4 bestimmt) und Prielinger 2019 (mittels XRD)

Tabelle 25: Bindemittelzusammensetzung B_G aufgeteilt nach Klinker, Sulfaten, inerten und hydr. wirksamen Zumahl- oder Zusatzstoffen

Bindemittel-zusammensetzung B _G			Aufteilung gem. XRD* in [%-B _G]												
Mörtelbez.	B _G	W/B _G	Klinker	Kalzium-Sulfat	Alkali-Sulfat	Sulfate	Calcit	Dolomit	Quarz	Inerte Stoffe	HÜS	FA	MK	Hydr. Stoffe	Σ
Ref_Öko	900	0,50	56,2	3,9		3,9	7,5			7,5	32,5			32,5	100
Ref_HOZ	900	0,50	53,2	4,4	3,6	8,0	3,8	0,6		4,4	34,3			34,3	100
Ref_B3	900	0,50	56,2	3,9	0,9	4,8	9,5		0,2	9,7	22,9	6,6		29,5	100
Ref_WW	900	0,50	55,2	3,0	0,4	3,4	6,9		0,9	7,8	26,4	7,2		33,6	100
Ref_CEM I	900	0,50	93,6	6,5		6,5									100
Ref_CEM I_SRO	900	0,50	92,0	5,0	0,6	5,6	2,4			2,4					100
Öko_SRO	900	0,50	55,2	3,0	0,4	3,4	8,9			8,9	32,5			32,5	100
Öko_CEM 50/50	900	0,50	56,2	3,5	0,2	3,6	7,5			7,5	32,5			32,5	100
HOZ_Öko	900	0,50	31,9	2,6	2,2	4,8	9,8	0,4		10,1	53,1			53,1	100
Öko_HÜS 100	900	0,50	56,2	3,9		3,9					40,0			40,0	100
WW_CEM I	900	0,50	56,2	3,9		3,9	5,5		0,9	6,4	26,4	7,2		33,6	100
Öko_SRO_KSM Susp.	900	0,50	56,2	3,9		3,9	7,5			7,5	32,5			32,5	100
Öko_SRO_MK	900	0,50	55,2	3,0	0,4	3,4	4,4			4,4	32,5		4,5	37,0	100
Öko_SRO_CSH-Seed	908	0,53	55,6	3,0	0,4	3,3	8,9			8,9	32,2			32,2	100
CEM I_CSH-Seed	908	0,53	93,7	6,4		6,4									100
CEM I_CO2	900	0,50	93,6	6,5		6,5									100
Öko_0,46	942	0,46	56,2	3,9		3,9	7,5			7,5	32,5			32,5	100
Öko_QM	900	0,50	56,2	3,9		3,9			7,5	7,5	32,5			32,5	100
Öko_QM_0,46	942	0,46	56,2	3,9		3,9			7,5	7,5	32,5			32,5	100
Öko_SRO_0,46	942	0,46	55,2	3,0	0,4	3,4	8,9			8,9	32,5			32,5	100
Öko_SRO_QM	900	0,50	55,2	3,0	0,4	3,4	1,4		7,5	8,9	32,5			32,5	100
Öko_SRO_QM_0,46	940	0,46	55,2	3,0	0,4	3,4	1,4		7,5	8,9	32,5			32,5	100

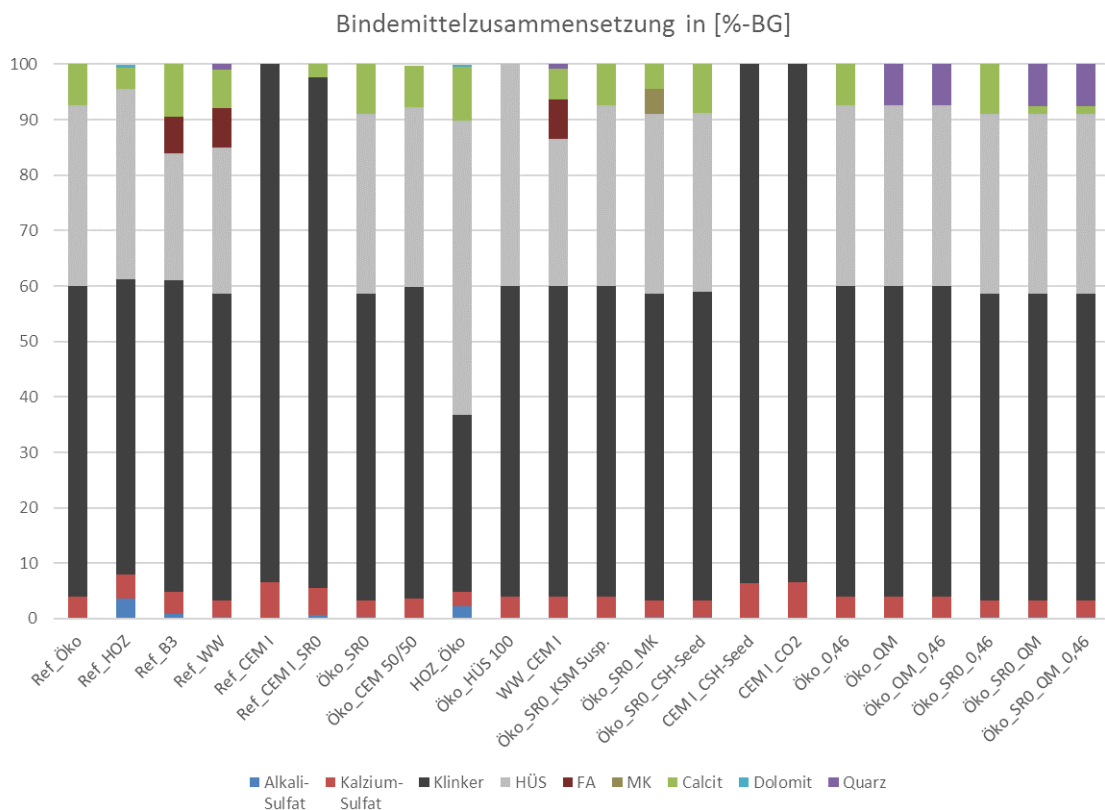


Abbildung 48: Übersicht über die Bindemittelzusammensetzung B_G der untersuchten Mörtel

5.1.2 Methoden

Wie schon einleitend erwähnt liegt das Hauptaugenmerk dieser Arbeit bei den Mörtel Untersuchungen bei der Ermittlung der Wärme- und Festigkeitsentwicklung der verschiedenen Mörtelmischungen. Außerdem werden im Zuge der Probekörperherstellung am frisch hergestellten Mörtel Konsistenzprüfungen durchgeführt, welche ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit der Mörtelmischungen sind. Die Methoden der vorgenommenen Untersuchungen werden im Folgenden beschrieben.

Wärmeflussmessungen mittels isothermer Kalorimetrie

Für die Wärmemessungen am Mörtel wird ein modernes Wärmeflusskalorimeter verwendet, das am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, für Untersuchungen zur Verfügung steht. Die mit einem Wärmeflusskalorimeter gemessenen Wärmemengen sind, wie schon in den Grundlagen beschrieben, isothermer Natur, da die Mörtelproben während der Erhärtung im Kalorimeter konstant auf 20°C Temperatur gehalten werden. (siehe dazu: Kapitel Prüfverfahren zur Ermittlung der Hydratationswärme von Zement). Die Wärme wird bis zu einem Alter von 72h gemessen. Großer Vorteil dieser Messgeräte ist, dass durch die präzise Messelektronik, der Wärmefluss gemessen werden kann, und damit besonders der frühe Hydratationsverlauf der unterschiedlichen Bindemittel anhand der Wärmefreisetzung untersucht werden kann.

Druckfestigkeitsprüfung

Um Aussagen über die Festigkeitsentwicklung der untersuchten Mörtelmischungen machen zu können werden mehrere Prüftermine festgelegt. Analog zu den Beton-Druckfestigkeitsprüfungen erfolgt die Druckfestigkeitsprüfung am Mörtel im Prüfalter von 1, 3, 7 und 28 Tagen. Auf die Prüfung der Festigkeit nach 56 Tagen wird bei den Mörtelversuchen verzichtet. Die Druckfestigkeit wurde nach der im Folgenden gezeigten Gleichung berechnet:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Dabei ist:

R_c	die Druckfestigkeit, in MPa (N/mm ²)
F_c	die Höchstlast beim Bruch, in N
1600	die Fläche der Platten (= 40 x 40 mm), in mm ²

Glg. (8)

Drei-Punkt-Biegezugversuch

Da die genormte Mörteldruckfestigkeitsprüfung an Prismen Hälften erfolgt und diese erst gebrochen werden müssen, wird auf die Messung der Biegezugfestigkeit nicht verzichtet. Neben Untersuchungen der Druckfestigkeit wird auch die Biegezugfestigkeit ermittelt.

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2}$$

Dabei ist:	R_f	die Biegezugfestigkeit, in MPa (N/mm ²)
	F_f	die auf die Mitte des Prismas aufgebrauchte Bruchlast, in N
	l	der Abstand zwischen den Tragrollen, in mm
	b	Breite des Querschnitts des Prismas, in mm
	h	Höhe des Querschnitts des Prismas, in mm

Glg. (9)

5.1.3 Versuchsdurchführung

Mörtelherstellung

Die trockenen Stoffe der untersuchten Mörtelmischungen wurden entsprechend ihrer Rezeptur auf 0,1 Gramm genau eingewogen.

Für die Herstellung von 6 Prismen wurden je Betonsorte 2700g quarzreicher Sand 0-4 mm, 900g Bindemittel und 450g herkömmliches Leitungswasser

Anschließend wurden die Stoffe 30 Sekunden trocken gemischt und das Anmachwasser hinzugegeben.



Abbildung 49: Mörtelherstellung – Einwaage und Mischen der verwendeten Stoffe

Nach Möglichkeit wurde versucht, die geeignete Mörtelmenge (etwa 80g) schnellstmöglich in das Kalorimeter einzubauen, was im nächsten Schritt noch vor der Konsistenzprüfung und der Probekörperherstellung erfolgte.

Untersuchung der Mörtelkonsistenz

Die Mörtelkonsistenz wurde gem. EN 1015-3 bestimmt (Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel). Die folgende Abbildung zeigt die vorgenommene Durchführung bei der Konsistenzprüfung:



Abbildung 50: Untersuchung der Mörtelkonsistenz – Ausbreitfließmaß und Ausbreitmaß

Ergebnisse:

Für einen schnelleren Überblick über die Bindemittelzusammensetzungen der einzelnen Mörtelmischungen wurde eine zweite Bezeichnung eingeführt. Die Bezeichnung gibt die massenmäßige Zusammensetzung der jeweiligen Mörtelmischung an. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse Ausbreitmaß (AM) und Ausbreitfließmaß (AFM) der untersuchten Mörtelmischungen. Die Bandbreite der Ergebnisse ist dabei nicht sehr groß, d.h. die Mörtelmischungen können hinsichtlich ihrer Verarbeitungseigenschaften als ziemlich gleichwertig betrachtet werden. Jene Mischungen, bei denen Seeding-Mittel additiv zugegeben wurde², wodurch sich das Leimvolumen und auch der W/B_G-Wert vergrößerte, zeigen deutlich höhere Werte. Auch die Mischung „Öko_SR0_QM“ setzte sich etwas „nach oben“ ab.

² Seeding-Mittel additiv bei den Mörtelmischungen „Öko_SR0_CSH-Seed“ und „CEM I_CSH-Seed“ zugegeben (W/B_G-Wert nach Einrechnung des Seeding-Mittels angegeben).

Bei der Mörtelmischung „Öko_SR0_KSM_Susp.“ wurde der Wasseranteil der Suspension bei der Rezeptierung eingerechnet.

Tabelle 26: Ergebnisse aus den Untersuchungen der Mörtelkonsistenz – AFM und AM

Mörtelzusammensetzung		Bindemittelgehalt	W/B	Leimvolumen	Konsistenz	
		B _G	W/B _G	V _{Leim}	AFM	AM
Bezeichnung 1	Bezeichnung 2	[g]	[-]	[ml]	[mm]	
Ref_Öko	60 CEM I_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	900	0,50	749,5	108	145
Ref_HOZ	100 CEM III/A	900	0,50	750,0	100	148
Ref_B3	100 CEM II/A-M	900	0,50	747,0	108	158
Ref_WW	60 CEM I SR0_40 AHWZ	900	0,50	751,3	100	143
Ref_CEM I	100 CEM I	900	0,50	737,5	105	143
Ref_CEM I SR0	100 CEM I SR0	900	0,50	733,9	103	153
Öko_SR0	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	900	0,50	747,1	100	150
Öko_CEM 50/50	30 CEM I_30 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	900	0,50	749,2	108	158
HOZ_Öko	60 CEM III/A_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	900	0,50	757,8	105	155
Öko_HÜS 100	60 CEM I_40 HÜS	900	0,50	749,3	103	155
WW_CEM I	60 CEM I_40 AHWZ	900	0,50	753,4	103	148
Öko_SR0_KSM Susp.	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 MFCAL Susp.	900	0,50	750,5	103	155
Öko_SR0_MK	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_3 MFCAL_4,5 MFMK	900	0,50	749,5	105	155
Öko_SR0_CSH-Seed	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 MFCAL + CSH-seed	908	0,53	776,2	113	185
CEM I_CSH-Seed	100 CEM I + CSH-seed	908	0,53	768,5	110	183
CEM I_CO2	100 CEM I CO2	900,0	0,50	737,5	100	135
Öko_0,46	60 CEM I_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	941,8	0,46	749,5	103	143
Öko_QM	60 CEM I_32,5 HÜS_7,5 EFQM	900	0,50	749,9	105	165
Öko_QM_0,46	60 CEM I_32,5 HÜS_7,5 EFQM	941,8	0,46	749,9	103	138
Öko_SR0_0,46	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 MFCAL	942,0	0,46	747,1	103	145
Öko_SR0_QM	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 EFQM	900	0,50	748,6	105	173
Öko_SR0_QM_0,46	60 CEM I SR0_32,5 HÜS_7,5 EFQM	940,2	0,46	748,6	103	150

Herstellung der Probekörper und Probekörperlagerung

Für die Untersuchung der Festigkeitsentwicklung an insgesamt 22 Mörtelmischungen wurden Drei-Punkt-Biegezugfestigkeits- und Druckfestigkeitsprüfungen an vier Prüfterminen vorgenommen. Die Festigkeitsprüfungen erfolgten für alle Mörtelmischungen im Alter von 1, 3, 7 und 28 Tagen. Für die Biegezugversuche war es notwendig Mörtelprismen herzustellen, die nach erfolgter Prüfung auch für die Druckfestigkeitsprüfung verwendet werden konnten. Je Mörtelmischung wurden sechs Prismen mit einem Nennmaß von 40 x 40 x 160 mm hergestellt. Die gebrochenen Mörtelprismen (Prismen Hälften) konnten in weiterer Folge für die Druckfestigkeitsprüfung verwendet werden.

Die ersten 24 Stunden bis unmittelbar vor dem ersten Prüftermin (1-Tages-Festigkeit), wurden die Probekörper in der Stahlform, mit einer Glasscheibe abgedeckt, unter Laborbedingungen von rd. 20°C und 65% rel LF, gelagert. Nach dem Ausschalen wurden die Probekörper mit Ölkreide beschriftet. Die weitere Lagerung der Probekörper erfolgte durchgehend, bis zum letzten Prüftermin nach 28 Tagen, in einem Wasserbad mit rd. 20°C Wassertemperatur.



Abbildung 51: Mörtel - Lagerung in der Stahlform und unter Wasser

Druckfestigkeitsprüfung an Mörtel-Prismen-Hälften

Die folgende Abbildung zeigt die mit der Mörteldruckprüfmaschine durchgeführten Mörtel-Druckfestigkeitsprüfungen am Beispiel unterschiedlicher Prismen Hälften:



Abbildung 52: Druckfestigkeitsprüfung an Mörtel-Prismen-Hälften

Drei-Punkt-Biegezugfestigkeitsprüfung an Mörtel-Prismen

Die folgende Abbildung zeigt die durchgeführten Drei-Punkt-Biegezugfestigkeitsprüfungen am Beispiel verschiedener Mörtelprismen. Die Ergebnisse aus den Messungen sind dem Anhang A.1 zu entnehmen.



Abbildung 53: Drei-Punkt-Biegezugfestigkeitsprüfung an Mörtel Prismen

5.2 Ergänzende Untersuchungen am Beton

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusätzlich zu den vier Betonsorten aus den eigenen Voruntersuchungen (Wilpernig, 2019), eine weitere neue Betonsorte mit den gleichen Methoden auf ihre Wärme- und Festigkeitsentwicklung hin untersucht. Ergänzend zu den Untersuchungen der Wärme- und Festigkeitsentwicklung der insgesamt fünf Betonsorten, wurden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeitsbeurteilung vorgenommen. Dazu wurden die Betonprobekörper auf ihren Wassereindring- und Karbonatisierungswiderstand geprüft.

5.2.1 Untersuchung einer neuen Betonsorte

Voruntersuchungen am „Öko-Beton“ haben hohe Festigkeitsreserven bei allerdings auch höherer Wärmeentwicklung gegenüber dem „WW-Beton“ ergeben. Der wesentlichste Unterschied ließ sich durch die Verwendung unterschiedlicher PZ in den beiden Mischungen erklären (60 M-% PZ und 40 M-% Zusatzstoffe). Erste Erkenntnisse aus den Wärme- und Festigkeits-Untersuchungen am Mörtel, unter Variation der Zemente (bei gleicher Zusatzstoffzusammensetzung), gaben Anlass den bereits in den Voruntersuchungen untersuchten „Öko-Beton“ erneut mit „C₃A-freiem“ SR0-Zement herzustellen, um gegen den „WW-Beton“ (Referenzbeton) im Performancevergleich anzutreten. Für die neue Betonsorte Öko_SR0 ergibt sich folgende Bindemittelzusammensetzung:

60 M-%	CEM I 42,5 R SR0 WT27
40 M-%	Zusatzstoffe:
7,5 M-%	KSM fein (Rohdichte ca. 2,72 kg/dm ³ , Partikelgröße ca. d ₅₀ ≈ 1 µm)
32,5 M-%	HÜS (Rohdichte ca. 2,84 kg/dm ³ , Partikelgröße etwa gleich wie PZ)

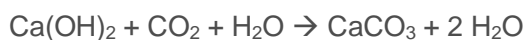
5.2.2 Karbonatisierungswiderstand

Eine wesentliche Voraussetzung für die gemeinsame Tragwirkung von Beton und Stahl und für die Dauerhaftigkeit von Bauteilen aus Stahlbeton ist, dass die Bewehrung im Beton auf Dauer vor Korrosion geschützt ist. Der dauerhafte Korrosionsschutz beruht darauf, dass die Porenlösung des Betons im Bereich der Bewehrung eine große OH^- -Ionen-Konzentration und daher einen pH-Wert oberhalb von 12,5 aufweist. Das bei der Zementhydratation in großen Mengen (20 – 25 M.-% bezogen auf den Zementgehalt für CEM I) abgespaltene Calciumhydroxid sorgt weiterhin für eine Pufferung des hohen pH-Wert von 12,5. Unter diesen Bedingungen bildet sich auf der Oberfläche des Stahles eine sogenannte Passivschicht. Dies ist eine sehr dünne, aber dichte Schicht aus Eisenoxid, die eine Auflösung des Eisens in Ionen verhindert. Eine Korrosion von Stahl im Beton kann daher nur auftreten, wenn gleichzeitig drei Bedingungen erfüllt sind (Bergmeister u. a., 2014, S.90):

- Die Passivschicht wird durch Karbonatisierung oder durch Chloride zerstört.
- Der elektr. Widerstand des Betons wird durch einen hohen Feuchtegehalt deutlich vermindert.
- Sauerstoff kann in ausreichender Menge bis zum Bewehrungsstahl vordringen.

Karbonatisierung wird durch das Eindringen von Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft in den Beton verursacht. Die CO_2 -Konzentration in der Luft beträgt etwa 0,03 Vol.-%, kann aber in Industrielatmosphäre bis auf Werte von ca. 1 Vol.-% ansteigen. Das CO_2 reagiert zwar mit allen Komponenten des Zementsteins, die calciumhaltig sind, am wichtigsten ist jedoch die Reaktion mit dem Calciumhydroxid, das für den hohen pH-Wert des Porenwassers des nicht carbonatisierten Zementstein hauptverantwortlich ist. Die Karbonatisierung bewirkt einen Abfall des pH-Wert < 9 , sodass die Passivierung eines in Beton eingebetteten Stahles nicht mehr gegeben ist. (Bergmeister u. a., 2014, S.91)

Die chemischen Vorgänge beim Eindringen von CO_2 in den Zementstein können wie folgt beschrieben werden:



Methode

Die Beurteilung des Karbonatisierungswiderstandes von Mörteln und Beton, kann nach dem Stand der Technik mit dem sogenannten beschleunigten Verfahren vorgenommen werden. Bei diesem Verfahren werden die Probekörper nicht unter natürlichen Bedingungen gelagert, sondern nach erfolgter Vorlagerung unter konditionierter Raumluft und anschließend unter erhöhter gleichmäßiger CO_2 -Konzentration und unter konstanter relativer Luftfeuchtigkeit.

Die für die beschleunigte Karbonatisierung notwendigen Randbedingungen können durch den automatisch regulierten CO_2 -Schrank sichergestellt werden. Konstante Bedingungen während der gesamten Lagerung sind wichtige Voraussetzung für eine objektive wissenschaftliche Beurteilung der Prüfergebnisse.

Versuchsdurchführung

Für die Prüfung des Karbonatisierungswiderstands wurden für die untersuchten Betonsorten je Betonsorte aus derselben Mischung (Mischung 1) zwei prismatische Probekörper mit einer Abmessung von 100 x 100 x 400 mm hergestellt. Die Probekörper wurden nach etwa 24 Stunden aus den Schalungsformen genommen, und anschließend bis zu einem Betonalter von 42 Tagen bei rd. 20 °C Wassertemperatur Unterwasser gelagert. Nach der Wasserlagerung wurden die Probekörper bis zu einem Betonalter von 56 Tagen in einem Klimaraum mit konstant geregelter Raumluft (65% rel. LF, 20°C) gelagert. Nach dieser Lagerung wurden die Probekörper in den CO₂-Schrank umgelagert. Die CO₂-Konzentration beträgt für die vorgenommenen Versuche 2 Vol.-% (gegenüber 0,03 Vol.-% in normaler Atmosphäre) und 65% rel. Luftfeuchte. Die folgende Abbildung zeigt die Probekörper bei der Raumluftlagerung (Bild links u. mittig) und bei der Lagerung im CO₂-Schrank (Bild rechts):



Abbildung 54: Vorlagerung im Klimaraum (links) und Versuchslagerung im CO₂ Schrank (rechts)

Die erste Messung der Karbonatisierungstiefe, die sogenannte „Null“-Messung“ wurde im Betonalter von 56 Tagen, also am Tag der Umlagerung in den CO₂-Schrank, durchgeführt. Dieser Termin wurde ausgewählt, um dem Bindemittel im Beton ausreichend Zeit zu geben um ein dichtes Gefüge zu entwickeln noch bevor unter beschleunigten Bedingungen gelagert wurde. Weitere Messungen wurden nach 7, 28 und 70 Tagen Lagerung im CO₂-Schrank vorgenommen. Je Prüftermin und Betonsorte wurden jeweils zwei Probekörper mit der Druckprüfmaschine gebrochen. So ergeben sich vier Bruchflächen mit 100 x 100 mm Querschnitt für die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe. Die Bruchflächen wurden zunächst von losem Staub befreit und anschließend mit einer alkoholischen Indikatorlösung (Phenolphthalein) besprüht, um den Fortschritt der Karbonatisierung sichtbar zu machen. Die folgende Abbildung veranschaulicht das Vorgehen für die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe vom Brechen der Probe (links oben) bis zum Besprühen mit der Indikatorlösung (rechts unten).



Abbildung 55: Brechen der Probekörper und Besprühen mit Indikatorlösung Phenolphthalein

Nach etwa 30 Minuten Einwirkzeit wurde direkt mit den Messungen begonnen. Je Seitenlänge wurden fünf Messungen der Karbonatisierungstiefe vorgenommen. (Näheres siehe Ergebnisse und digitaler Anhang)

5.2.3 Wassereindringwiderstand

Die Wassereindringtiefe ist ein wichtiger Parameter für die Beurteilung des Eindringvermögens von flüssigen Medien in den Beton und ist damit ein Maß für die Gefüge Dichtigkeit des Betons. Ist die Eindringtiefe gering können daraus positive Eigenschaften hinsichtlich der Dichtigkeit des festen Betons unter Wasserdruck und hinsichtlich der Dauerhaftigkeit abgeleitet werden. So werden beispielsweise in der ÖBV-Richtlinie für Wasserundurchlässige Betonbauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) zulässige Wassereindringtiefen als Nachweis der Expositionsklassen XW definiert. Auch dient die Wassereindringtiefe gem. dieser Richtlinie als Nachweis am Festbeton gegenüber treibendem Angriff XAT und begrenzt abhängig vom Angriffsgrad, also abhängig von der Sulfat Ionenkonzentration (SO_4^{2-}) im anstehenden Boden/Grundwasser, die höchstzulässige Wassereindringtiefe mit bis zu 16 mm.

Methode

Die folgende schematische Darstellung zeigt den genormten Prüfaufbau gem. ONR 23303 PVB (Austrian Standards Institute 2010) für die Ermittlung der mittleren Wassereindringtiefe t :

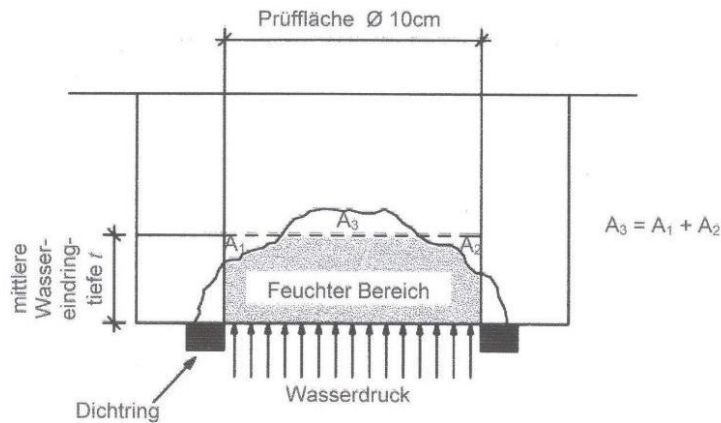


Abbildung 56: Prüfung der Wassereindringtiefe gem. ONR 23303
PVB (Austrian Standards Institute 2010)

Versuchsdurchführung

Für die Prüfung des Wassereindringwiderstands wurden für die untersuchten Betonsorten je Betonsorte aus derselben Mischung (Mischung 2) drei Plattenförmige Probekörper mit einer Abmessung von 200 x 200 x 120 mm hergestellt. Die Probekörper wurden nach etwa 24 Stunden aus den Schalungsformen genommen, und anschließend bis zu einem Betonalter von 56 Tagen bei rd. 20 °C Wassertemperatur Unterwasser gelagert. Nach der Wasserlagerung von 56 Tagen erfolgte die Vorbereitung der Probekörper und der Einbau in die Prüfmaschine.



Abbildung 57: WU Prüfung – Probekörpervorbereitung und Einbau in die Prüfmaschine



Abbildung 58: WU Prüfung – Einbau der Probekörper in die Prüfmaschine

Wie die obige Abbildung zeigt, wurden die Probekörper vor dem Einbau in die Prüfmaschine mit einem Winkelschleifer mit aufgespannter Diamantschleifscheibe flächig angeschliffen. Die Prüfmaschine wurde so eingestellt, dass die geschliffenen Probekörperflächen 4 Tage mit 1,75 bar Wasserdruck, und weitere 10 Tage mit 7 bar Wasserdruck beaufschlagt wurden. Der Druck wurde in regelmäßigen Abständen kontrolliert und es konnte über alle Versuche hinweg kein Druckverlust oder nennenswerter Wasserverlust verzeichnet werden. Nach insgesamt 14 Tagen Wasserdruckbeaufschlagung wurden die Probekörper aus der Prüfmaschine ausgebaut und unmittelbar danach für die Untersuchungen der Wassereindringtiefe mittig gebrochen.

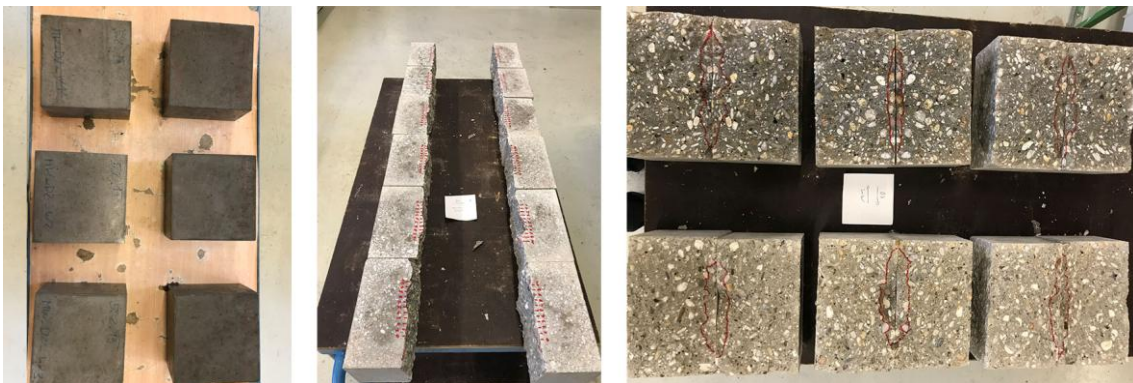


Abbildung 59: WU Prüfung – Brechen der Probekörper

Direkt nach dem Brechen der Probekörper wurde der Verlauf der Wassereindringtiefe mit einem wasserfesten Stift angezeichnet. Auch wurde ein Skalenmaß von 0 bis 10 cm für die Messungen, die im Anschluss je cm erfolgten, angezeichnet. Die Wassereindringtiefen wurden je cm Skalenmaß mit einer Schiebelehre (Ablesegenauigkeit 0,1 mm) gemessen.



Abbildung 60: WU Prüfung - Durchführung der Messungen

6 Ergebnisse

6.1 Wärme- und Festigkeitsentwicklung der untersuchten Mörtel

6.1.1 Aufbereitung der Daten aus den Wärmemessungen

Für die Optimierung der Verhältniszahlen aus Wärme- und Festigkeit wurden Versuche an insgesamt 22 Mörtelmischungen durchgeführt. Im Gegensatz zur Temperaturmessung am isolierten Probewürfel (Beton) mit anschließender Umrechnung auf adiabatische Temperatur und Wärmeverhältnisse über das bereits vorgestellte Wärmemodell, sind Messungen mit dem Wärmefluss-Kalorimeter genauer und effektiver. Daher wurden die im Folgenden gezeigten Untersuchungen am Feinbeton (Mörtel) durchgeführt (siehe Kapitel 2.2.5 und 5.1.2). Die korrespondierenden Druckfestigkeiten wurden ebenfalls am Mörtel ermittelt.

Die Wärmemessungen wurden mittels isothermer Wärmeflusskalorimetrie und die Festigkeitsmessungen (Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit) am genormten Mörtelprisma, nach bereits beschriebenen Verfahren, durchgeführt.

Die mit dem isothermen Wärmeflusskalorimeter aufgezeichneten elektrischen Spannungen U in [V] und die daraus abgeleitete Wärme-Leistung $Q(t)$ in [W] (auch als Wärmefluss bezeichnet) sind die Daten-Basis für die Ermittlung der „isothermen“ Leistungs- und Wärmekurven. Anhand der gewonnenen Daten (Rohdaten), ergeben sich Kurven für den Wärmefluss und die Wärmemenge, wie im Folgenden beispielhaft am Referenzmörtel „Ref_CEM I“ grafisch dargestellt:

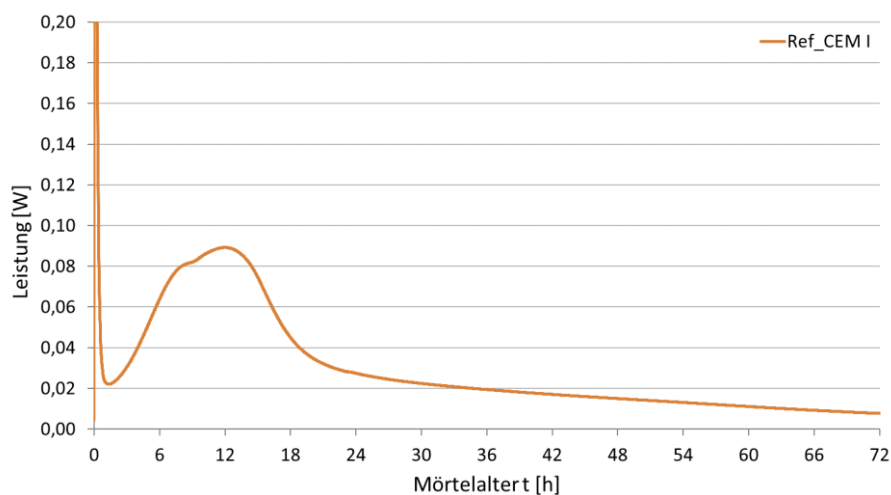


Abbildung 61: Wärmeflusskurven Rohdaten am Beispiel der Referenzmörtelmischung Ref_CEM I

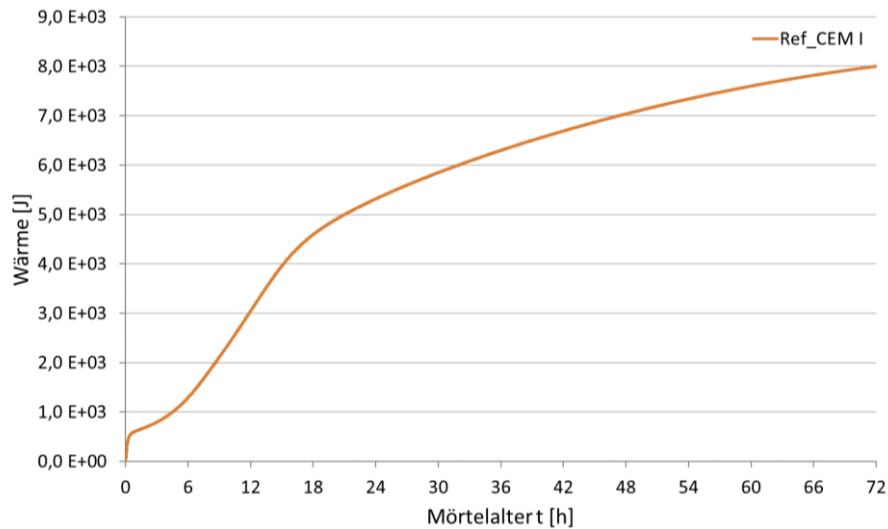


Abbildung 62: Wärmeentwicklung Rohdaten am Beispiel der Referenzmörtelmischung Ref_CEM I

Da sich die aufgezeichneten Rohdaten auf die entsprechende ins Kalorimeter eingebaute Mörtelmenge beziehen und um die unterschiedlichen Bindemittel in Bezug auf ihre Wärmeentwicklung vergleichen zu können erfolgt zunächst eine Umrechnung der gemessenen Leistung bzw. der daraus ermittelten Wärme der gesamten Probemasse m_{Probe} auf Watt bzw. Joule pro Gramm Bindemittel. Dabei wurde für alle Mörtelmischungen stets auf den Gesamtbindemittelgehalt B_G Bezug genommen.

Die an der Probemasse ermittelte Wärme wurde über folgende Beziehung auf Wärme pro Gramm Bindemittel [J/g] nach dem Massenerhaltungssatz umgerechnet und analog dazu auch die Leistung auf Watt pro Gramm Bindemittel [W/g] nach der folgenden Gleichung ermittelt:

$$1 \cdot \left[\frac{\text{J}}{\text{g}} \right] = \frac{1}{\left(\frac{m_{\text{BM}}}{m_{\text{Mörtel}}} \cdot m_{\text{Probe}} \right)} \cdot [\text{J}] \quad \text{bzw.} \quad 1 \cdot [\text{Joule}] = 1 \cdot \frac{m_{\text{BM}}}{m_{\text{Mörtel}}} \cdot m_{\text{Probe}} \cdot \left[\frac{\text{Joule}}{\text{g}_{\text{BM}}} \right]$$

mit:

m_{BM}Masse Bindemittel
$m_{\text{Mörtel}}$Masse Mörtel
m_{Probe}Masse Probe

Glg. (10)

Neben einer Normierung der Rohdaten, die sich nun auf die gewählte Menge Bindemittel bezieht, wurde es im nächsten Schritt notwendig, eine Setzung bezüglich des Startpunktes t_0 , vorzunehmen, an dem die Ermittlung der Wärmemenge (= kumulierte Wärme) beginnen soll. Als geeigneter Startpunkt t_0 wurde das bei Beginn der dormanten Periode auftretende lokale Minimum ausgewählt. Der gewählte Zeitpunkt entspricht etwa dem Erstarrungsbeginn der für die Untersuchungen verwendeten Zemente. Dieser variiert lt. Datenblatt der Hersteller zwischen 110 und 208 Minuten nach Wasserzugabe (siehe Kapitel 3.1). Die in

der Initialperiode entstandene Hydratationswärme, die durch erste chemische Reaktionen beim in Lösung gehen gekennzeichnet ist und hohe Wärmeflüsse aufweist, wird also für die weiteren Betrachtungen nicht in der Wärmeermittlung berücksichtigt.

Die folgende Abbildung veranschaulicht am Beispiel der untersuchten Mörtelmischung, mit reinem Portlandzement CEM I im Bindemittel (Ref_CEM I), die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Hydratationswärmemenge $H_z(t)$:

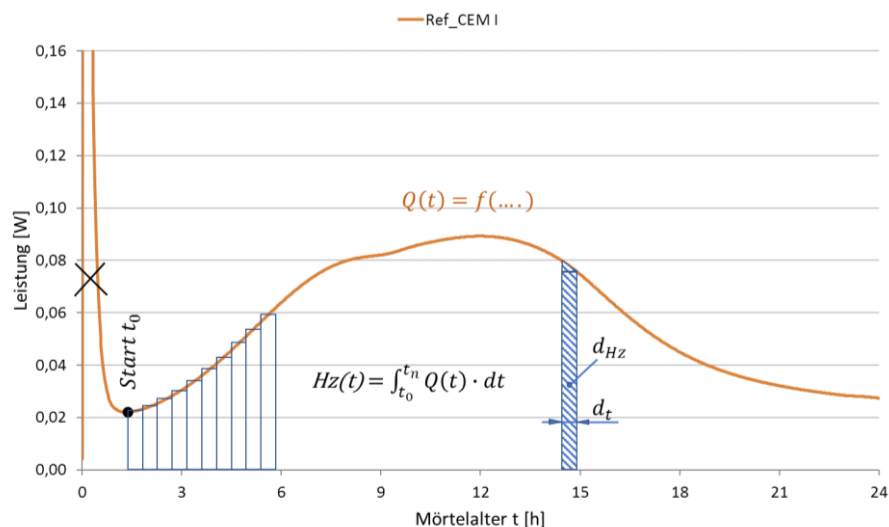


Abbildung 63: Berechnung der freisetzbaren Hydratationswärmemenge $H_z(t)$ am Beispiel der untersuchten Mörtelmischung Ref_CEM I

Aufgrund der Beschneidung der Wärmeflusskurven ergeben sich entsprechend niedrigere kumulierte Wärmemengen für die jeweils untersuchten Mörtelmischungen. Die in weiterer Folge gezeigten Wärmeflusskurven und kumulierten Wärmemengen werden entsprechend dieser Setzung nur ab dem Startzeitpunkt $t_0 = 0$ ausgewertet, jedoch ab dem Zeitpunkt der Wasserzugabe dargestellt.

Für die untersuchten Mörtelmischungen ergeben sich, aufgrund der vielfältigen Bindemittelzusammensetzungen und der oben beschriebenen Setzungen, unterschiedliche Startzeitpunkte t_0 für die Beschleunigungsperiode. Die Werte reichen von 57 Minuten nach Wasserzugabe beim Mörtel „CEM I_CSH-Seed“ bis zu 142 Minuten beim Mörtel „Ref_CEM I_SR0“. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die jeweils ermittelten Startzeitpunkte:

Tabelle 27: Startzeitpunkt t_0 der Beschleunigungsperiode für die untersuchten Mörtelmischungen (lokales Minimum)

Mörtelbezeichnung	Zeit n.		Mörtelbezeichnung	Zeit n.	
	Wasserzugabe	Wasserzugabe		Wasserzugabe	Wasserzugabe
	[min]	[min]		[min]	[min]
CEM I_CSH-seed	57		HOZ_Öko	100	
Ref_Öko	59		WW_CEM I	104	
Ref_WW 2	73		Öko_SR0_QM_w/b 0,46	108	
Ref_WW	76		Öko_SR0_w/b 0,46	117	
Ref_CEM I	79		Öko_C3A-frei_Setacarb	120	
Öko_C3A-frei	81		Ref_B3	123	
Öko_QM_w/b 0,46	82		CEM I_CO2	125	
Öko_w/b 0,46	82		Öko_C3A-frei_Meta	129	
Öko_QM	85		Öko_SR0_QM	134	
Öko_HÜS 100	86		Ref_HOZ 2	137	
Öko_CEM 50/50	94		Ref_HOZ	138	
Öko_C3A-frei_CSH-Seed	98		Ref_CEM I_C3A-frei	142	

6.1.2 Mörtelmischungen als Referenz

Als Referenz zu den untersuchten Betonsorten und als erste Basis für die Untersuchungen am Mörtel, wurden Mörtelproben mit derselben massenmäßig aufgeteilten Bindemittelzusammensetzung analog zu den bereits zuvor untersuchten Betonsorten (Wilpernig, 2019) untersucht. Als weitere Referenz gelten die beiden verwendeten PZ CEM I und CEM I SR0. Die folgende Abbildung zeigt den mit dem isothermen Kalorimeter ermittelten Wärmefluss in Milliwatt pro Gramm B_G und die zugehörige kumulierte Wärme in Joule pro Gramm B_G :

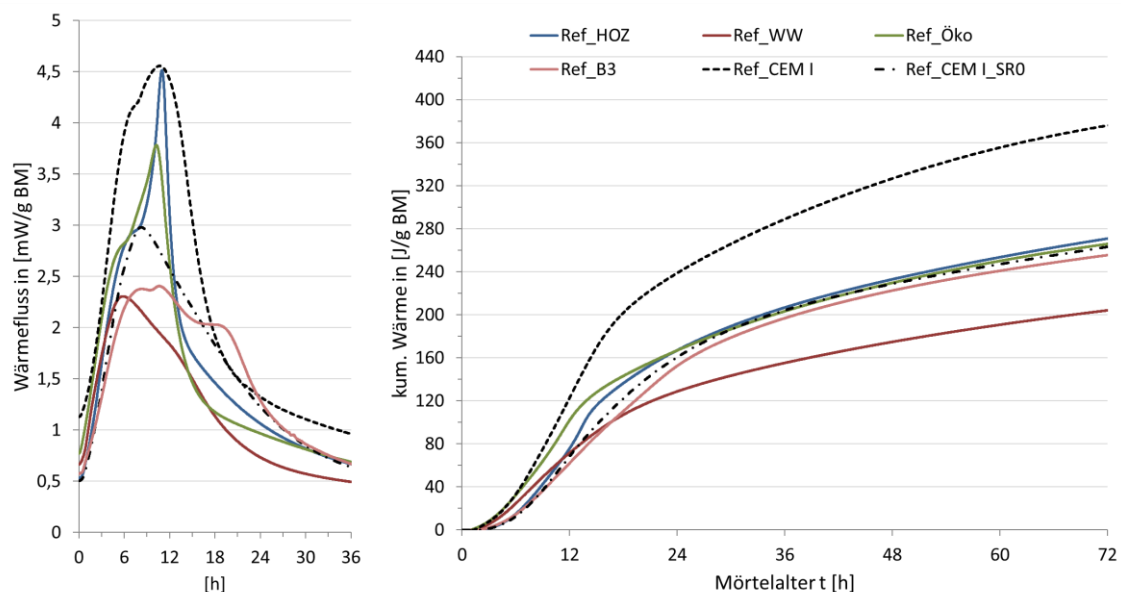


Abbildung 64: Wärmefluss und Wärmeentwicklung der Referenzmörtelmischungen gemessen am Wärmeflusskalorimeter (isotherme Lagerung 20 °C)

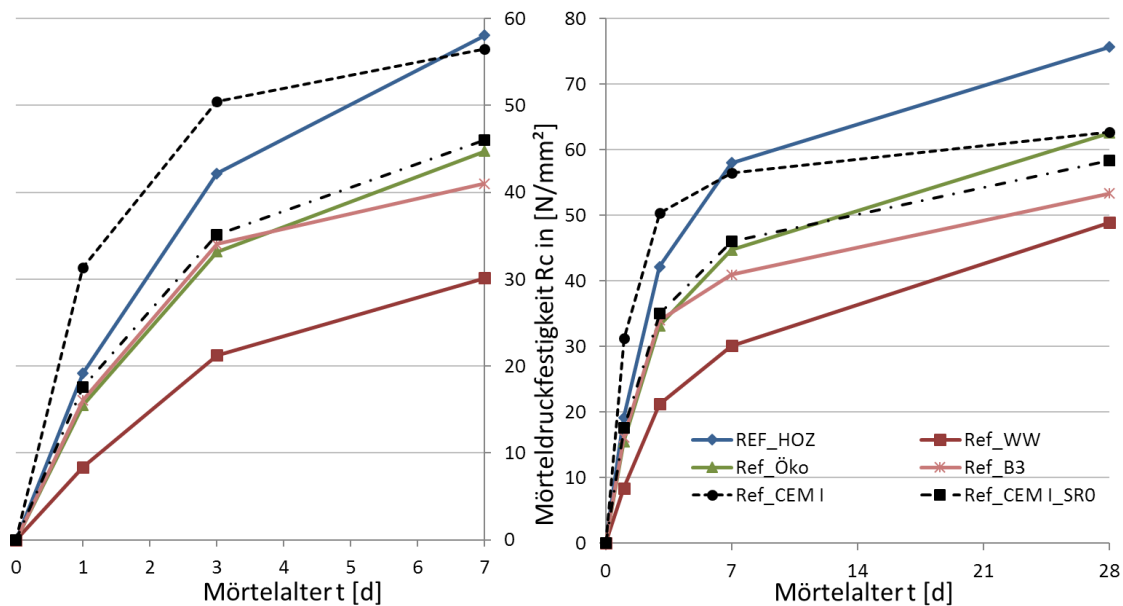


Abbildung 65: Mittlere Mörteldruckfestigkeiten $R_c(t)$ der untersuchten Referenzmörtel im jeweiligen Mörtelalter t ; $n = 3$

6.1.3 Variation von CEM I und CEM I SR0 Zement

Die einfache Möglichkeit die Spezifikation der Richtlinie „Weiße Wanne“, hinsichtlich der Wärme- und Festigkeitsentwicklung zu erreichen, ist der Einsatz von C_3A -freien Zementen. Für die Versuche, die die Möglichkeiten am Öko-Referenzmörtel aufzeigen sollen, wurden zwei Mörtelvarianten ausprobiert. Bei der ersten Variante wird der 60 M-% enthaltene CEM I Zement im Referenzmörtel „Ref_Öko“ zu 100% durch den C_3A -freien CEM I SR0 Zement ersetzt (Öko_SR0), bei der zweiten Variante durch 50% CEM I SR0 Zement (Öko_CEM I 50/50).

Wie erwartet, kann man die entstehende Hydrationswärme durch den Einsatz von C_3A -freiem CEM I SR0 Zement deutlich absenken. Durch die Variante 50% Zementvariation kann gezeigt werden, dass man je nach gewünschter Absenkung, die Mischung CEM I und CEM I SR0 variieren kann. Die Wirkung ist bei den gezeigten Mörtelmischungen nahezu linear. Durch den Einsatz von CEM I SR0 Zement wird das Wärmeflussmaximum der Hydrationswärmeentwicklung nach „Früh“ verlagert, wobei die Anstiegsflanke bei gleicher Steigung leicht nach „Spät“ verlagert wird. Bei der kumulierten Wärme sieht man eine Wärmereduktion von 35% bei der Variante 100% C_3A -frei und von 13% bei der Variante 50% C_3A -frei nach 72 Stunden.

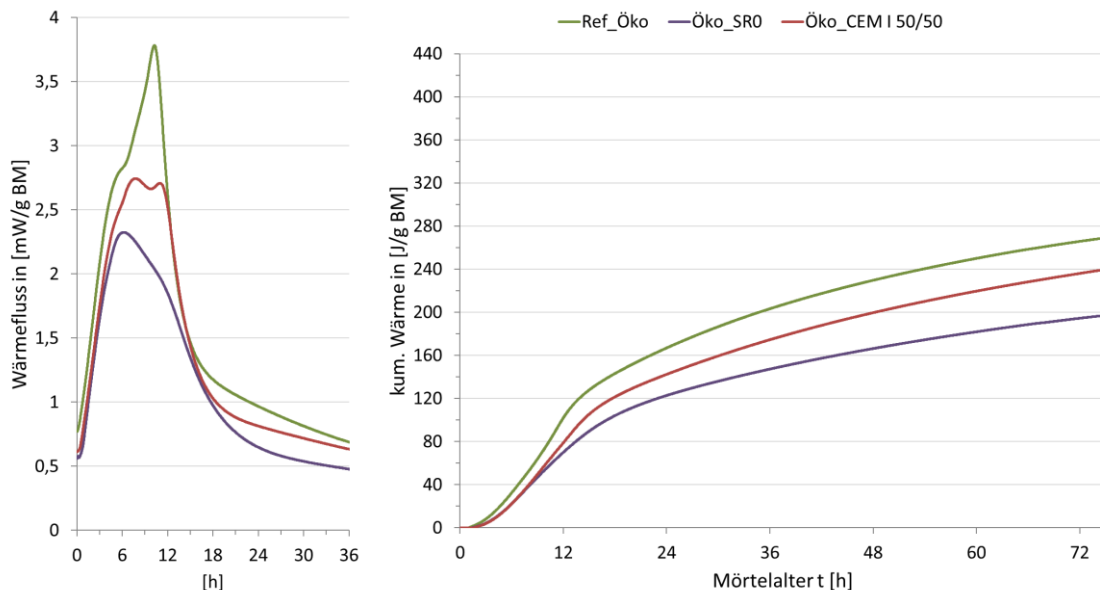


Abbildung 66: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von CEM und CEM_SR0 Zement bei gleicher Zusatzstoffzusammensetzung

Der Unterschied in der Festigkeit von 100% CEM I und 100% CEM I SR0 ist nach 24 Stunden mit ca. 50% größer und verkleinert sich dann bis zur 28 Tagesfestigkeit auf ca. 10%. Der niedrigere Wärmeeintrag beim C₃A-freien Mörtel „Öko_SR0“, wird also durch eine relativ niedrigere Frühfestigkeit erkauft.

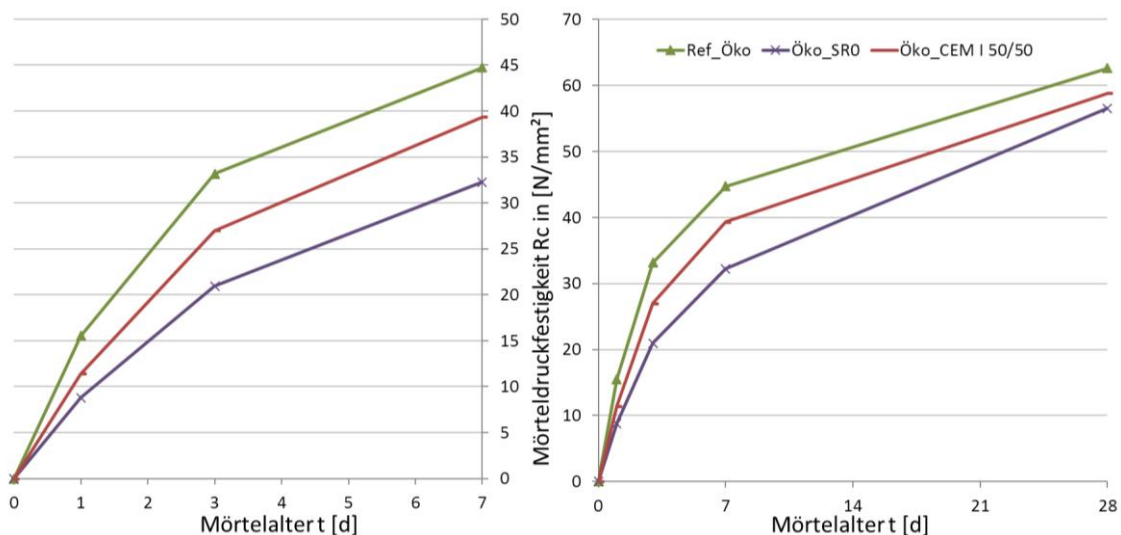


Abbildung 67: Festigkeitsentwicklung durch Variation des PZ, CEM I und CEM I SR0, in der Öko-Mischung (60 M-% von B₆); n=3

6.1.4 AHWZ vs. Öko-Zusatzstoffmischung

Als Ausgangspunkt gilt der aus dem Öko Beton abgeleitete Referenzmörtel „Ref_Öko“. Zielsetzung der Mörteluntersuchungen ist es ja mitunter, den Öko Referenz Mörtel so zu modifizieren, dass er den Spezifikationen aus der Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke – WW“ (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) möglichst gerecht wird.

Als Referenz für den Zielmörtel wurde der Referenzmörtel „Ref_WW“ verwendet. Da auch der Referenzmörtel mit 60 M-% C₃A-freiem Zement hergestellt wurde (Mindestgehalt gem. WW Spezifikation), war es naheliegend für den Versuch den Referenzmörtel „Ref_Öko“ so zu modifizieren, dass der CEM I Zement durch einen CEM I SR0 Zement ersetzt wurde. Der neue Mörtel wurde „Öko_SR0“ getauft. Das Ergebnis war dann doch verblüffend, weil mit einem Versuch praktisch ein „Klone“ der Wärmeflusskurve des „Ref_WW“ erreicht werden konnte. Die nachfolgende Grafik, zeigt die fast übereinander liegenden Wärmeflusskurven des WW Referenzmörtels und des modifizierten Öko-Referenzmörtels. Um das Potential der beiden Zusatzstoffmischungen AHWZ und „Öko-Zusatzstoffmischung“ zu evaluieren, wurde zusätzlich der Mörtel „Ref_WW“ mit CEM I Zement versehen („WW_CEM I“) und mit dem Referenzmörtel „Ref_Öko“, als Ausgangsbasis verglichen.

Bei der Darstellung der kumulierten Wärme, kann man einen kleinen Vorteil des modifizierten Öko-Mörtels „Öko_SR0“ gegenüber dem WW-Referenzmörtel „Ref_WW“ erkennen. Stärker ausgeprägt ist der Vorteil der „Öko-Zusatzstoffmischung“ in Kombination mit dem C₃A-hältigen PZ CEM I, wie folgende Abbildung zeigt:

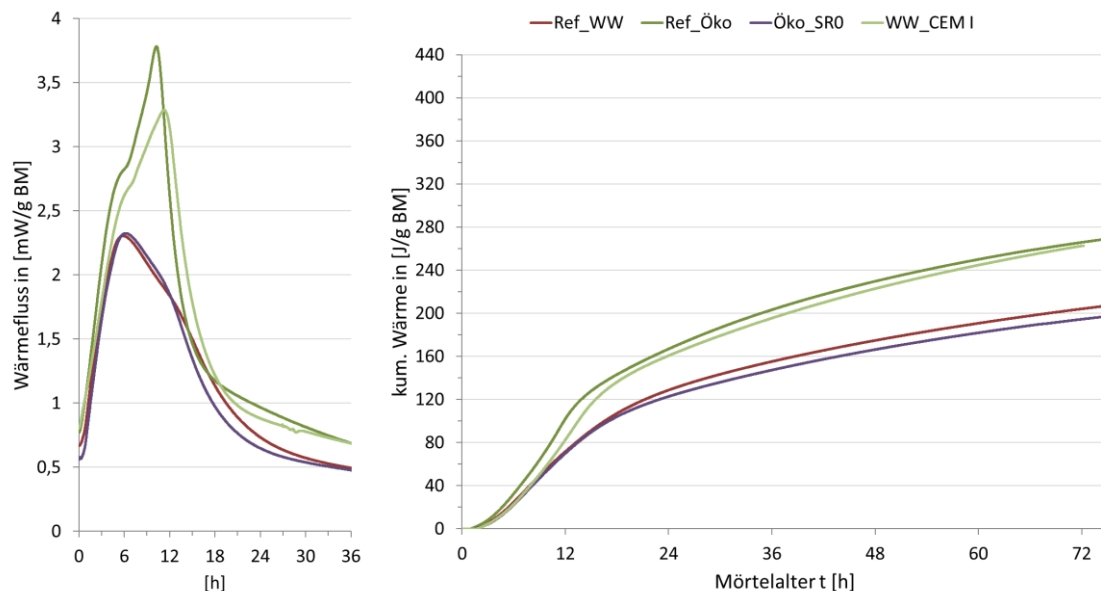


Abbildung 68: Wärmefluss und Wärmeentwicklung AHWZ vs. „Öko-Zusatzstoffmischung“

Hinsichtlich der Festigkeitsentwicklung zeigt sich, dass der „Öko_SR0“ Mörtel, gegenüber dem Referenzmörtel „Ref_WW“, mit fortschreitendem Alter des Mörtels, deutlich mehr Festigkeit aufweist, die mit +15% nach 28 Tagen ihr Maximum erreicht. Die Frühfestigkeit konnte jedoch nicht signifikant gesteigert werden.

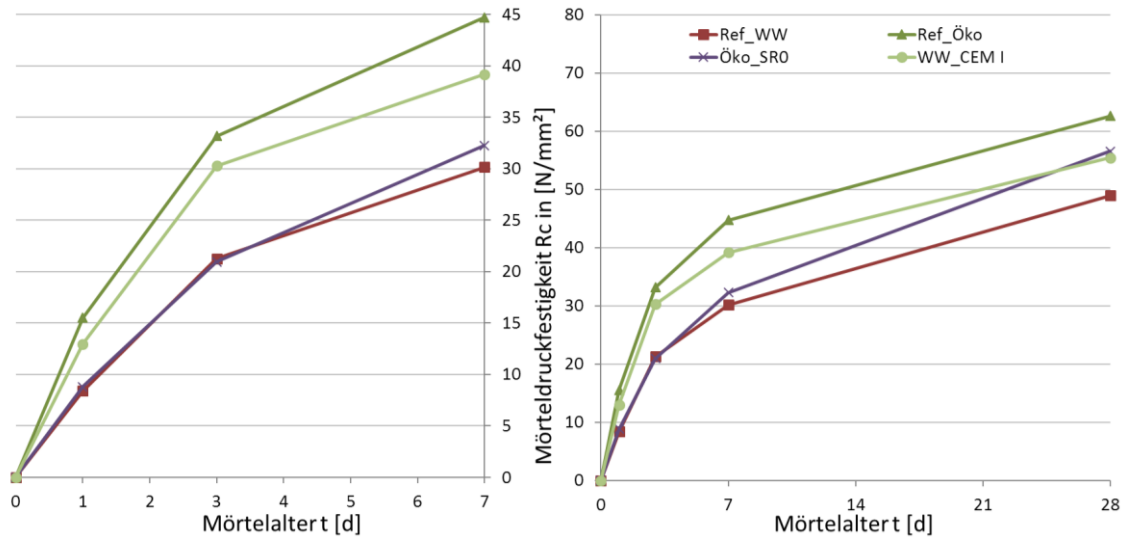


Abbildung 69: Festigkeitsentwicklung AHWZ vs. Öko-Zusatzstoffmischung; n=3

Da der „Öko_SR0“-Mörtel, die Spezifikationen der Richtlinie „Weiße Wanne“ hinsichtlich der Wärmeentwicklung voll erfüllt und zusätzlich höhere Endfestigkeiten erreichen konnte, wurde entschieden, diese Mörtel Rezeptur auf eine vergleichbare Beton-Rezeptur zu übertragen und als Abschluss der Beton Versuche noch einmal alle Untersuchungen, die Festigkeit und die Wärmeentwicklung betreffend, durchzuführen, um Vergleichswerte für die schon vorher untersuchten 4 Beton Rezepturen zu generieren.

6.1.5 C₃A-hältiger Mörtel mit geringer WE

Bei der Voruntersuchung am Beton ist der HOZ-Beton mit dem Hochofenzement CEM III/A 52,5 R als Bindemittel, der ja bereits rd. 40% Hüttensandmehl als Zumahlstoff enthält, durch seine hohen Festigkeiten besonders hervorstechend. Dies hat zur Idee geführt, diesen Zement als Ersatz für den CEM I Zement beim Referenzmörtel „Ref_Öko“ zu versuchen um die Spezifikationen der Richtlinie „WW“, zumindest was die Wärmeentwicklung und die Festigkeit betrifft, auch ohne „C₃A-freien“ Zement zu erreichen und zudem durch einen höheren Anteil an HÜS, den Mörtel auch „grüner“ zu machen. Da die Referenz „Ref_Öko“ bereits 32,5 M-% HÜS enthält, steigt damit der Anteil an HÜS beim neu generierten Mörtel „HOZ_Öko“ auf etwa 66%. Dies führt zu einer deutlichen Reduktion der kumulierten Wärmeentwicklung im Verhältnis zum „Ref_Öko“. Zwar bleibt eine schmale hohe „Leistungsnadel“ als zweites Wärmeflussmaximum erhalten, jedoch ist der Gesamtenergieeintrag, wie man beim kumulierten Wärmeeintrag sehen kann, auf Grund der geringen Fläche unter der Nadel sogar geringer als bei der Referenz „Ref_WW“.

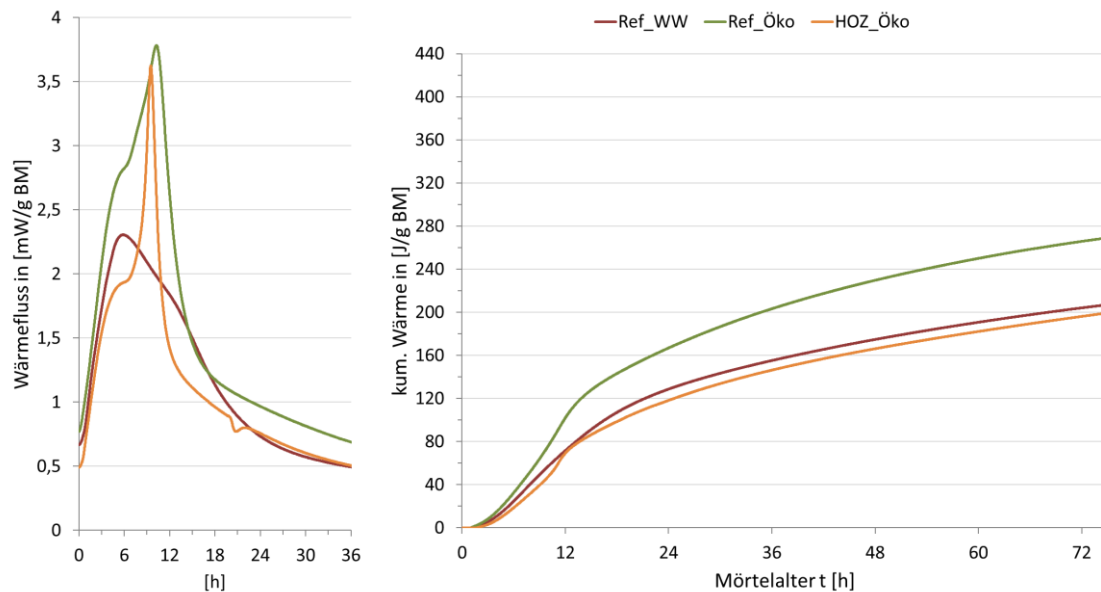


Abbildung 70: Wärmefluss und Wärmeentwicklung „Green WW Mörtel“

Trotz niedrigerer Wärmeentwicklung im Verhältnis zum Referenzmörtel „Ref_WW“, zeigt sich bei der Festigkeitsentwicklung des „HOZ_Öko“, dass dieser mit Fortschreiten des Mörtelalters mit bis zu 25% höherer Festigkeit, eine wesentlich bessere Performance hat, als der Referenzmörtel „Ref_WW“. Auch bei der 1- und 3-Tage-Festigkeit liegt der „HOZ_Öko“ etwas höher bei gleichzeitig ähnlich geringer Wärmeentwicklung.

Im Verhältnis zum Referenz-Mörtel „Ref_Öko“, ist erkennbar, dass zwar die 1 und 3 Tagesfestigkeit auf Grund des höheren latent hydraulischen Anteils (HÜS) deutlich niedriger ist, dass jedoch der Abstand bei der 7 und 28 Tages Festigkeit nur mehr marginal ist. Bei der 1 Tagesfestigkeit könnte man, wenn dies gewünscht ist, möglicherweise durch z.B. Einsatz von Seeding Zusatzmitteln, noch eine Performance Steigerung erreichen.

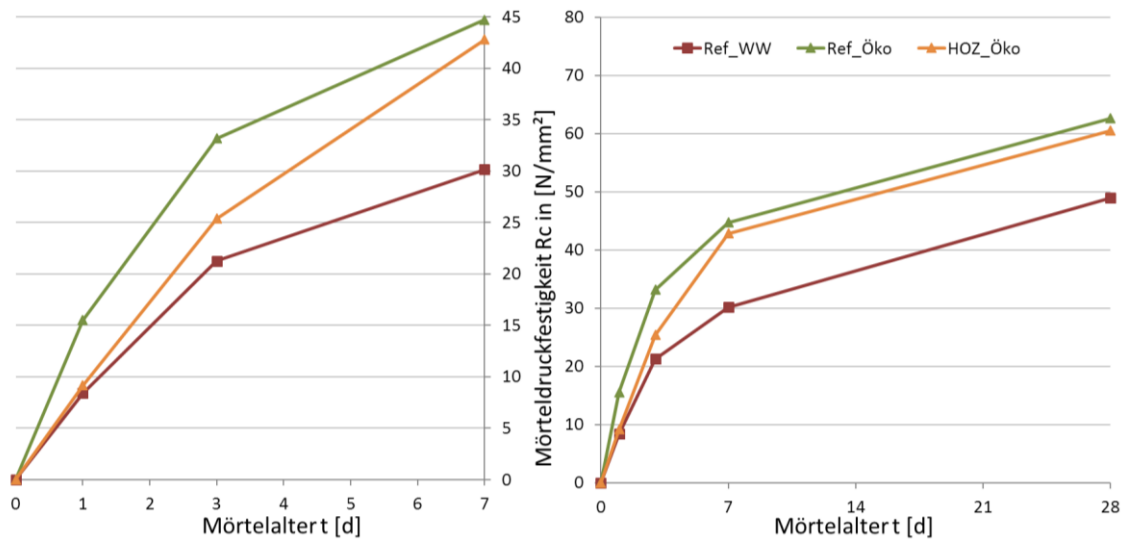


Abbildung 71: Gesteigerte Festigkeitsentwicklung beim „HOZ-Öko“-Mörtel; n=3

Wenn man bedenkt, dass bei großen Massenbetonprojekten, wie z.B. dem Koralmtunnel, wo alleine für die 160.000 Tübbinge ca. 400.000 m³ Beton benötigt werden, dann sieht man, wie hoch da noch das Potential für CO₂ Einsparung durch Verwendung von alternativen „grünen“ Betonen sein könnte. Da die Tübbinge ja in Fertigbetonwerken erzeugt werden, hätte man auch noch die erweiterten Möglichkeiten der Vorwärmung oder auch der Karbonatisierung mit CO₂, um die Frühfestigkeit zu steigern. Wie Beispiele Tunnelbauprojekte aus der Schweiz (2,7 km Bözbergtunnel) zeigen, wurden Tübbinge mit Beton auf Basis von CEM III/A Zementen erfolgreich eingesetzt (Woodtli, 2017).

6.1.6 Variation von Mikrofüllern

Mit dem Zusatz von Mikrofüllern kann man die Eigenschaften von Beton und Mörtel noch deutlich verbessern. Bei den Mikrofüllern kann zwischen inerten und hydraulisch wirksamen Füllern unterschieden werden. Für die Untersuchungen wurden die inerten Mikrofüller Kalksteinmehl 7,5%, KSM Suspension 7,5% und das Quarzmehl 7,5% als Eco-Füller und der puzzolanisch wirksame Füller Metakaolin 4,5% + 3% Kalksteinmehl variiert.

Wie aus der nachfolgenden Grafik ersichtlich, haben alle Füller eine ähnliche Wirkung, jedoch mit unterschiedlicher Wärme-Intensität, auf den Mörtel. Ausgehend vom Quarzsand der nur als Mesofüller fungiert und der deshalb als Basiskurve für die Darstellung der Intensität der einzelnen Mikrofüller dient, liegen alle Kurven je nach Intensität mit Abstand übereinander. Zusätzlich gibt es auch einen leichten Effekt des Wärmeflussmaximums in Richtung „Früh“ in der Hydrationswärmeentwicklung mit ansteigender Intensität. Um die Ähnlichkeit der Wirkung der Mikrofüller zum CSH-Seeding aufzuzeigen, ist auch der mit Seeding-Mittel (EB) verbesserte „Öko_SR0_CSH-Seed“-Mörtel dargestellt, der auf dem „Öko_SR0“ Mörtel der bereits 7,5% Kalksteinmehl als Mikrofüller enthält, aufsetzt (4% EB additiv zugegeben). Hier sieht man auch, dass durch eine Kombination aus Mikrofüller und Seeding-Mittel, die Hydratation zusätzlich gesteigert werden kann. Eine fast gleiche Wärmeentwicklung hat der „Öko_SR0_KSM Susp.“-Mörtel, mit 7,5% feinstem KSM als

Mikrofüller. Last but not least folgt der „Öko_SR0_MK“- Mörtel mit 4,5% Metakaolin und 3% Kalksteinmehl. Bei der kumulierten Wärmeentwicklung liegen, wenn man den Seeding- und den Quarz mörtel nicht berücksichtigt alle drei Mikrofüller Mörtel, nach 72 Stunden gleich auf. Sie unterscheiden sich also nur durch die unterschiedliche Verteilung der Wärmeentwicklung über die Zeit.

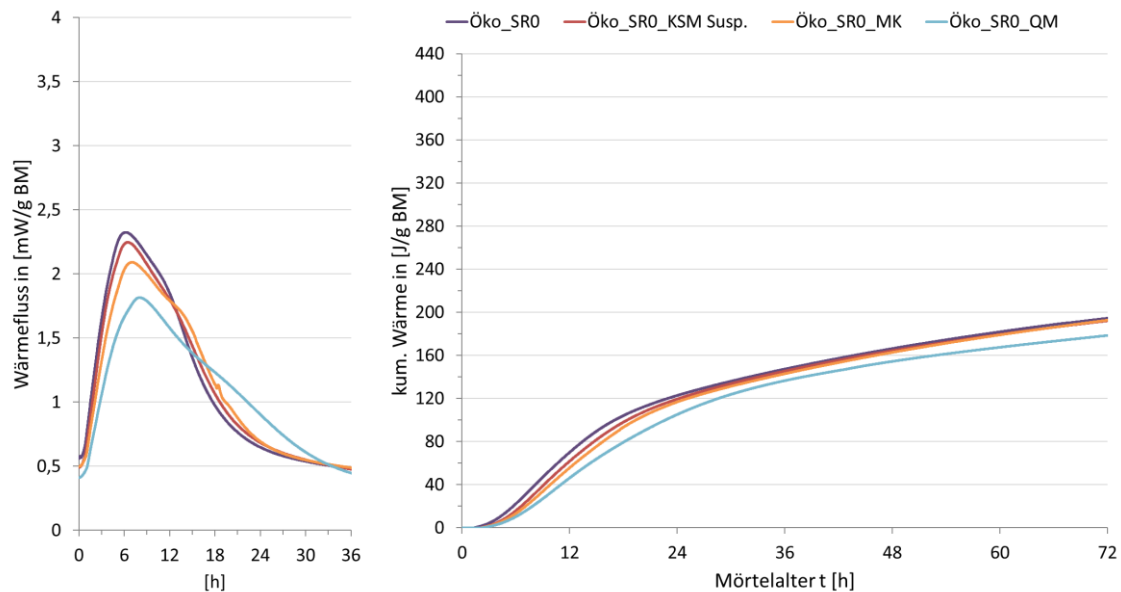


Abbildung 72: Wärmefluss- und Wärmeentwicklung unter Variation des 7,5 M-% Mikrofülleranteils

Die Druckproben, die nach 1, 3, 7 und 28 Tagen gemacht wurden, ergeben folgendes Bild. Nachdem am 1. und am 3. Tag die ermittelten Werte mit 8 bzw. 20 N/mm² für alle Mörtel noch nahezu gleich sind, streuen die Werte am 7. und am 28. Tag schon stärker. Auffallend ist, dass der Mörtel „Öko_C3A-frei_Meta“ mit dem Mikrofüller Metakaolin einen, gegenüber den anderen Mörtel, stärkeren Anstieg der Druckfestigkeit hat, der wohl auf die puzzolanischen Eigenschaften des Füllers zurückzuführen ist. So ergibt sich nach 28 Tagen folgende Reihung der Festigkeit nach verwendetem Füller. 1. Metakaolin, 2. Kalksteinmehl, 3. KSM Suspension (extra feines KSM), 4. Quarzmehl. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Festigkeitsentwicklung:

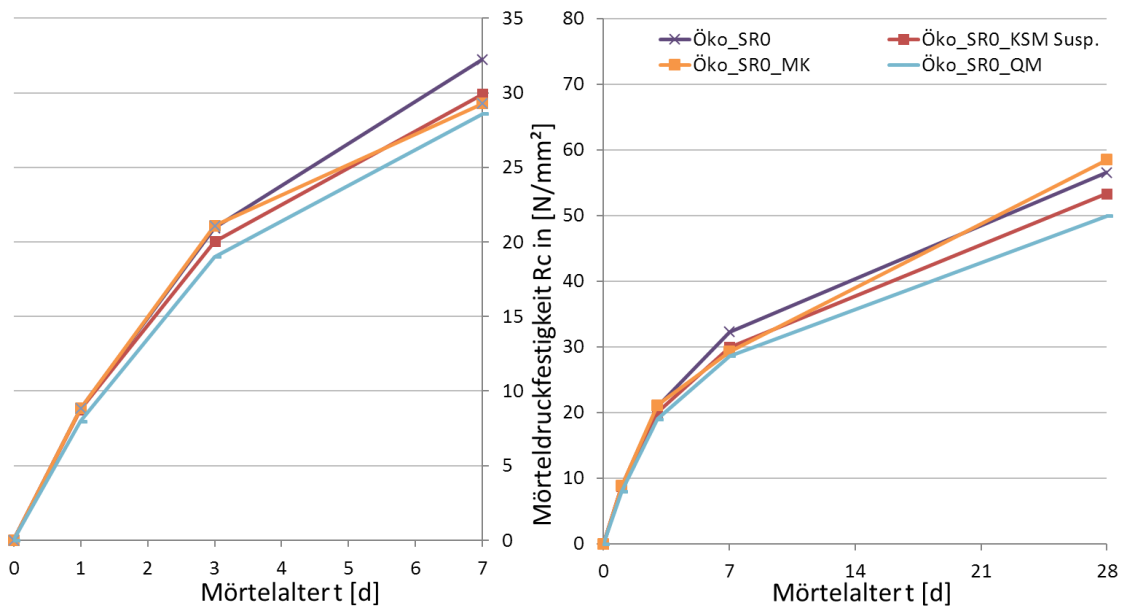


Abbildung 73: Festigkeitsentwicklung unter Variation des 7,5 M-% Mikrofülleranteils; $n=3$

6.1.7 Variation des Wasserbindemittelwerts

Da die Anrechnung von Zusatzstoffen unterschiedlich gehandhabt wird (z.B. k-Wert-Ansatz) und daher z.B. inerte (nicht hydraulische) Zusatzstoffe nicht unbedingt dem Bindemittel zugerechnet werden dürfen, haben zur Idee geführt, den Wasserbindemittelwert insoweit zu variieren, als dass man nur die hydraulischen Bindemittel bei der Ermittlung berücksichtigt. Da 7,5 M-% der Zusatzstoffe im BM des „Ref_Öko“, der ja die Ausgangsbasis für Modifizierungen ist, nicht hydraulisch sind, ergibt dies eine Absenkung auf $W/B_G = 0,46$ und korrespondierend $W/B_H = 0,50$, jeweils für verschiedene „Öko“- und „Öko-SRO“-Mischungen. Das Leimvolumen wurde dabei konstant gehalten, um so zu prüfen, inwieweit sich die W/B -Wert Absenkung auch auf die Verarbeitbarkeit der Mörtelmischungen auswirkt. Die Verarbeitbarkeit verschlechterte sich nur geringfügig bis gar nicht, wie die Ergebnisse aus der Konsistenzprüfung (Tabelle 26) zeigen. So konnte trotz reduziertem W/B_G -Wert, die Verarbeitbarkeit eingehalten und gleichzeitig Wasser eingespart und ein „Packungsdichte-Effekt“ erzeugt werden.

Bei der durchgeführten W/B Variation von 0,5 auf 0,46 für die „Öko“-Mörtelmischungen, „Ref_Öko“ mit 7,5% Kalksteinmehl (bei konstanter Verarbeitbarkeit) und „Öko_QM“ mit 7,5% Quarzmehl, ergibt dies folgendes Bild. Durch die Reduktion des W/B Wertes erhöht sich die Hydratationswärme signifikant, besonders die max. Wärmeflüsse, werden deutlich durch das als Mikrofüller verwendete KSM angehoben. Zudem gibt es auch eine Drift-Richtung „Früh“. Die kumulierte Wärme ist nach 72 Stunden jedoch nur marginal erhöht.

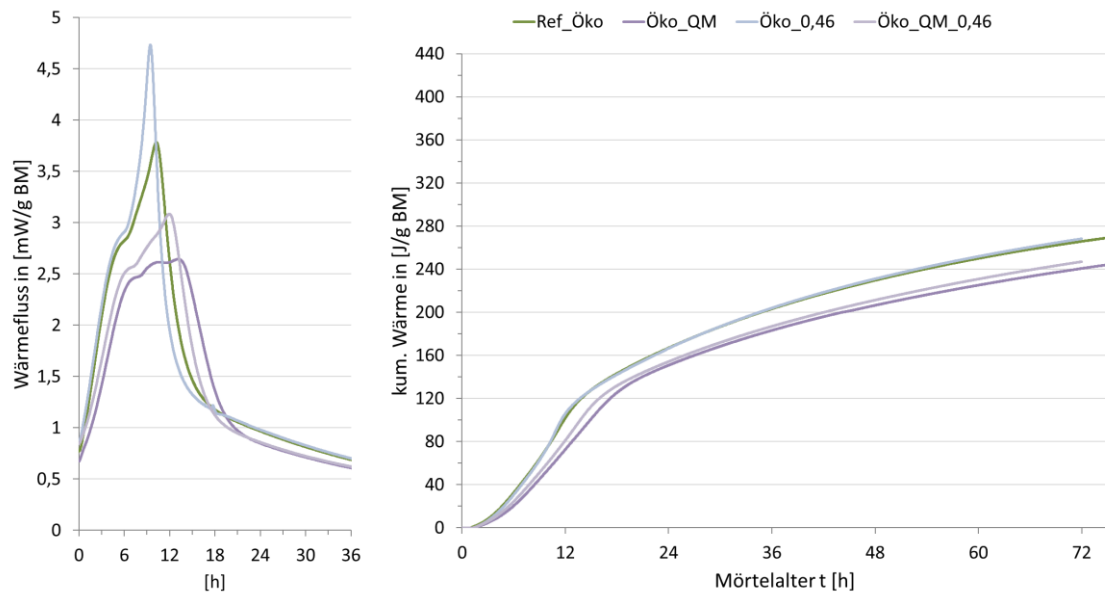


Abbildung 74: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko und Öko_QM

Bei den 1, 3, 7 und 28 Tages-Druckprüfungen der Öko Mörtel, sind die Festigkeitswerte, ähnlich wie die Wärmeentwicklung, nur marginal im einstelligen Prozentbereich erhöht.

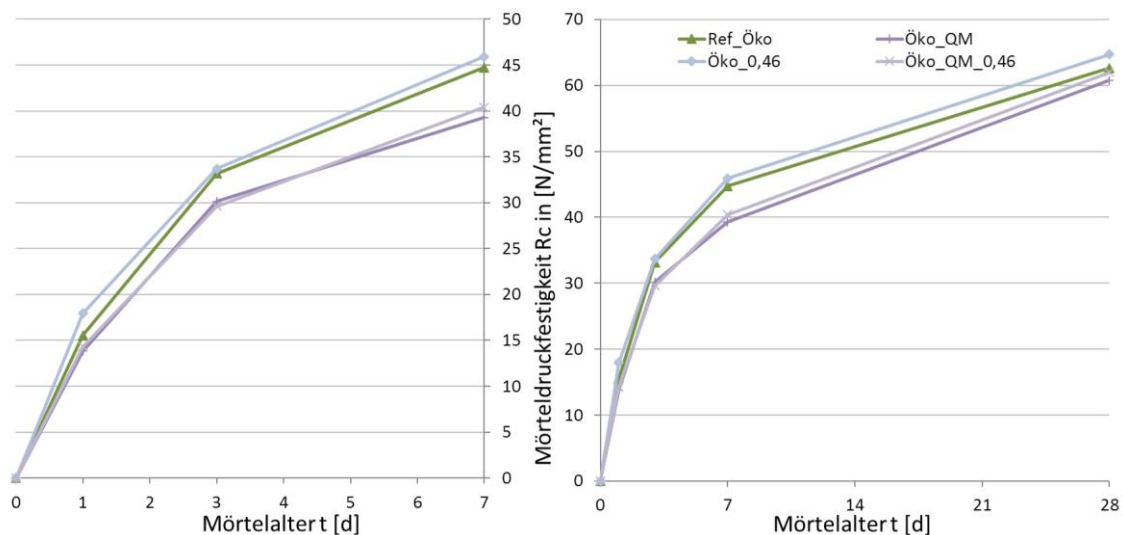


Abbildung 75: Festigkeitsentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko und Öko_QM; $n=3$

Öko Mörtel mit CEM I SR0

Anders als bei den Mörteln mit 60 M-% CEM I im Bindemittel, stellt sich die Situation bei den C_3A -freien Mörteln „Öko_SR0“ mit 7,5% Kalksteinmehl als Mikrofüller und „Öko_SR0_QM“ mit 7,5% Quarzmehl als Mesofüller, dar. Bei den Wärmeflusskurven gibt

es durch die Absenkung der W/B-Werte, am Beginn nur eine geringe Erhöhung der Hydrationswärme die mit zunehmendem Mörtelalter dann sogar niedriger als im Referenzmörtel mit $W/B_G = 0,5$ ist. Diese Entwicklung spiegelt sich auch in den kumulierten Wärmekurven wider. So ist die kumulierte Wärme nach 72 Stunden bei den Mörteln mit abgesenktem W/B-Wert niedriger.

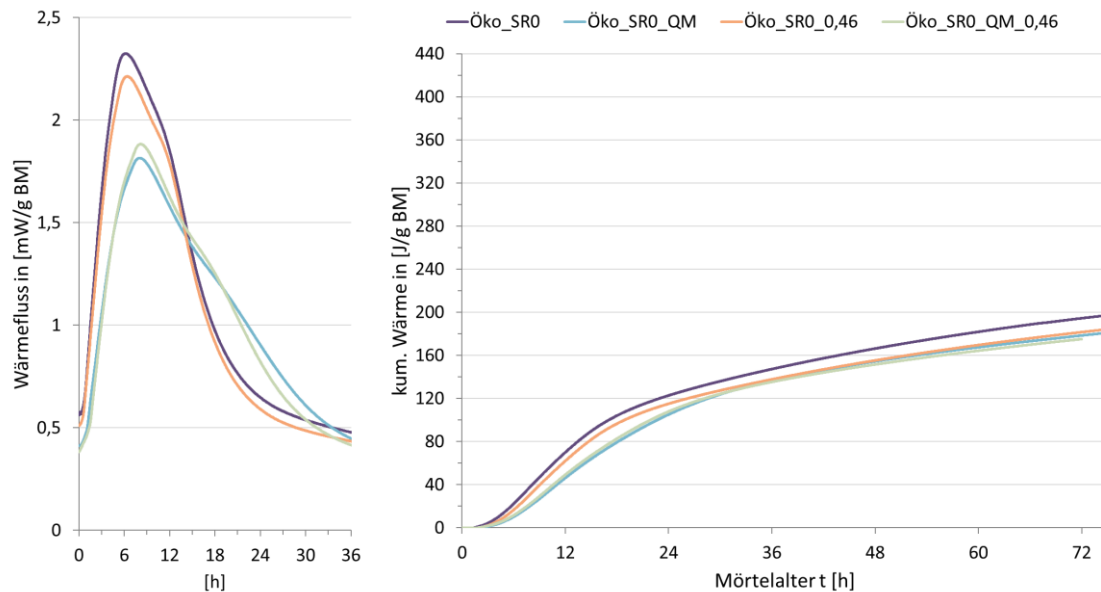


Abbildung 76: Wärmefluss und Wärmeentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko_SR0 und Öko_SR0_QM

Bei der Auswertung der Festigkeitsentwicklung, kann eine mit dem Betonalter, im Gegensatz zur Wärmeentwicklung, stetig steigende Festigkeit der Mörtel, mit auf $W/B_G=0,46$ abgesenkten Mörtel festgestellt werden, wobei der Zuwachs bei beiden untersuchten Mörtelmischungen gleich ist. Dies führt dazu, dass der „Öko_SR0_0,46“ mit 7,5% Kalksteinmehl nach 28 Tagen, mit über 60 N/mm^2 schon fast die Festigkeit des „Ref_Öko“ Mörtel mit CEM I Zement erreicht. Was hier erstaunt, ist, dass die Wärme- und die Festigkeitsentwicklung, wider erwarten, entgegengesetzt verläuft. Dem sollte auf jeden Fall nachgegangen werden.

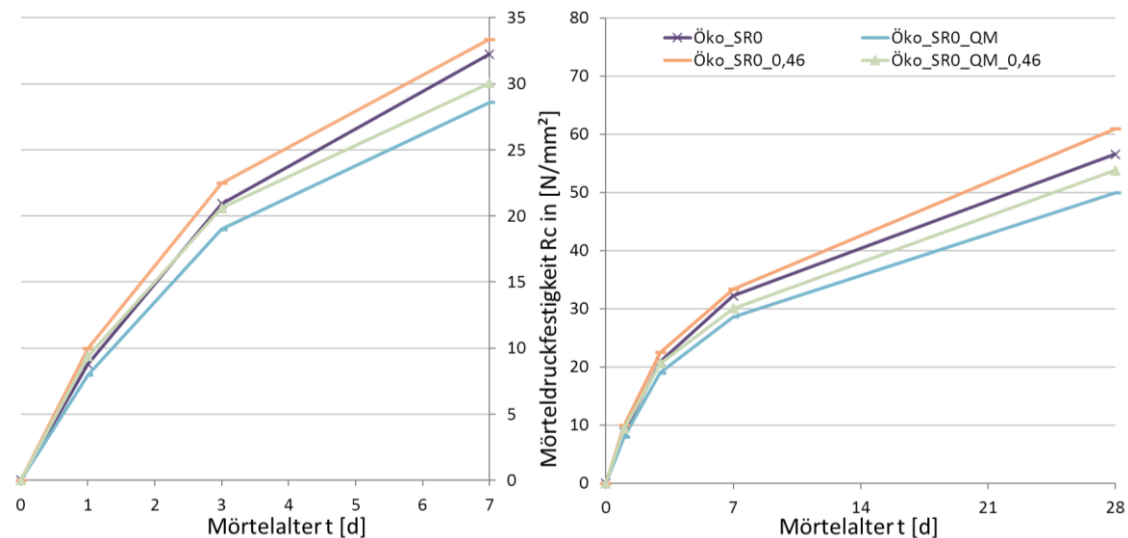


Abbildung 77: Festigkeitsentwicklung unter Variation von W/B_G (0,50 auf 0,46) am Beispiel der Mörtelmischungen Öko_SR0 und Öko_SR0_QM; $n=3$

6.1.8 CSH Seeding

Um die Möglichkeiten auszuloten mit einem Seeding-Mittel die Frühfestigkeit zu verbessern, wurde den Mörtelmischungen „Ref_CEM I“ und „Öko_SR0“ 4 Prozent Erhärtungsbeschleuniger (EB) zugesetzt.

Wie die folgende Grafik zeigt, konnte bei beiden Mörtelmischungen die Hydratationsablauf deutlich beschleunigt werden. So konnte die Intensität bei reinem CEM I als Bindemittel („Ref_CEM I“) um über 30% gesteigert werden und die Hydratation beginnt auch deutlich früher. Beim „Öko_SR0“ Mörtel ist die Wirkung, mit 26% Intensitätssteigerung und das Maximum 11% früher, geringer. Ein Grund für die geringere Wirkung des Seeding-Mittels beim „Öko_SR0“ Mörtel könnte sein, dass dieser bereits mit 7,5% Kalksteinmehl als Mikrofüller optimiert ist, was eine ähnliche Wirkung, wie das Seeding-Mittel entfaltet.

Da die Verbesserung der Hydratation teilweise durch die Verlagerung nach „Früh“ erreicht wird, ist die Erhöhung der kumulierten Wärmeentwicklung in den ersten 72 Stunden geringer. Wie in der nächsten Grafik deutlich ersichtlich, ist die Wärmeentwicklung mit 4% beim „Ref_CEM I“ und 10% beim „Öko_SR0“ geringer als bei den Varianten mit Seeding-Mittel.

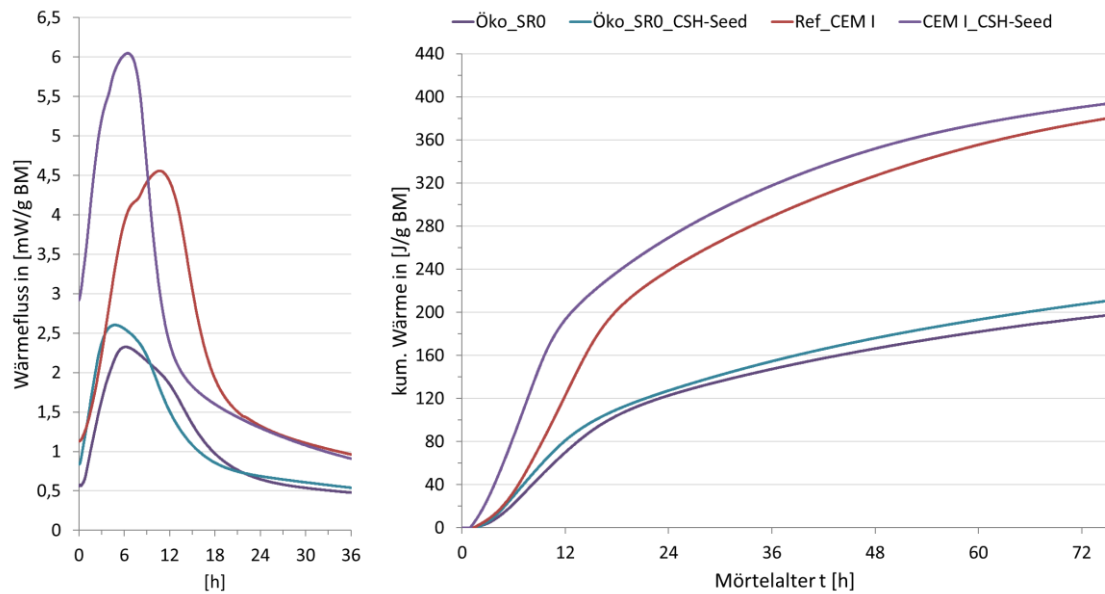


Abbildung 78: Wärmefluss und Wärmeentwicklung bei Verwendung von 4 %-B_G Seeding-Mittel (EB)

Eine Überraschung gab es dann bei der Auswertung der Festigkeitsentwicklung. Anstatt der, aufgrund der beschleunigten Hydratation, erwarteten höheren Festigkeit bei den mit dem Seeding-Mittel behandelten Mörtel, blieben diese deutlich unter der Festigkeit der ursprünglichen Mörtel zurück. Zwar wurde das Seeding-Mittel additiv dazugegeben, was den W/B_G-Wert von 0,5 auf 0,53 anheb, was natürlich einen Teil der Abweichung erklärt, jedoch wurde eigentlich schon eine deutliche Erhöhung der Festigkeit innerhalb der 72 Stunden erwartet.

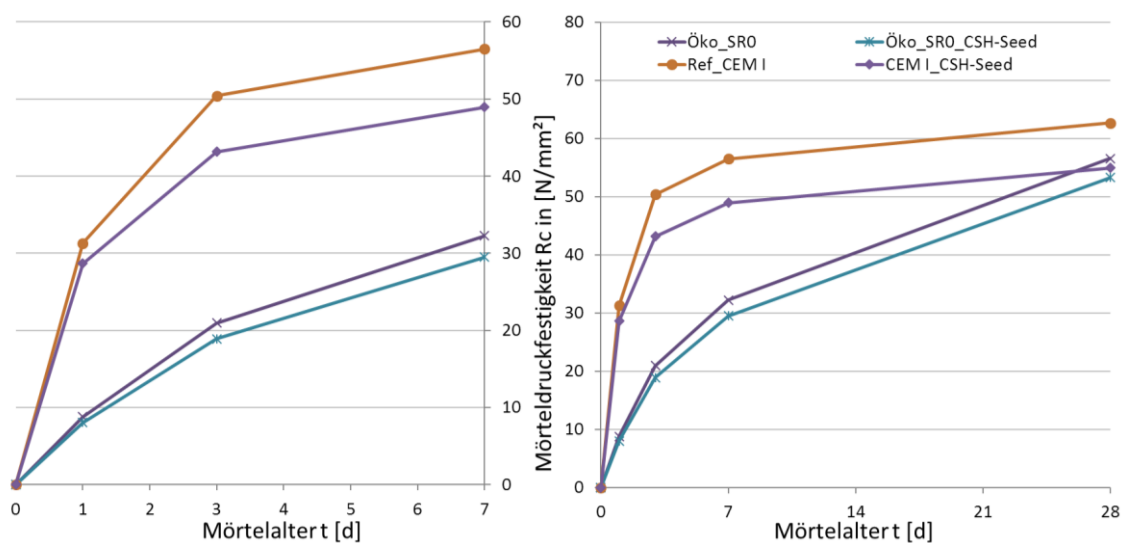


Abbildung 79: Festigkeitsentwicklung bei Verwendung von 4 M %-B_G Seeding-Mittel (EB); n=3

Wie aus der Wärmentwicklung der mit Seeding-Mittel angereicherten Mörtel zu entnehmen ist, spielt sich die Veränderung der Hydratation in den ersten 12 Stunden ab. Da die erste Druckfestigkeitsprüfung auf Grund des allgemeinen Untersuchungsdesigns jedoch erst nach 24 Stunden durchgeführt wurde, kann man aktuell die Wärme- und die Festigkeitsentwicklungen in den ersten Stunden nicht gegenüberstellen und prüfen.

6.1.9 CO₂ Seeding

Bestärkt durch die Literatur Recherche, wurde auch ein Versuchsmörtel mit CO₂ Zugabe hergestellt und untersucht. Dabei wurde, auch auf Grund der fehlenden Möglichkeiten, keine CO₂ Begasung des Frischmörtels durchgeführt, sondern das CO₂ über das Sodawasser als Anmachwasser dem Mörtel zugefügt. Wie die nachfolgenden Bilder zeigen, konnte zwar ein kleiner Effekt erzielt werden, aber leider in die falsche Richtung. So wurde die Hydratation des CEM I Referenzmörtels nicht gesteigert, sondern abgeschwächt. Dasselbe ist bei der Festigkeitsentwicklung festzustellen, die zum Referenzmörtel auch leicht gesunken ist. Möglicherweise reicht diese Methode, der Zugabe von CO₂ durch das Wasser, nicht aus, um die für die frühe Karbonatisierung des frischen Mörtels notwendigen CO₂ Konzentrationen zu erreichen. Hier müssten systematische weitere Versuche durchgeführt werden

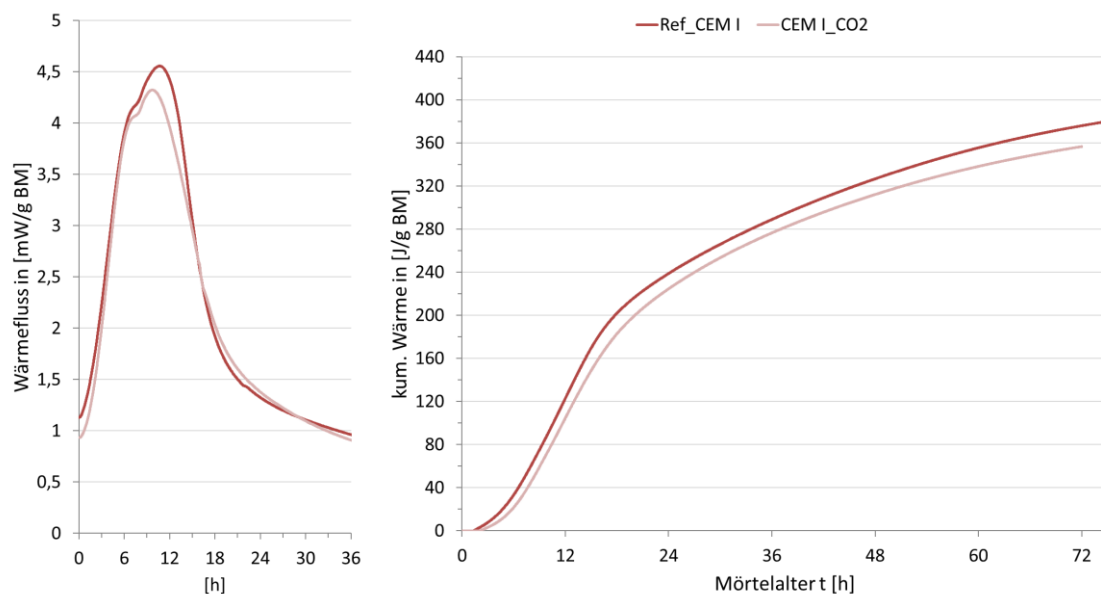


Abbildung 80: Wärmefluss und Wärmeentwicklung bei Verwendung von Sodawasser als Anmachwasser

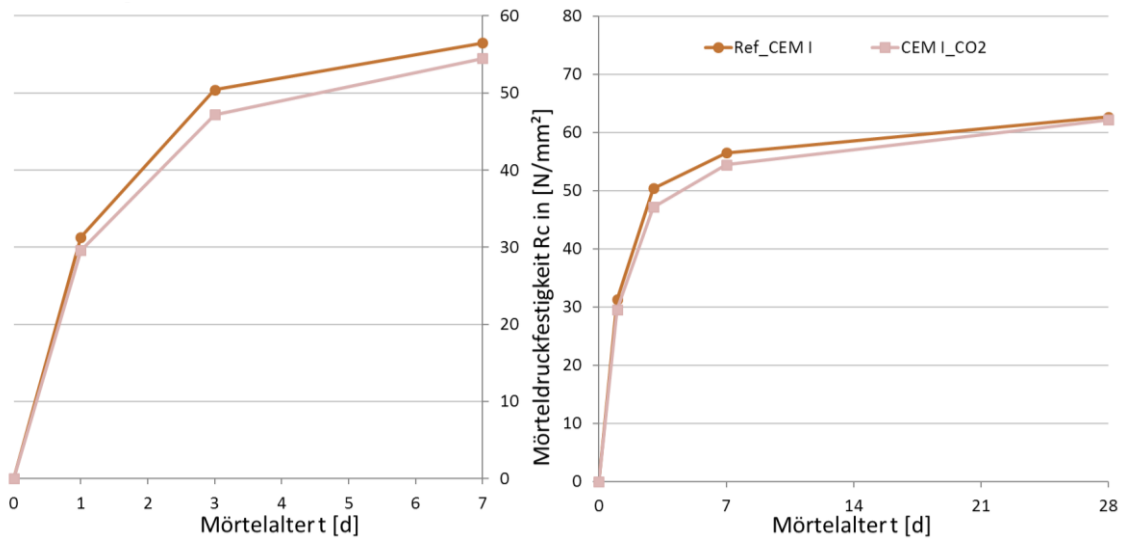


Abbildung 81: Festigkeitsentwicklung bei Verwendung von Sodawasser als Anmachwasser; n=3

6.1.10 Zusammenhang Wärme und Festigkeit

Die folgende Tabelle zeigt die gemessene Wärme $H_z(t)$, die Mörteldruckfestigkeit $R_c(t)$ und den Quotienten aus der Wärme $H_z(t)$ und der mittleren Mörteldruckfestigkeit $R_c(t)$, die nach 1 und 3 Tagen von den 22 untersuchten Mörtelmischungen erreicht werden konnten: Zusätzlich ist auch der s-Beiwert für die nichtlineare Funktion (CEB-FIP, 2010) der Druckfestigkeitsentwicklung je Mörtel dargestellt.

Tabelle 28: Übersicht über die Wärme- und Festigkeitsverhältnisse der untersuchten Mörtelmischungen (I)

Mörtelalter	Bezeichnung		REF_HOZ	Ref_WW	Ref_Öko	Öko_SRO	Öko_SRO_CSH-Seed	Ref_CEM I	Ref_CEM I_SRO	Öko_CEM I 50/50	Öko_HÜS 100	CEM I_CSH-Seed	Öko_SRO_KSM Susp.
1 d	Hz(1)	[J/g]	167	129	167	123	127	239	161	142	155	269	119
	Rc(1)	[N/mm ²]	19,2	8,4	15,5	8,8	8,0	31,3	17,6	11,4	13,6	28,6	8,8
	Hz(1)/Rc(1)		8,7	15,3	10,8	13,9	15,9	7,6	9,1	12,5	11,4	9,4	13,6
3 d	Hz(3)	[J/g]	271	204	266	194	207	376	263	236	255	390	192
	Rc(3)	[N/mm ²]	42,2	21,3	33,2	20,9	18,9	50,4	35,1	27,0	30,3	43,2	20,0
	Hz(3)/Rc(3)		6,4	9,6	8,0	9,3	11,0	7,5	7,5	8,7	8,4	9,0	9,6
	s-Beiwert	[-]	0,30	0,43	0,32	0,49	0,52	0,14	0,26	0,39	0,35	0,14	0,49

Tabelle 29: Übersicht über die Wärme- und Festigkeitsverhältnisse der untersuchten Mörtelmischungen (II)

Mörtelalter	Bezeichnung		HOZ_Öko	Öko_SRO_MK	Ref_B3	WW_CEM I	Öko_QM	Öko_SRO_QM	Öko_SRO_0,46	Öko_0,46	CEM I_CO2	Öko_SRO_QM_0,46	Öko_QM_0,46
1 d	Hz(1)	[J/g]	118	117	152	161	151	105	115	167	225	108	154
	Rc(1)	[N/mm ²]	9,2	8,8	16,1	13,0	13,8	8,0	10,0	17,9	29,6	9,4	14,3
	Hz(1)/Rc(1)		12,9	13,2	9,5	12,4	10,9	13,2	11,6	9,3	7,6	11,5	10,8
3 d	Hz(3)	[J/g]	196	193	255	262	241	178	182	268	357	175	247
	Rc(3)	[N/mm ²]	25,4	21,1	34,0	30,3	30,1	19,0	22,5	33,7	47,2	20,6	29,6
	Hz(3)/Rc(3)		7,7	9,1	7,5	8,7	8,0	9,4	8,1	8,0	7,6	8,5	8,3
	s-Beiwert	[-]	0,41	0,55	0,25	0,32	0,36	0,48	0,50	0,31	0,16	0,48	0,37

Die nachfolgenden beiden Grafiken stellen die Quotienten aus Wärme und Druckfestigkeit grafisch dar. Deutlich zu erkennen ist, dass nach einem Tag der Quotient mit 12 [J/g / N/mm²] im Mittelwert höher ist als nach drei Tagen mit 9 [J/g / N/mm²]. Dies bedeutet, dass am 1. Tag für den spezifischen Festigkeitszuwachs mehr Wärme notwendig war als am 3. Tag. Die Bandbreite der 22 Mörtel ist dabei am 1. Tag höher als am 3. Tag.

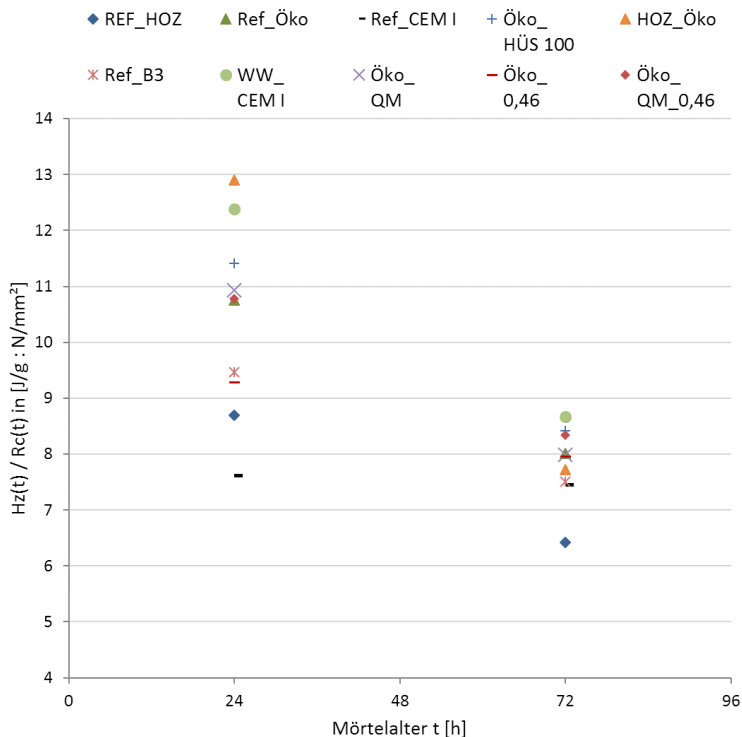


Abbildung 82: Quotienten aus der kum. Wärme Hz(t) [J/g] und der Druckfestigkeit Rc(t) [N/mm²] nach 1 und 3 Tagen für die Mörtelmischungen mit CEM I Zement

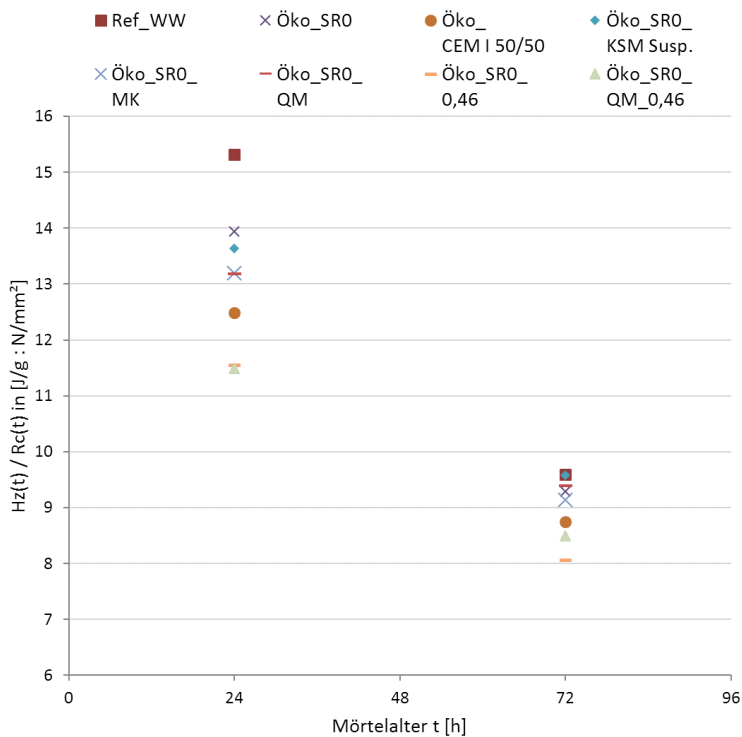


Abbildung 83: Quotienten aus der kum. Wärme Hz(t) [J/g] und der Druckfestigkeit Rc(t) [N/mm²] nach 1 und 3 Tagen für die Mörtelmischungen mit CEM I SR0 Zement

Die nächsten Grafiken stellen die Beziehung der Hydratationswärme zur Druckfestigkeit, die jeweils am 1. und am 3. Tag erreicht werden konnten dar, wobei immer alle 22 Mörtel und eine lineare Regression dargestellt sind. Dabei ist deutlich der lineare Zusammenhang zwischen Wärme- und Festigkeitsentwicklung erkennbar. Am 1. Tag ist nur der CEM I_CSH-Seed deutlich von der Regressionsgeraden entfernt und zeigt dabei nicht die gewünschten Ergebnisse. Die Frühfestigkeiten reichen am ersten Tag von 8,0 N/mm² für den „Öko_SR0_CSH-Seed“ bis 31,3 N/mm² für den „REF_CEM I“ Mörtel.

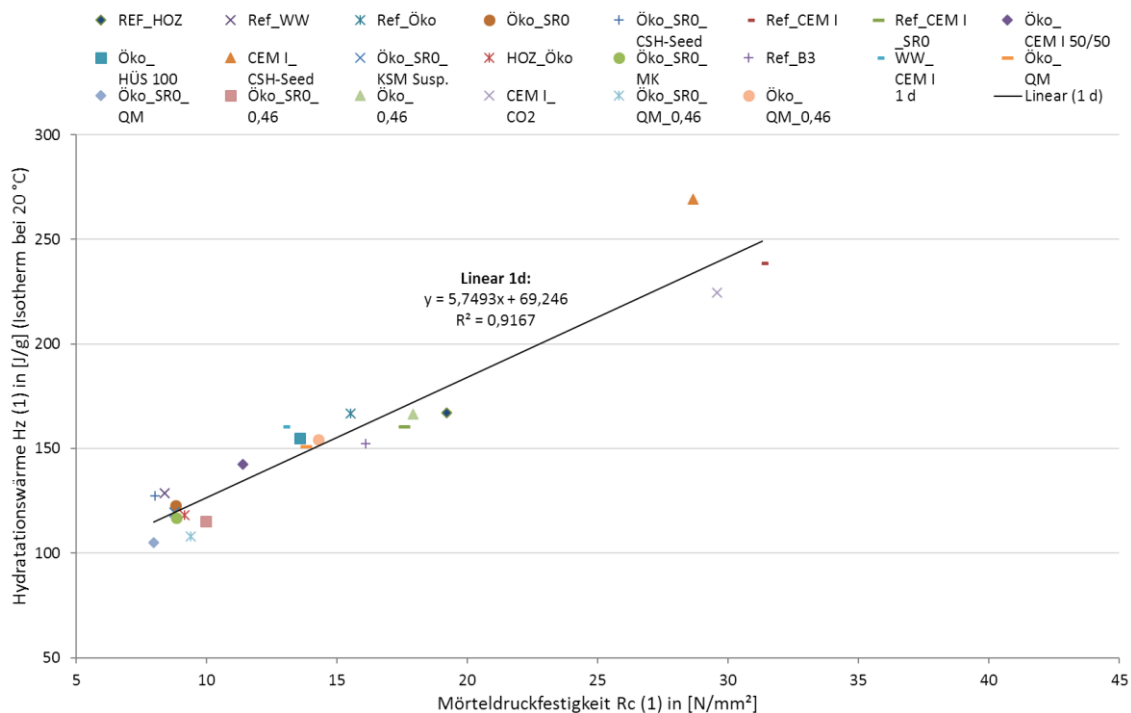


Abbildung 84: Beziehung zwischen Hydratationswärme Hz(1) und Druckfestigkeit Rc(1)

In der nächsten Grafik, wo die Festigkeiten und die Hydratationswärmern der untersuchten Mörtelmischungen am dritten Tag darstellt, liegen alle Mörtel, bis auf den „CEM I_CSH-Seed“, der deutlich oberhalb liegt und den „REF_HOZ“, der deutlich unterhalb (im Zielfeld) liegt, nahe der Regressionsgeraden. Auch sticht der Mörtel „Öko_SR0_0,46“, bei dem gezielt der Wasserbindemittelwert abgesenkt wurde, und der „HOZ_Öko“, bei dem der CEM I Zement gegen den speziellen (sehr fein gemahlten) CEM III/A Zement ausgetauscht wurde, überaus positiv hervor. Wie die folgende Grafik verdeutlicht, liegen die genannten Punkte deutlich im Zielfeld, unterhalb der Regressionsgeraden.

Die Festigkeiten reichen am dritten Tag von 18,9 N/mm² für den „ÖKO_SR0-CSH-Seed“ bis 50,4 N/mm² für den „REF_CEM I“.

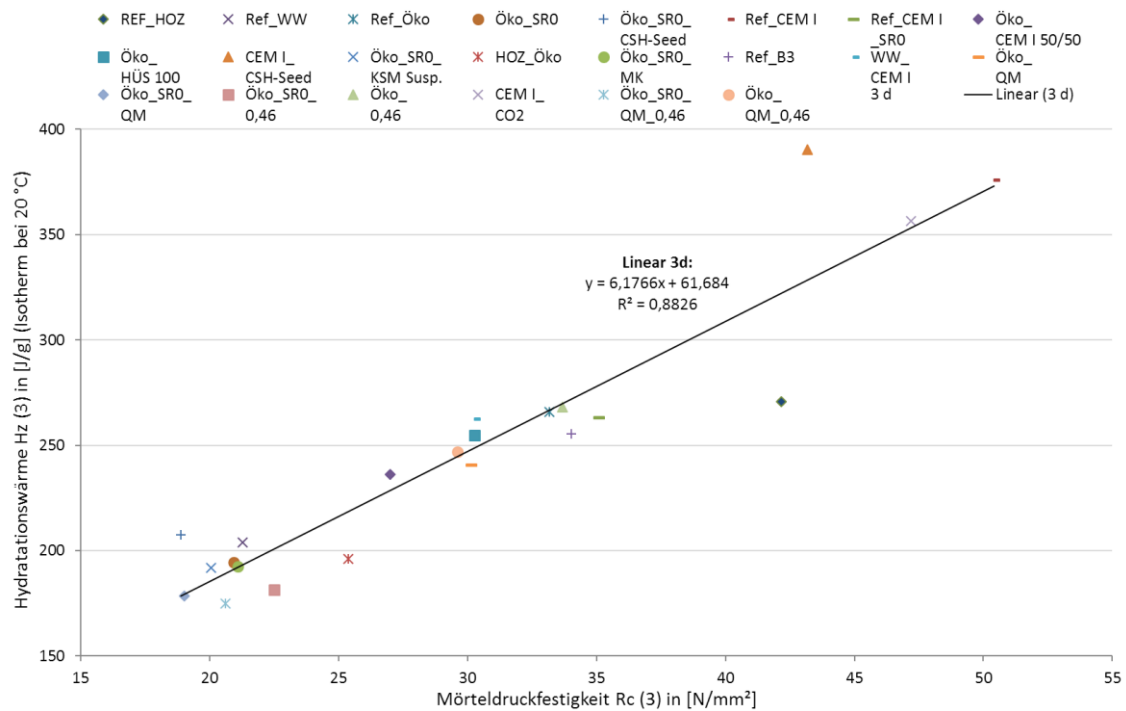


Abbildung 85: Beziehung zwischen Hydratationswärme Hz(3) und Druckfestigkeit Rc(3)

Die nächste Grafik stellt die 22 Mörtel nach einem und nach drei Tagen mit den zwei dazugehörigen Regressionsgeraden in einem Diagramm dar. Gut zu sehen ist, dass die beiden Regressionsgeraden nahezu auf einer Linie liegen und damit ein linearer Zusammenhang über die Erhärtungsdauer von 1 bis 3 Tagen, bei den Quotienten aus Wärme- und Festigkeitsentwicklung der untersuchten Mörtelmischungen gegeben ist. Gut zu erkennen ist auch, dass sich die 1 Tagesfestigkeiten von den Mörtelproben mit hoher Frühfestigkeit und die drei Tagesfestigkeiten von den Mörtelproben mit niedriger Frühfestigkeit überschneiden. Es zeigt sich, dass mit steigender Druckfestigkeit der Mörtelproben die Wärme pro Festigkeitseinheit abnimmt.

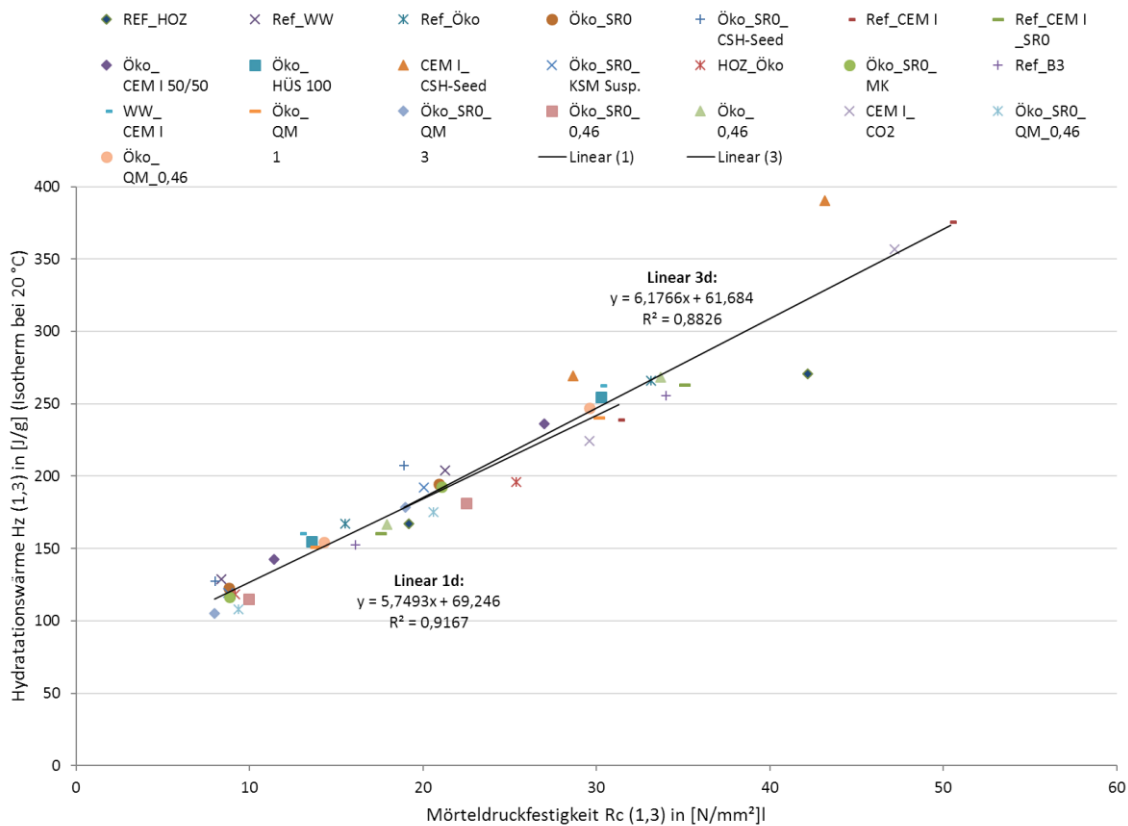


Abbildung 86: Beziehung zwischen Hydratationswärme Hz(1,3) und Druckfestigkeit Rc(1,3)

Um den Zusammenhang zwischen Wärme und Festigkeit darzustellen, wurde eine lineare Regressionsgerade über alle 44 Punkte (= 1 und 3 Tagesfestigkeiten von 22 Mörtelmischungen) mit der Formel $H_z \text{ [J/g]} = 6,05 R_c \text{ [N/mm}^2\text{]} + 65,1$ ermittelt. Weiters sind noch die Mittelwerte der 1 bzw. 3 Tagesfestigkeit als vertikale Linien im Diagramm eingetragen. Auf Basis dieser Geraden, wurden dann Hz/Rc Punkte (Quotienten) ermittelt, die die Wärmeentwicklung in Relation zur Festigkeit darstellen. Es ergibt sich ein degressiver Verlauf dieser Kurve. Dies kann so erklärt werden, dass die lineare Regressionsfunktion die Abszisse bei $H_z = 65,1 \text{ J/g}$ schneidet und zeigt damit, dass um eine Festigkeit zu erreichen, eine fixe „Grundwärmemenge“ benötigt wird. Die Kurve veranschaulicht, dass mit zunehmendem Mörtelalter bzw. auch steigender Festigkeit, entsprechend weniger Wärmemenge freigesetzt wird.

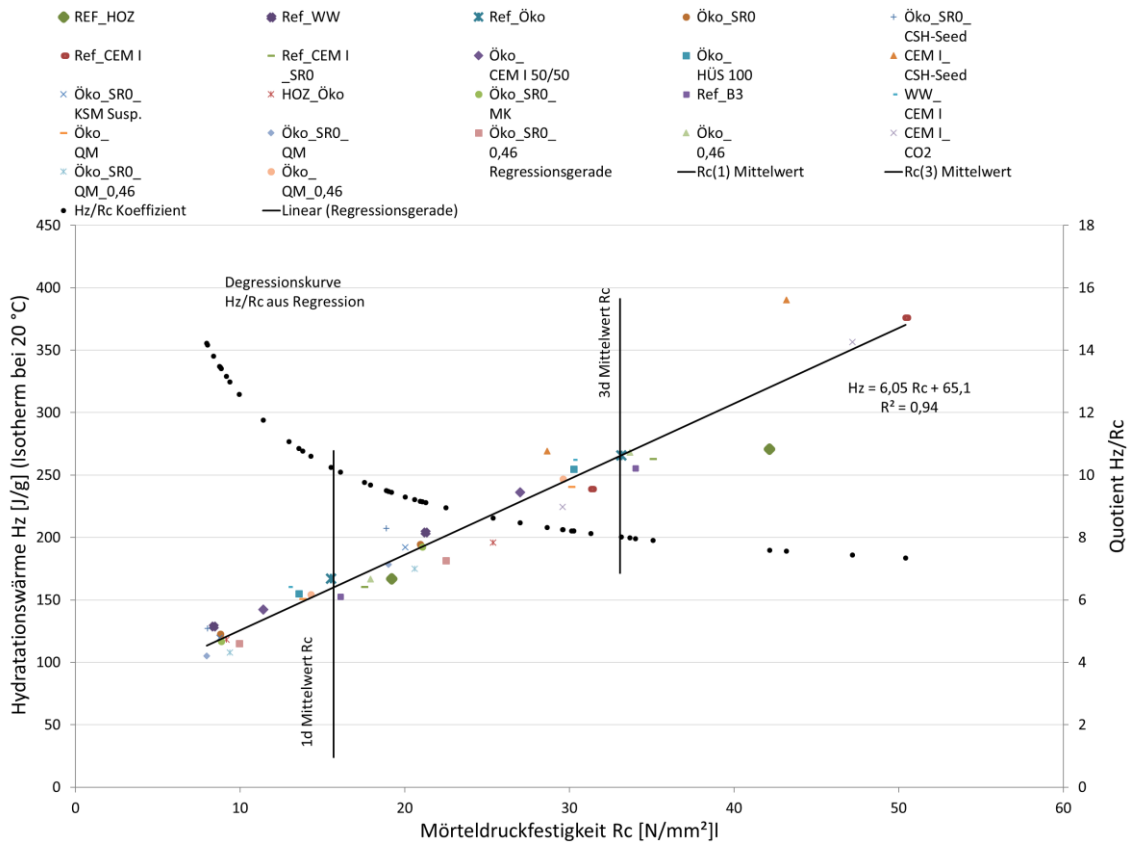


Abbildung 87: Wärme-/Festigkeits- Degressionskurve „Preis der Festigkeit“

6.1.11 Modell zur Abschätzung der Wärmeentwicklung

Da die Wärmeentwicklung im Beton von der Hydratation im Zement ausgeht, die ihrerseits wieder zur Festigkeitsentwicklung von Beton führt, ist es naheliegend zu versuchen ein Modell zu entwickeln, das die Wärme- und auch die Festigkeitsentwicklung auf Basis der wesentlichen Einflussparameter errechnen kann.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Hydratation haben die Anteile der einzelnen Klinkermineralien im Zement. Da jedes der vier wesentlichen Klinkermineralien C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF im Zeitablauf unterschiedliche Hydratationswärmern entwickeln kann, ist als erster Ansatz, den Anteil der Klinkermineralien im Zement als Basis für die Wärmeentwicklung im Modell heranzuziehen. Da es bereits in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen, in den USA für Staudammprojekte, zu diesem Thema gab, existieren bereits Tabellen, die die Wärmeentwicklung der einzelnen Klinkermineralien im Zeitablauf bis zu 6 Jahren enthalten (Vgl. Mandry, 1961, S.11).

Tabelle 30: Beitrag der einzelnen Klinkerminerale zur Hydratationswärme eines PZ, bei einer Lagerungstemperatur von 21,1°C und Blaine 3300 cm²/g (Verbeck & Foster, 1950, S.1235ff; Mandry, 1961, S.11)

	nach 3 Tagen	nach 7 Tagen	nach 28 Tagen	nach 90 Tagen	nach 1 Jahr	nach 6 ¹ / ₂ Jahren
a	0,54 ± 0,08	0,51 ± 0,11	0,91 ± 0,07	1,07 ± 0,04	1,22 ± 0,04	1,20 ± 0,07
b	0,01 ± 0,09	0,04 ± 0,13	0,29 ± 0,07	0,53 ± 0,04	0,74 ± 0,04	0,69 ± 0,08
c	1,51 ± 0,38	3,34 ± 0,55	3,44 ± 0,31	3,60 ± 0,18	3,70 ± 0,18	3,85 ± 0,32
d	0,20 ± 0,34	0,94 ± 0,48	1,30 ± 0,27	1,37 ± 0,16	1,63 ± 0,16	1,55 ± 0,28
e	8,92 ± 4,12	4,34 ± 5,94	-2,17 ± 3,37	-7,16 ± 1,91	-13,46 ± 1,92	-8,28 ± 3,44

In der Tabelle sind in der ersten Spalte Faktoren für die jeweiligen Klinkerminerale angegeben. Dabei steht der Faktor a für C₃S, b für C₂S, c für C₃A und d für C₄AF.

Somit kann man, wenn man die Anteile in [%-Klinker] der Klinkerminerale im Zement kennt, die Hydratationswärme einfach mit folgender Formel für z.B. die Wärmeentwicklung nach 3 Tagen näherungsweise ermitteln.

$$Hz_{Klinker}(3) = C_3S [\%] \cdot 0,54 + C_2S [\%] \cdot 0,01 + C_3A [\%] \cdot 1,51 + C_4AF [\%] \cdot 8,92$$

mit: $H_{z,k}(3)$... Hydratationswärme aus Klinker in [kcal/kg]

$$[J/g] = 4,18 [kcal/kg]$$

Glg. (11)

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor für die Wärmeentwicklung ist auch die Mahlfineinheit des Zements. Da die Referenztafel (im Folgenden gezeigt) für die Wärmeentwicklung auf Basis eines Blaine-Werts von 3300 cm²/g basiert, sind, um Unterschiede in der Mahlfineinheit in das Modell einfließen zu lassen, folgende Faktoren zu berücksichtigen. Pro 100 cm²/g Unterschied zum Referenzzement mit Blaine 3300 cm²/g ist mit einem Korrekturfaktor, der je nach Erhärtungsalter unterschiedlich ist, zu multiplizieren, um die zusätzliche Wärmeentwicklung aufgrund der Mahlfineinheit zu erhalten. Für einen Zement mit Blaine 5000 cm²/g ergibt sich daher für die Erwärmung nach 3 Tagen folgende Formel

$$Hz_{Blaine}(3) = \frac{(5000 - 3300)}{100} \cdot 2,0 \left[\frac{kcal}{kg} \right]$$

mit: $H_{z,B}(3)$... Hydratationswärme aus der Differenz der Mahlfineinheit in [kcal/kg]; [J/g] = 4,18 [kcal/kg]

Glg. (12)

Tabelle 31: Vergrößerung der WE eines PZ bei Erhöhung der spe. Oberfläche um ± 100 cm²/g (Mandry, 1961)

nach	1 Tag	3 Tagen	7 Tagen	28 Tagen	90 Tagen	1 Jahr
kcal/kg	± 2,7	± 2,0	± 1,7	± 1,0	± 0,7	± 0,5

Ein zusätzlicher Einflussfaktor ist der Anteil an anderen hydraulisch wirksamen Bestandteilen wie beispielsweise Hüttensand im Zement, da dieser zu einer verminderten Wärmefreisetzung beiträgt. Dies findet mit einem Korrekturfaktor Eingang ins Modell, der abhängig vom Anteil an HÜS im Zement und vom Zeitablauf in Tagen gewählt werden kann. So ergibt sich nach 3 Tagen bei einem HÜS Anteil von beispielsweise 40% ein Verhältniswert $R(3) = 0,75$. Das heißt, der errechnete Wärmewert nach 3 Tagen, der sich zunächst aus der Wärme je nach Klinkerzusammensetzung und je nach Differenz aus der Mahlfineinheit nach Blaine ergibt, muss gemäß folgender Grafik bei 40% Hüttensandanteil um 25% reduziert werden.

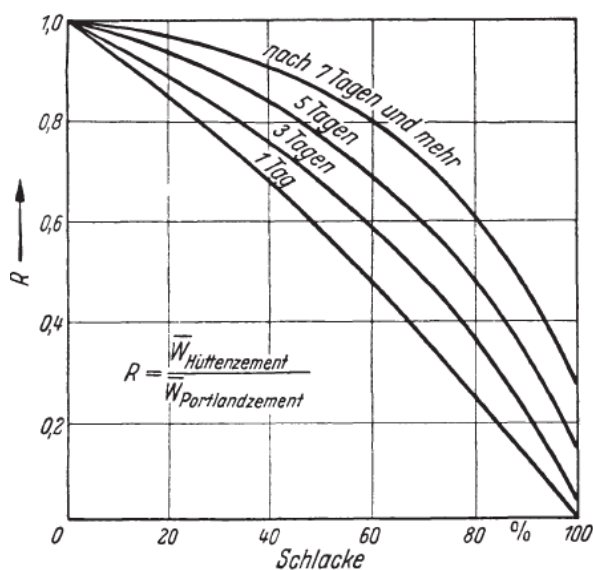


Abbildung 88: Verhältniswert R zur Berechnung der WE von Hüttenzement abhängig vom HÜS-Gehalt (Mandry, 1961)

Die gesamte Wärmeentwicklung $H_z(t)$ unter Berücksichtigung des Anteils an latent hydraulischen Stoffen (HÜS) wird wie folgt ermittelt:

$$H_z(t) = (H_{z_K}(t) + H_{z_B}(t)) \cdot R$$

mit: $H_z(t)$... Hydratationswärme des Zements in [J/g]

$H_{z,K}(t)$...Hydratationswärme aus der Klinkerverteilung in [J/g]

$H_{z,B}(t)$...Hydratationswärme abhängig von der Mahlfineinheit in [J/g]

R... Verhältniswert abhängig vom HÜS-Anteil in [%-BM]

Glg. (13)

Ob der Modellansatz auch zur Beschreibung der Wärmeentwicklung bei den 22 untersuchten Mörteln taugt, wurde anhand der Gegenüberstellung der gemessenen

Wärme am Kalorimeter und der mit dem Modell berechneten Wärme untersucht. Für alle 22 Mörtel wurde das Modell in Excel Tabellen umgesetzt. Um auf die spezifischen Gegebenheiten der untersuchten Mörtel einzugehen, wurde das Modell erweitert und kalibriert.

Da Mischungen von unterschiedlich fein gemahlten Zementen und Hüttensand in den Mörtelmischungen enthalten sind, wurde das Modell insofern erweitert, als dass als Blaine-Wert ein Durchschnittswert, aus der Gewichtung beider Blaine-Werte als Basis, verwendet wurde (Gewichteter Durchschnitt). Zusätzlich wurden die Tabellenwerte für die Erhöhung der Wärmeentwicklung aus der Mahlfeinheit von 2 kcal/kg für 3 Tage auf 1,8 und von 2,7 kcal/kg für 1 Tag auf 2,3 herabgesetzt. So konnte die Bestimmtheit der später ermittelten Regressionsgeraden erhöht werden.

Bei der Berücksichtigung des Hüttensandanteils wurden die Werte aus der Grafik übernommen. Für die 1 Tages Werte wurde für einen Hüttensandanteil von 40% bzw. 65% 0,67% bzw. 0,45% und bei einem Hüttensandanteil von 65% 0,75 bzw. 0,55 angenommen.

Bei der Berechnung der Hydratationswärme für die Klinkermineralien wurden die Werte für 3 Tage im Toleranzbereich angepasst und für 1 Tag, da nicht vorhanden neu ermittelt.

Folgende Werte wurden verwendet:

Tabelle 32: Gewählte Faktoren für die Ermittlung der Wärme aus den einzel-nen Klinkermineralien

Klinker	3d	3d	1d	1d
	[kcal/kg/100]	[J/g/100]	[kcal/kg/100]	[J/g/100]
C ₃ S	0,57	2,37	0,19	0,78
C ₂ S	0,10	0,42	0,26	1,10
C ₃ A	0,98	4,08	0,16	0,67
C ₄ AF	0,54	2,26	0,27	1,12

In der folgenden Grafik ist das Ergebnis der Modell Wärmeberechnung dargestellt. Wie man sehen kann weicht das Modell mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,96$ nur gering vom Ist der gemessenen Wärme ab.

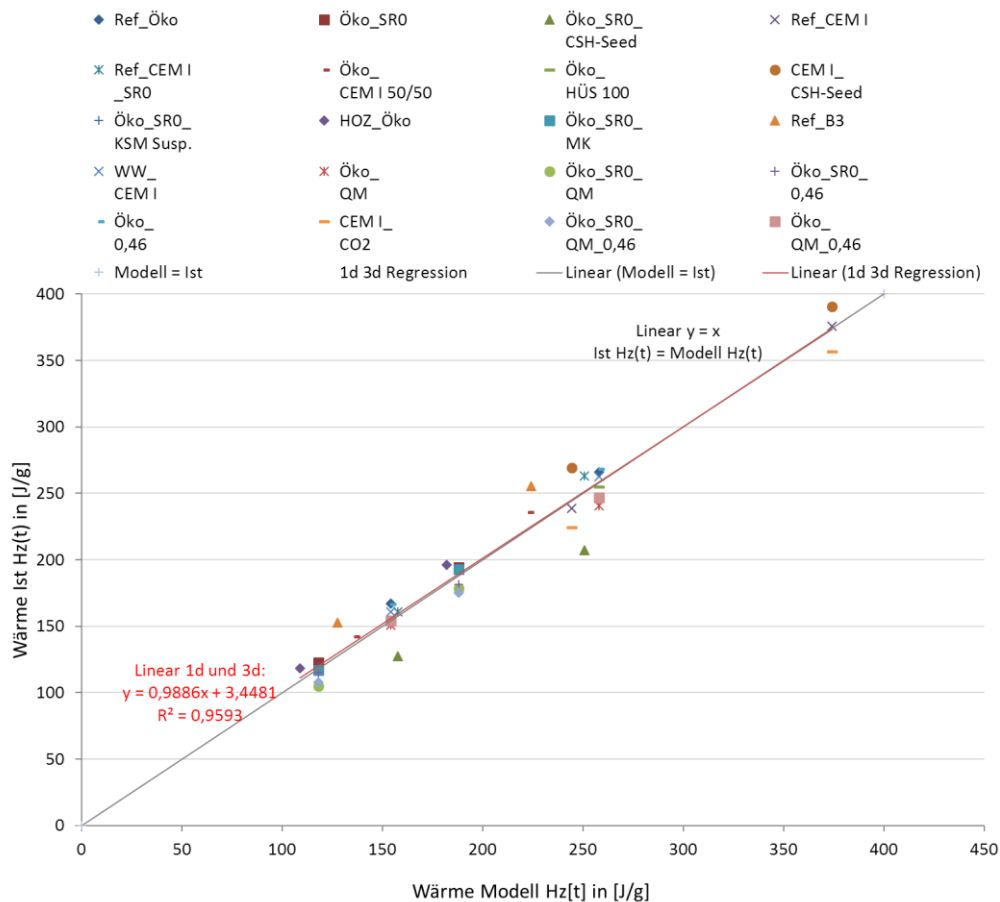


Abbildung 89: Vergleich der modellhaft ermittelten und der gemessenen Wärmeentwicklung

Aufgrund der vorhandenen linearen Beziehung $R_c = (H_z - 65,1) / 6,1$ [N/mm²], die auf Basis der gemessenen Wärme- und Festigkeitsentwicklung der 22 Mörtel ermittelt wurde, ist es somit möglich, nur aufgrund der Eingangsparameter, Anteil C₃S, C₂S, C₃A und C₄AF in Prozent des Klinkers, Hüttensandanteil in Prozent des Gesamtbindemittelgehalts und den entsprechenden Blaine-Werten, die 1 bzw. 3 Tages-Wärmeentwicklung und Festigkeit anhand von Gewichtungsfaktoren modellhaft zu ermitteln.

6.2 Ergebnisse aus ergänzenden Untersuchungen am Beton

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den zusätzlich zu den in Kapitel 4 dargestellten Untersuchungen gezeigt. Die Ergebnisse aus der Frischbetonprüfung sind bereits im Kapitel 4 für alle untersuchten Betonsorten dargestellt. Für die neue Betonsorte Öko_SR0 wurde etwa die gleiche Menge Fließmittel verwendet, wie für die Referenzbetonsorte WW. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick:

Tabelle 33: Fließmitteldosierung bei der neuen Betonsorte Öko_SR0

Additive Fließmittelzugabe			
Betonsorte		WW	Öko_SR0
Mischung 1	% B _G	0,63	0,62
	kg/m ³	2,01	1,96
Mischung 2	% B _G	0,60	0,61
	kg/m ³	1,91	1,94

6.2.1 Wärme- und Festigkeitsentwicklung der neuen Betonsorte

Für die neue Betonsorte Öko_SR0 konnte Anhand der gemessenen Temperaturen im Kern der Proben ein geringerer Temperaturanstieg von 13,05 °C gegenüber den 14,40 °C der Beton-Referenz WW ermittelt werden. Die folgende Grafik zeigt dies anhand der im Kern der isolierten Probekörper gemessenen Temperaturverläufe:

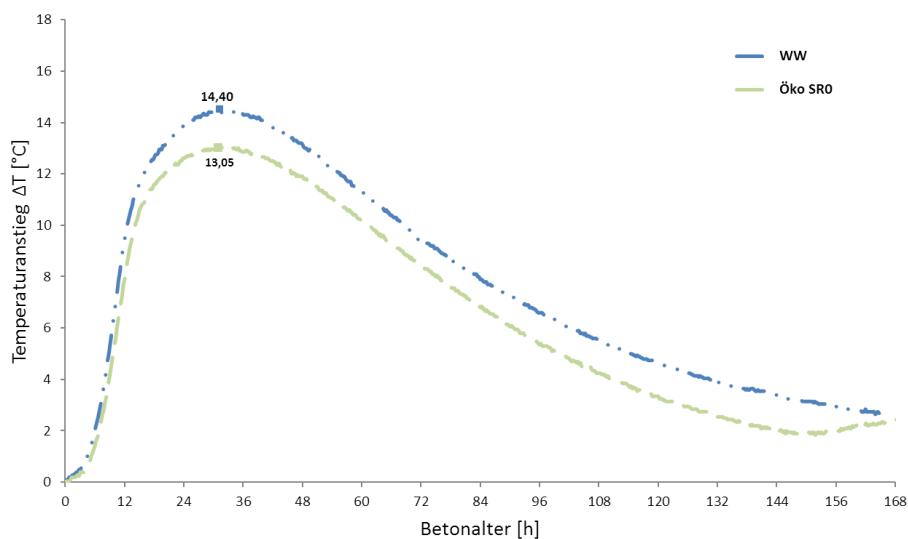


Abbildung 90: Temperaturanstieg der neuen Betonsorte Öko_SR0 gegenüber der Referenz WW

Was die Festigkeitsentwicklung betrifft, konnten, wie die folgende Grafik und die ermittelten s-Beiwerte (bei nahezu gleicher 28-Tage-Festigkeit) zeigen, keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Jedoch konnte der „Öko_SR0-Beton“ nach 24 Stunden (trotz niedrigerem Temperaturanstieg als Maß der Wärmeentwicklung) eine geringfügig höhere Frühfestigkeit und nach 56 Tagen, nach zwischenzeitig schlechteren Ergebnissen, wieder etwa die gleichen Festigkeiten wie der Referenzbeton WW erreichen. Die bessere Frühfestigkeit nach 24 h bei gleichzeitig geringerer Wärmeentwicklung zeigte sich mit etwas höherer Signifikanz auch bei den Untersuchungen an den korrespondierenden Mörtelmischungen (siehe Kapitel 6.1.10 – Tabelle 28).

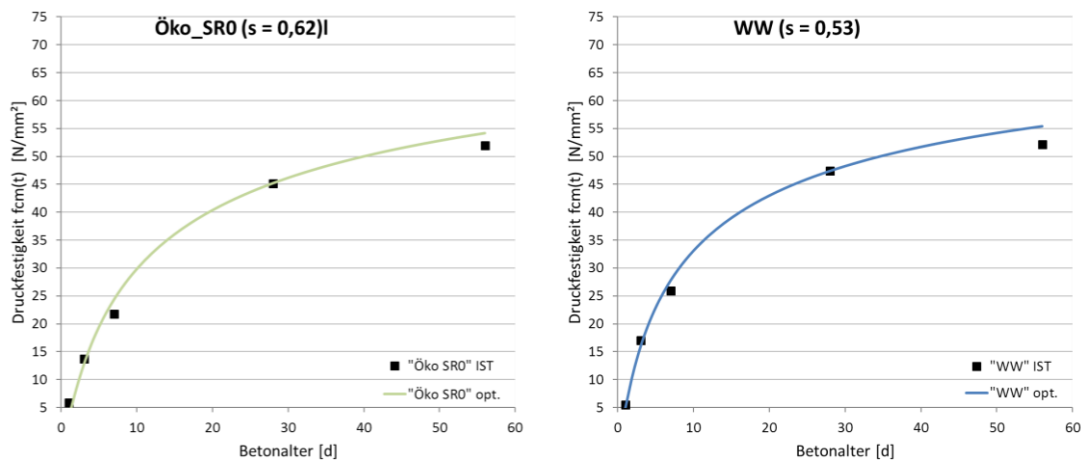


Abbildung 91: Vergleich der Festigkeitsentwicklung der neuen Betonsorte Öko_SR0 gegenüber der Referenz WW

Die oben dargestellten Regressionskurven „Öko SR0 opt.“ und „WW opt.“ zeigen die, mit dem jeweils optimierten Beiwert s [-] und der gemessenen mittleren Druckfestigkeit $f_{cm}(28)$, gerechnete Festigkeitsentwicklung (näheres siehe Kapitel 4.4.2). Die Punkte „Öko SR0 IST“ und „WW IST“ stellen hingegen die gemessenen mittleren Druckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ dar. Die Werte sind in folgender Tabelle angegeben.

Tabelle 34: Hydratationswärmen $H_z(t)$, mittl. Druckfestigkeiten $f_{cm}(t)$ und Verhältniszahlen für die neue Betonsorte Öko_SR0 und die Referenz WW

Betonalter [h]	WW						Öko_SR0					
	$H_z(t)$ [kJ/kg]	$f_{cm}(t)$ [N/mm ²]	$f_{cm}(t)$ opt.	$f_{cm}(t)/$ $f_{cm}(28)$	$H_z(t)/$ $f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/$ $H_z(t)$	$H_z(t)$ [kJ/kg]	$f_{cm}(t)$ [N/mm ²]	$f_{cm}(t)$ opt.	$f_{cm}(t)/$ $f_{cm}(28)$	$H_z(t)/$ $f_{cm}(t)$	$f_{cm}(t)/$ $H_z(t)$
24	136,9	5,52	5,06	0,16	24,81	0,04	128,5	5,84	3,19	0,13	22,01	0,05
48	176,1		11,34		15,52	0,06	167,3		8,31		20,13	0,05
72	182,1	17,80	16,23	0,51	10,23	0,10	175,2	13,75	12,70	0,22	12,75	0,08
96	183,3		20,09		9,13	0,11	175,2		16,35		10,71	0,09
120	184,3		23,23		7,93	0,13	175,8		19,43		9,05	0,11
144	185,9		25,87		7,19	0,14	176,6		22,07		8,00	0,12
166	187,8	25,90	28,12	0,74	7,25	0,14	188,4	21,76	24,36	0,30	8,66	0,12

Ähnlich wie bei der Festigkeitsentwicklung, zeigen auch die Quotienten aus der modellhaft ermittelten Wärmemenge $H_z(t)$ und der Festigkeit $f_{cm}(t)$ beim „Öko_SR0-Beton“ im Betonalter von einem Tag geringfügig bessere Verhältnisse (siehe folgende Tabelle). Im weiteren Verlauf dominiert der Referenzbeton. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die ermittelten Ergebnisse der beiden Betonsorten (siehe auch Anhang A7 und Kapitel 4.4).

6.2.2 Karbonatisierungswiderstand

Die Karbonatisierung von Beton ist eine der wichtigsten Ursachen, die zur Korrosion der Bewehrung und damit Schäden an Stahlbetonbauten führt. Der Karbonatisierungsfortschritt

ist von vielen Faktoren abhängig. Wesentliche Einflussgrößen sind der Zementgehalt und Zusatzstoffe, die den pH-Wert des Porenwassers und den $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt im Zementstein beeinflussen. Zusätzlich ist der Wasserbindemittelwert und die Betonfeuchtigkeit aber auch die Nachbehandlung maßgeblich. Für die untersuchten Betonsorten ergeben sich die in folgender Tabelle gezeigten gemessenen mittleren Eindringtiefen d_k nach 28 und 70 Tagen, bei einer beschleunigten Lagerung im CO_2 -Schrank (2% CO_2 -Konzentration und 65% rel. LF).

Tabelle 35: Karbonatisierungstiefe d_k der untersuchten Betonsorten in [mm]

Betonsorte Alter t [d]	Öko	HOZ	B3	WW	Öko_SR0
0	0	0	0	0	0
7	0,00	0,00	1,03	2,07	1,62
28	2,00	0,54	3,89	5,27	3,75
70	4,02	1,24	5,99	8,66	

Da zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch keine Ergebnisse über die Karbonatisierungstiefe nach 70 Tagen bei der Betonsorte Öko_SR0 vorlagen, können diese leider nicht gezeigt werden. Wie die Tabellenwerte und folgende Abbildung zeigen, konnte bei der Betonsorte Öko_SR0 jedoch eine geringere mittlere Karbonatisierungstiefe gegenüber der Referenz WW in den ersten 28 Tagen gemessen werden.

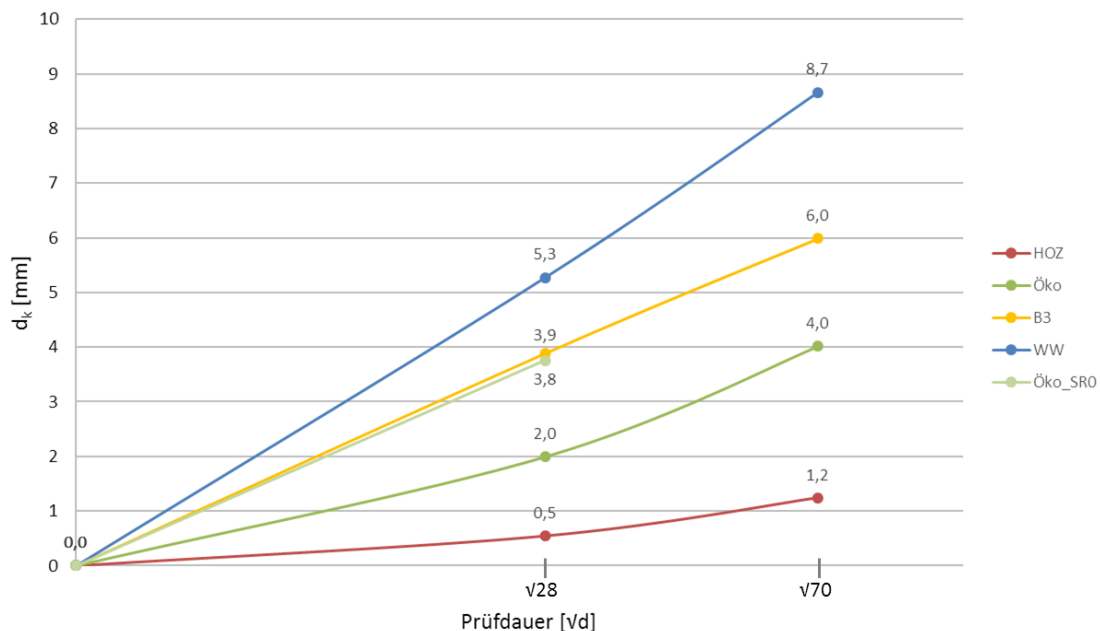


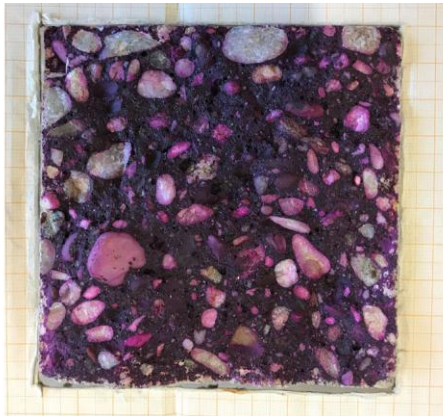
Abbildung 92: Karbonatisierungstiefe d_k der untersuchten Betonsorten nach 28 und 70 Tagen Versuchslagerung im CO_2 -Schrank

Die folgenden Bilder zeigen das indikativ ermittelte Karbonatisierungsverhalten der untersuchten Betonsorten nach 28 Tagen (links) und nach 70 Tagen (rechts):

Öko – Beton



HOZ – Beton



B3 – Beton



WW – Beton

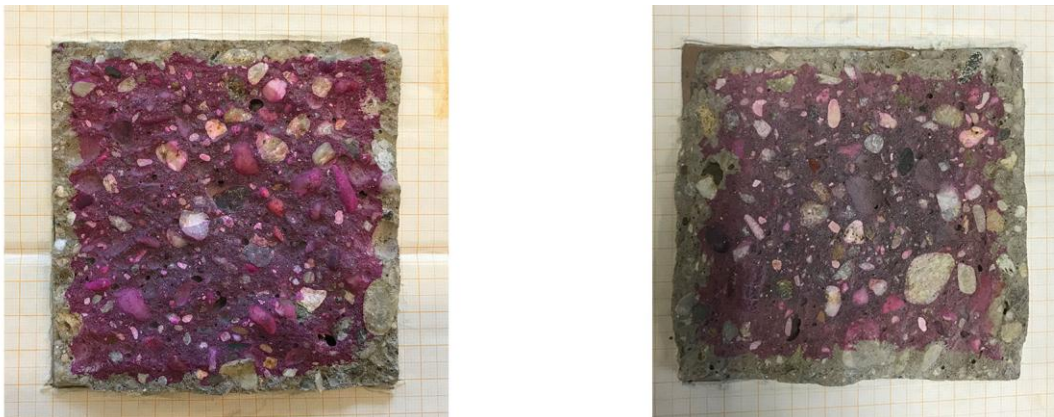


Abbildung 93: Indikativ bestimmtes Karbonatisierungsverhalten der untersuchten Betonsorten nach 28 Tagen (links) und 70 Tagen (rechts) Lagerung im CO₂ Schrank

6.2.3 Wassereindringwiderstand

Ein wichtiger Parameter im Hinblick auf die Dichtigkeit und damit auf die Dauerhaftigkeit von Beton ist der Wassereindringwiderstand. Je geringer die Wassereindringtiefen sind, desto höher ist die Dichtigkeit des Gefüges und damit die zu erwartende Beständigkeit gegenüber aggressiven Umwelteinwirkungen.

Die Expositionsklassen XW1 und XW2 für z.B. dichte Betonbauwerke, die mäßigem Wasserdruck (Wassersäule < 10m) bzw. hohem Wasserdruck (> 10m) ausgesetzt sind, schreiben entsprechende maximale Eindringtiefen von 50 mm bzw. 25 mm gemäß dem durchgeführten Prüfverfahren vor. Wie aus der nachfolgenden Grafik ersichtlich ist, entsprechen alle geprüften Betone mit max. 15 mm mittlerer Wassereindringtiefe sowohl der XW1 als auch der XW2 Anforderung. Außerdem konnte für alle Betonsorten der in der Richtlinie „Weiße Wanne“ (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) festgesetzte höchste Grenzwert von 16mm als äquivalenter Nachweis für die Expositionen XW2, XD1, XD2, XAT-C, XAL-C erreicht werden. Die folgende Grafik veranschaulicht die Ergebnisse aus den Messungen:

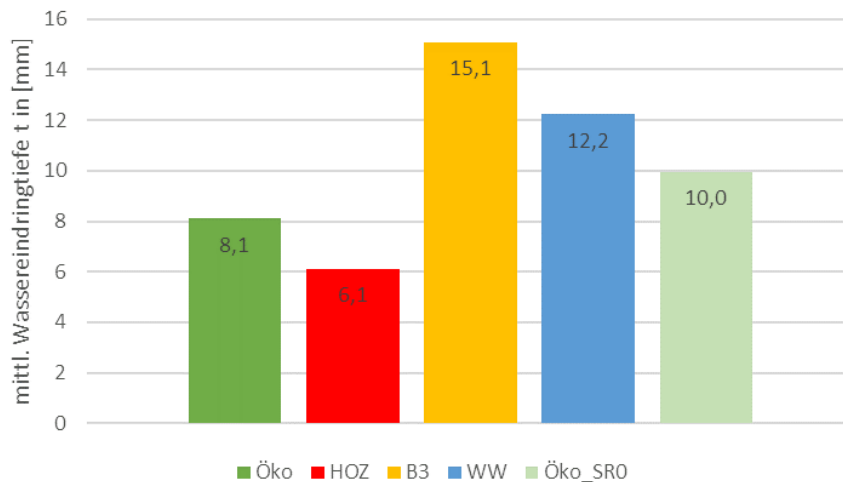


Abbildung 94: Mittlere Wassereindringtiefe t der untersuchten Betonsorten in [mm]

Der „Öko_SR0-Beton“, der als neue Betonsorte gegen den „WW-Beton“ als Referenz antreten sollte (jeweils 60 M-% CEM I SR0 im BM), erreichte mit einer mittleren Wassereindringtiefe von 10 mm bessere Ergebnisse als der „WW-Beton“ (Referenzbeton) mit durchschnittlich 12,2 mm Eindringtiefe. Die gemessene mittl. Druckfestigkeit nach 56 Tagen Unterwasserlagerung (Beginn der Wasserbeaufschlagung unter Druck), die ja auch ein Maß für die Gefügedichtigkeit ist, war bei beiden Betonsorten mit 52 N/mm² gleich hoch.

Besonders sticht bei den gezeigten Ergebnissen die Betonsorte HOZ mit sehr geringen Wassereindringtiefen gegenüber den anderen Betonsorten hervor. Die sehr niedrige mittl. Wassereindringtiefe von 6,2 mm lässt auf ein sehr dichtes Gefüge und daher auch auf einen hohen Widerstand gegenüber aggressiven Medien schließen. Die mittl. Druckfestigkeit nach 56 Tagen konnte bei dieser Betonsorte mit 69,9 N/mm² ermittelt werden. Auch die Betonsorten Öko und B3 zeigen, bei einer Reihung der Ergebnisse nach ermittelter mittl. 56 Tages Festigkeit, einen Zusammenhang.

7 Diskussion und Schlussfolgerung

Variation der Zemente

Es hat sich gezeigt, dass bei der Zementauswahl, die Wärmeentwicklung entscheidend abhängig von der Klinkerzusammensetzung, vor allem vom Anteil des Klinkerminerals C_3A , ist. Durch die Variation der eingesetzten Zemente beim Mörtel „Ref_Öko“, der 60 M-% CEM I enthält, hat man durch die Verwendung von „ C_3A -freiem“ Zement CEM I SR0 den größten Hebel, um die Wärmeentwicklung abzusenken ($H_z(3) = -35\%$). Dies geht auch mit einer entsprechenden Absenkung der Frühfestigkeit einher. Zusätzlich wurde auch noch eine Variation untersucht, bei der 50% CEM I und 50% CEM I SR0 Zement in die Mörtelmischung eingebracht wurde (CEM I_50/50). Die Ergebnisse zeigten, dass dadurch die Wärmeentwicklung $H_z(3)$ um ca. 40% im Verhältnis zum Mörtel mit 100% CEM I SR0 Zement reduziert werden konnte.

Herausragende Eigenschaften in Bezug auf den Quotienten aus Wärme- und Festigkeit (H_z/R_c) zeigt der untersuchte CEM III/A 52 R Zement mit 36% Hüttensand 4% Kalksteinmehl und 60% Klinker. Erst die nachträgliche Analyse hat ergeben, dass dieser Zement wesentlich feiner gemahlen ist und auch hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung optimiert ist.

Der H_z/R_c Koeffizient des mit diesem Zement hergestellten Mörtels („Ref_HOZ“) war mit 8,7 [$J/g : N/mm^2$] am 1. Tag und 6,4 [$J/g : N/mm^2$] am 3. Tag um 20% besser als eine chemisch-mineralogisch vergleichbar zusammengesetzte Rezeptur („Ref_Öko“) mit 10,8 bzw. 8. Beim Vergleich der Wärmeentwicklung liegen beide Mörtel am 1. Tag mit jeweils 167 J/g gleich auf, am 3. Tag liegt der „Ref_HOZ“ mit 271 J/g zu 266 J/g vom Ref_Öko um 2% höher.

Eine interessante Variation ist auch den 60 M-% CEM I Anteil im Mörtel „Ref_Öko“ durch den oben genannten CEM III/A Zement zu ersetzen (= „HOZ_Öko“). Dabei konnte gezeigt werden, dass die Hydratationswärme des Mörtels „HOZ_Öko“ am 1. Tag um 9% und am 3. Tag um 4% geringer war, als jene des Mörtels „Ref_WW“ (ohne die Verwendung eines C_3A freien Zementes, alleine durch einen höheren Hüttensandanteil von insgesamt rd. 66%, einer optimierten Sieblinie und einer höheren Mahlfinheit). Auch die 1 bzw. 3 Tages Festigkeitswerte waren beim „Ref_WW“ um 9,5 bzw. 19,2% deutlich niedriger. So ergibt sich auch, dass die 1 bzw 3 Tages H_z/R_c Koeffizienten des „HOZ_Öko“ Mörtels um 15 bzw. 20% deutlich besser waren. Auch gegenüber dem „Öko_SR0“ waren alle Kennwerte besser, mit Ausnahme der kum. Wärme am 3. Tag, die beim „HOZ_Öko“ um 7% höher lag.

Variation der enthaltenen Mikrofüller

Um die Wirkung der Mikrofüller zu ermitteln, wurden die Mörtelmischungen „Ref_Öko_SR0“ und auch „Ref_Öko“ entsprechend modifiziert. Dazu wurden die inerten Mikrofüller Kalksteinmehl 7,5 M-%, KSM Suspension 7,5 M-% und der puzzolanisch wirksame Mikrofüller Metakaolin 4,5 M-% + 3 M-% Mikrofüller Kalksteinmehl variiert und mit der Mischung mit 7,5 M-% Quarzmehl (ohne Mikrofüllerwirkung, sog. „Ecofüller“), verglichen.

Als Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die Mikrofüller zu einer verbesserten Frühfestigkeit führen, wobei sich die Wirkung der einzelnen Füller leicht unterscheidet. Bei der

kumulierten Wärmeentwicklung nach 3 Tagen liegen alle untersuchten Füller gleichauf, nämlich 10% über dem Referenzmörtel mit Quarzmehl als Ecofüller. Bei der 3 Tages-Festigkeit lag der Mörtel mit Mikrofüller Kalksteinmehl um 15% über dem Referenzmörtel mit Quarzmehl. Die restlichen Mikrofüller erreichten weniger als 15% Festigkeitszuwachs am 3. Tag. Bei der Festigkeit nach 28 Tagen, konnte die puzzolanische Wirkung des Metakaolin Füllers deutlich aufgezeigt werden. Die Kalksteinmehl Suspension hatte nach 28 Tagen den geringsten Effekt auf die Festigkeit, der ca. 50% vom Effekt des untersuchten Mörtels mit Kalksteinmehl als Mikrofüller ausmachte (siehe auch Kapitel 6.1.6 Abbildung 73 und Anhang A.1). Die Mikrofüller KSM und die KSM-Suspension wirken etwa gleichermaßen steigernd auf die Hydratationswärme und auf die Frühfestigkeit in den ersten 3 Tagen. Das Verhältnis von Hydratationswärme zu Frühfestigkeit ändert sich durch das feiner gemahlene KSM aus der Suspension nicht.

Variation des Wasserbindemittelwerts

Interessante Einblicke brachte auch die Absenkung des Wasserbindemittelwertes von $W/B_G = 0,5$ auf $0,46$. Während beim Mörtel „Ref_Öko“ mit CEM I Zement durch die Absenkung des W/B-Wertes sich nur geringfügige Veränderungen bei der Wärme- und Festigkeitsentwicklung ergaben, war die Veränderung der Festigkeit beim Mörtel „Öko SR0“ mit CEM I SR0 Zement deutlich ausgeprägter, wobei sich die Wirkung bis hin zur 28 Tagesfestigkeit deutlich verstärkte. Der zusätzliche Effekt auf die späte Festigkeitsentwicklung dürfte von der latent hydraulischen Reaktion des Hüttensandes kommen. Typisch für die Absenkung des W/B Wertes ist eine Verringerung der Wärmeentwicklung bei gleichzeitiger Erhöhung der Frühfestigkeit. Die Erklärung ist, dass durch den niedrigeren W/B Wert der Porenwasserraum kleiner ist und damit auch weniger Hydratationswärme benötigt wird, um diesen zu füllen und damit Festigkeit aufzubauen.

Beim Vergleich mit dem Referenzmörtel „Ref_WW“ sieht man, dass, wenn eine niedrige Wärmeentwicklung gefordert ist, der W/B abgesenkte „Öko_SR0_0,46“ mit einem Hz/Rc Koeffizienten von $11,6$ am 1. Tag und $8,1$ am 3. Tag ausgezeichnete Eigenschaften aufwies, die deutlich besser als der Referenzmörtel „Ref_WW“ waren, der am 1. Tag $15,3$ und am 3. Tag $9,6$ zeigte und damit um 32% bzw. 19% deutlich schlechter war.

Verwendung von „Seeding-Mittel“

Eine weitere Möglichkeit auf die Frühfestigkeit Einfluss zu nehmen, ist die Verwendung sogenannter Seeding-Mittel, die aus einer Suspension mit künstlichen CSH-Keimen bestehen. Dabei konnte gezeigt werden, dass diese Seeding-Mittel eine ähnliche Wirkung, wie die Mikrofüller haben. Durch Zugabe von 4% Seeding-Suspension konnte gezeigt werden, dass sich die Hydratation besonders beim Mörtel „Ref_CEM I“ in der Wärmeintensität und auch in der Verschiebung in Richtung „Früh“ auswirkte. Beim C_3A -freien „Öko_SR0“ war die Wirkung geringer, aber auch noch signifikant. Was dann doch überraschte, war die Festigkeitsentwicklung, die zum Unterschied von den Mikrofüllern, deutlich schlechter war, wobei die Mörtelmischung mit reinem CEM I Zement als Bindemittel stärker betroffen war, als die „Öko SR0“ Mischung mit CEM I SR0 Zement und 40% Zusatzstoffanteil. Die positive Wirkung innerhalb der ersten 12 Stunden, führt zu einer Verschlechterung in der 1- und 28-

Tagesfestigkeit bei der Anwendung von Seeding-Mittel. Da die Suspension additiv zu den Mörteln dazugegeben wurde, könnte einen Teil der niedrigeren Festigkeiten, der um 8% erhöhte W/B Wert von 0,54 erklären.

Beton

Der „Öko_SR0-Mörtel“, der gegenüber dem Referenzmörtel „Ref_WW“ bei der Wärmeentwicklung am 1. und 3. Tag um 5% besser war, konnte auch mit seiner Festigkeit überzeugen, die am 1. und 3. Tag ca. gleich und nach 7 und 28 Tagen deutlich höher war. Dieser „Öko_SR0-Mörtel“ wurde in eine entsprechende Betonrezeptur „Öko_SR0-Beton“ umgesetzt, um diese mit den Werten des „WW-Betons“ aus den Voruntersuchungen zu vergleichen. Beim Vergleich wies der „Öko_SR0-Beton“ eine um 10% niedrigere Temperaturerhöhung als der „Ref_WW“ Beton auf. Beim Vergleich der Festigkeiten des „Öko_SR0-Mörtels“ mit dem „Öko_SR0-Beton“, war auffällig, dass der Beton erheblich geringere Festigkeiten aufwies, die deutlich unter den Festigkeiten des Mörtels lagen. So waren die 1, 3 und 7 Tagesfestigkeiten um etwa ein Drittel niedriger und die 28 Tagesfestigkeit um 20% niedriger als beim Mörtel. Im Gegensatz waren beim „WW-Beton“ mit einem Drittel bei der 1 Tagesfestigkeit, 15% bei der 3 und 7 Tagesfestigkeit und 4% bei der 28 Tagesfestigkeit, geringere Unterschiede zur Mörtelreferenz „Ref_WW“ festzustellen. Dies führte dazu, dass bei den Festigkeitsunterschieden beim Betonvergleich der Öko_SR0 nur mehr bei der 1 Tagesfestigkeit mit 5% vorne liegt und bei der 3 und 7 Tagesfestigkeit 25% und bei der 28 Tagesfestigkeit 5% unter dem „Ref_WW“ zu liegen kommt. Warum es bei der Umsetzung zwischen Mörtel und Beton erhebliche Unterschiede zwischen den beiden Mischungen gegeben hat und warum die Unterschiede je nach Tagen variieren, sollte weiter untersucht werden. Ein möglicher Grund könnte sein, dass beim „Öko_SR0-Beton“ ein anderer 0/4 Sand mit weniger Feinanteil, als bei den übrigen Betonsorten verwendet wurde.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von den Referenzmörtelmischungen wurden aus der Matrix der Möglichkeiten, die unterschiedlichen Strategien der Optimierung, wie die Variation der Zemente, Zugabe von Zusatzstoffen, Variation der Mikrofüller, Absenkung des W/B-Werts und Zusatz von Seeding-Mittel, untersucht. Dabei wurden die Möglichkeiten, eine geeignete Mörtelmischung mit niedriger Wärmeentwicklung, bei gleichzeitiger ausreichender Frühfestigkeit zu entwickeln, die auch der Spezifikation der Richtlinie „Wasserundurchlässige Bauwerke – Weiße Wannen (WW)“ entspricht, ausgelotet. Durch die vorgenommenen Variationen ergaben sich 22 verschiedene Rezepturen, die hinsichtlich ihrer Wärme- und Festigkeitsentwicklung untersucht und bewertet wurden.

Mit einer neuen Mörtelmischung, mit der Rezeptur 60% CEM I SR0 Zement, 32,5% Hüttensand und 7,5% feinem Kalksteinmehl, konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften des Referenzmörtels, der sich ebenfalls aus 60% CEM I SR0 Zement und 40% Zusatzstoff zusammensetzt und den Spezifikationen der Richtlinie für wasserundurchlässige Bauwerke (Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018) entspricht, übertroffen werden konnte. Die neue Mörtelmischung wurde anschließend in eine entsprechende Betonrezeptur übersetzt und die Eigenschaften am Betonwürfel untersucht, mit dem Referenzbeton verglichen und konnte auch beim Beton überzeugen.

Wärmemodell Mörtel

Mithilfe eines selbst adaptierten Wärme Modells wurde versucht, die Wärmeentwicklung nach 1 und 3 Tagen der unterschiedlichen Mörtel, anhand der Verteilung der vier wesentlichen Klinkerminerale C3S, C2S, C3A und C4AF im Zement, des Blaine-Wertes der jeweiligen Mischung und dem Hüttensandanteil, zu ermitteln und mit den experimentell ermittelten Werten zu vergleichen.

Beim Wärmemodell konnte gezeigt werden, dass durch eine entsprechende Anpassung und Kalibrierung des Modells, die errechnete Wärmeentwicklung aus dem Modell, die experimentell ermittelten Werte mit hoher Signifikanz abbilden konnten. Durch den linearen Zusammenhang zwischen Wärmeentwicklung und Festigkeit bei der 1 bzw. 3 Tagesfestigkeit, ist es somit möglich, die 1 bzw. 3 Tagesfestigkeit auf Grund der errechneten Wärme abzuschätzen.

Ausblick erweiterte Variationen der Bindemittelzusammensetzung

Bei den untersuchten Rezepturen wurde der Mikrofülleranteil von 7,5% nicht gezielt variiert. Trotzdem wäre es interessant, wie sich der Einfluss der Variation der Anteile auswirkt. Ähnlich ist es bei der Mahlfineinheit, die nicht gezielt variiert wurde. Erst die nachträgliche Analyse des verwendeten CEM III/A Zements hat ergeben, dass dieser wesentlich feiner gemahlen ist und auch hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung optimiert ist, da er herausragende Eigenschaften in Bezug auf den Quotienten aus Wärme- und Festigkeit (Hz/Rc) zeigt. Hier sollte man zukünftige Untersuchungen aufsetzen.

Das gleiche gilt natürlich auch für den W/B-Wert, der nur in einer Variation von 0,5 auf 0,46 bei ausgewählten Rezepturen abgesenkt wurde. Dabei konnte gezeigt werden, dass, die Absenkung zu signifikanten Verbesserungen hinsichtlich der Wärme- und Festigkeits-Relationen führt.

Der Hüttensand Anteil wurde auch auf Grund der „WW Spezifikation“ nicht variiert und mit 32,5% konstant gehalten, damit der Gesamtanteil an Zusatzstoffen 40% nicht übersteigt. Wie sich jedoch beim „HOZ_Öko“, der nur auf Grund der Variation des CEM I Zements vom „Ref_Öko“ mit dem CEM III/A Zement vom „Ref_HOZ“ entstanden ist, der einen Hüttensandanteil von 66% hat, gezeigt hat, ist es, auch im Sinne der CO₂ Bilanz, durchaus sinnvoll Mörtelmischungen mit höherem Hüttensandanteil zu untersuchen. Eine weitere Möglichkeit, die ja häufig in Fertigteilebetonwerken zur Steigerung der Frühfestigkeit verwendet wird, ist die Erwärmung des Betons. Auch diese Möglichkeit wurde nicht untersucht. Wenn man bedenkt, dass heute die Tunnelauskleidungen von Eisenbahntunneln wie z.B. auch der Koralmtunnel, mit Tübbing, die in Fertigteilebetonwerken hergestellt werden und die mehrere hunderttausend m³ Beton benötigen, ausgeführt werden, so sieht man auch hier hohes Potential, Betone mit höherem Hüttensandanteil einzusetzen, deren Frühfestigkeit auch durch externe Wärmequellen verbessert werden kann.

Ausblick Verbesserung Untersuchungsmethoden

Die Arbeit konnte sich auf nur wenige Mörtelmischungen und damit auch wenige Einflussfaktoren beschränken, da die Ermittlung vor allem der Festigkeitswerte durch die umfangreichen Untersuchungen, sehr zeitaufwendig ist. Hier könnte in weiterführenden Untersuchungen ein Verfahren der zerstörungsfreien Festigkeitsmessung angewendet werden, bei dem man an einem Probewürfel kontinuierlich die Festigkeit messen kann (z.B. Ultraschallmessungen). Zusätzlich wäre auch eine Datenbank denkbar, bei der weltweit die Ergebnisse von Versuchen systematisch gespeichert würden, die dann allen Betonforschern zugänglich sind. Als weitere Entwicklungsstufe könnte man sich ein Expertensystem, das als „Open Source“ Projekt für Beton fungiert, vorstellen, das bereits vorhandene Modelle integriert und welches kontinuierlich ausgebaut wird.

Ausblick ökologische Aspekte

Eine hohe Nachhaltigkeitsverbesserung der Ökobilanz von Beton kann durch den Ersatz von Portlandzement durch Hüttensand, der bei der Stahlproduktion als Sekundärrohstoff anfällt, und andere Bestandteile wie Gesteinsmehle, erreicht werden. Die eigenen Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Verwendung von Kalksteinmehl als Mikrofüller im Bindemittel, höhere Frühfestigkeiten erreicht werden können und so durch den Einsatz von umweltschonenderen Zusatzstoffen die Performance gesteigert werden kann. Diese Möglichkeit sollte auch in Zukunft verstärkt genutzt werden.

Dass man den CO₂ Fingerabdruck von Beton reduzieren will, zeigen auch die Bemühungen der Zementindustrie, die im letzten Jahrzehnt die Primärenergie für die Erzeugung einer Tonne Zement, durch den Einsatz von „alternativen Brennstoffen“ stark reduzieren konnten.

9 Literaturverzeichnis

- Austrian Standards Institute 2005 (2005) *ÖN B 3327-1 Zemente gemäß ÖNORM EN 197-1 für besondere Verwendungen, Teil 1: Zusätzliche Anforderungen*,
- Austrian Standards Institute 2010 (2010a) *ÖN B 3309-1 Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ) Teil 1 : Kombinationsprodukte (GC/GC-HS)*,
- Austrian Standards Institute 2010 (2010b) *ÖN EN 196-8 Prüfverfahren für Zement - Hydratationswärme - Lösungsverfahren*,
- Austrian Standards Institute 2010 (2010c) *ÖN EN 196-9 Prüfverfahren für Zement - Hydratationswärme - Teiladiabatisches Verfahren*,
- Austrian Standards Institute 2010 (2010d) *ONR 23303 Prüfverfahren Beton (PVB) - Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe*, x, Wien.
- Austrian Standards Institute 2011 (2011) *ÖN EN 197-1 Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement*,
- Austrian Standards Institute 2016 (2016) *ÖN EN 196-1 Prüfverfahren für Zement - Bestimmung der Festigkeit*, Wien.
- Austrian Standards Institute 2018 (2018) *ÖN B 4710-1 Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität*, Wien.
- Basalla A. (1963) Wärmeentwicklung im Beton. , 275/304.
- BAW Karlsruhe (2012) *Adiabatische Wärmemessung an ausgesuchten Betonrezepturen*, Bundesanstalt für Wasserbau - Kompetenz für die Wasserstraßen.
- Bayer E. (1997) *Beton-Praxis - ein Leitfaden für die Baustelle*, Beton-Verlag, Düsseldorf.
- Bergmeister K., Fingerloos F., & Wörner J.-D. (2014) *BetonKalender 2014 - Unterirdisches Bauen, Grundbau, Eurocode 7*, Wilhelm Ernst & Sohn - Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- Bergmeister K., Fingerloos F., & Wörner J.-D. (2016) *BetonKalender 2016 - Beton im Hochbau, Silos und Behälter*, Ernst & Sohn, Berlin.
- Bertos M. F., Simons S. J. R., Hills C. D., & Carey P. J. (2004) A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, **112**, 193–205.
- Beton H. (2014) *Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe*. , 1–8.
- Bosold D. & Pickhardt R. (2017) *Zemente und ihre Herstellung - Zement-Merkblatt Betontechnik B1*, [online] <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkblätter/B1.pdf>.
- Briendl L. (2017) Optimierung der Frühfestigkeit von dauerhaftem und ressourceneffizientem Nassspritzbeton.
- CEB-FIP (2010) *federation internationale du béton: Model Code for Concrete Structures*, Ernst & Sohn, Berlin.
- Chemie.de (2019) [online] <https://www.chemie.de/lexikon/Kalorimeter.html#W.C3.A4rmeaustauschkalorimeter> (Zugegriffen 8. September 2019).
- European Energy Exchange (EEX) (2019) [online] www.eex.com (Zugegriffen 7. September 2019).
- Grube H. & Hintzen W. (1993) „Prüfverfahren zur Voraussage der Temperaturerhöhung im

- Beton infolge Hydratationswärme des Zements“ in VDZ - Betontechnischer Bericht., 115–138. [online] <https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Veroeffentlichungeninfachzeitschriften/PDF/9808.pdf>.
- Heinrich P. (2018) Karbonatisierungswiderstand von österreichischen Transportbetonen.
- Hesse C. (2009) Der Reaktionsverlauf der frühen Hydratation von Portlandzement in Relation zur Temperatur.
- Jelenic I., Bezjak A., & Bujan M. (1978) Hydration of B₂O₃-stabilized α' - and β -modifications of dicalcium silicate. , **8**, 173–180.
- John E., Matschei T., & Stephan D. (2018) Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. *Cement and Concrete Research*, **113**(July), 74–85. [online] <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.003>.
- Juhart J., Baldermann C., David A., Fischer G., & Passer A. (2015) Neue Betone für den Infrastrukturbereich, Energie- und Ressourcenoptimiert.
- Juhart J., David G., Ruschi M., Saade M., Baldermann C., Passer A., & Mittermayr F. (2019) Cement and Concrete Research Functional and environmental performance optimization of Portland cement-based materials by combined mineral fillers. *Cement and Concrete Research*, **122**(May), 157–178. [online] <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.001>.
- Küchlin D. & Hersel O. (2017) *Betontechnische Daten*, HeidelbergCement AG, 69181 Leimen. [online] www.heidelbergcement.de.
- Land G. (2017) Optimierung der Herstellung von C-S-H Keimen und deren Anwendung als Beschleuniger der Zementhydratation.
- Lerch W. & Bogue R. H. (1934) Heat of hydration of portland cement pastes. Part of Bureau of Standards Journal of Research, **12**, 26. [online] <https://ia600806.us.archive.org/8/items/heatofhydratio12564lerc/heatofhydratio12564lerc.pdf>.
- Lim M., Han G., Ahn J., & You K. (2010) Environmental Remediation and Conversion of Carbon Dioxide (CO₂) into Useful Green Products by Accelerated Carbonation Technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 203–228. [online] www.mdpi.com/journal/ijerph.
- Locher F. W. (2000) *Zement - Grundlagen der Herstellung und Verwendung*, Verlag Bau und Technik, Düsseldorf.
- Mandry W. (1961) *Über das Kühlen von Beton*, Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg, Stuttgart.
- Österreichische Bautechnik Vereinigung 2008 (2008) *ONR 29196-4 Prüfverfahren für Zement - Quantitative Bestimmung der Bestandteile*,
- Österreichische Bautechnik Vereinigung 2018 (2018) *öbv-Richtlinie: Wasserundurchlässige Betonbauwerke - Weiße Wannen*, Wien.
- Pratt P. L. & Ghose A. (1983) Electron microscope studies of Portland cement microstructures during setting and hardening.
- Prielinger B. (2019) Chloriddiffusionswiderstand von österreichischem Transportbeton.
- Proske T. (2012) Ökobetone zur Herstellung von Betonfertigteilen. , 1–46.
- Richartz W. (1969) Über die Gefüge- und Festigkeitsentwicklung des Zementsteins. *Beton*, **19**(5), 67–83.
- Röck R. & Ostheimer (2012) *Zemente für Betone mit geringer Wärmeentwicklung*, [online]

- http://www.schretter-vils.co.at/fileadmin/Baustofftag/16_Baustofftag/Zemente_fuer_Betone_mit_geringer_Waermeentwicklung_Rudolf_Roeck.pdf.
- Schindler A. K. (2005) Prediction of concrete setting. , (334), 1–14.
- Spengler A. (2006) Technologie sandreicher Betone.
- Taylor H. F. W. (1997) *Cement chemistry*, Thomas Telford Publishing, London.
- Teichmann T. (2007) *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehaltes auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein*, Universität Kassel.
- VDZ (2018) Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2017. [online] <http://www.vdz-online.de>.
- VDZ (Hrsg.) (2002) *Zement Taschenbuch*, Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf. [online] https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Zement-Taschenbuch/Zement-Taschenbuch_2002.pdf (Zugegriffen 18. Jänner 2019).
- Verbeck & Foster (1950) Long-time study of cement in concrete - Chap. 6: The heat of hydration of cements. *Proceedings-American Soc. of Testing and Materials*, **50**.
- Walz K. (1970) Beziehung zwischen Wasserzementwert Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. *VDZ - Betontechnischer Bericht*, **20**(6), 499–503.
- Wilpernig M. (2019) Untersuchung von Betonsorten mit geringer Wärmeentwicklung und ihre Festigkeitsentwicklung.
- Wischers G. & Manns W. (1972) Ursachen für das Entstehen von Rissen in jungem Beton. *VDZ - Betontechnischer Bericht*.
- Woodtli E. (2017) Tübbing Bözbergtunnel - Betontechnologie - Zertifizierung - Logistik. , 56. [online] <https://docplayer.org/55895500-Tuebbing-boezbergtunnel-betontechnologie-zertifizierung-logistik-emil-woodtli-eidg-dipl-bauing-eth-sia-owner-s-engineer-ig-bb-n.html>.
- Young J. F., Berger R. L., & Breese J. (1974) Accelerated Curing of Compacted Calcium Silicate Mortars on Exposure to CO₂ , , 394–397.

A.1 Druck- und Biegezugfestigkeit der untersuchten Mörtelmischungen

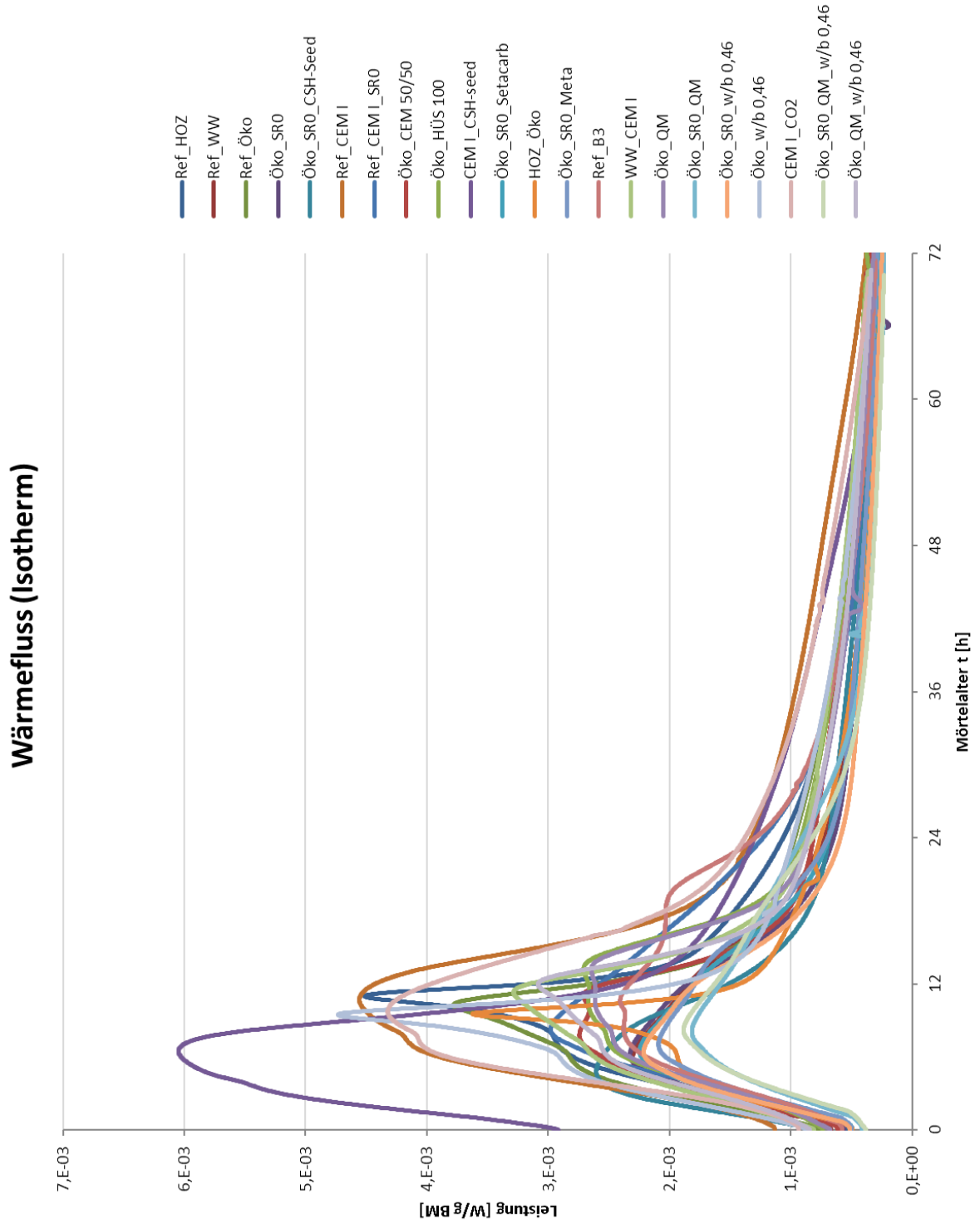
Mörteldruckfestigkeit R_c in [N/mm ²]												
Mörtelalter [d]	REF_HOZ	Ref_WW	Ref_Öko	Öko_SR0	Öko_SR0_CSH-Seed	Ref_CEM I	Ref_CEM I_SR0	Öko_CEM I 50/50	Öko_HÜS 100	CEM I_CSH-Seed	Öko_SR0_KSM Susp.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1	19,2	8,4	15,5	8,8	8,0	31,3	17,6	11,4	13,6	28,6	8,8	
3	42,2	21,3	33,2	20,9	18,9	50,4	35,1	27,0	30,3	43,2	20,0	
7	58,0	30,1	44,7	32,3	29,5	56,5	46,0	39,4	42,9	48,9	29,9	
28	75,7	48,9	62,6	56,5	53,3	62,7	58,4	58,8	61,5	54,9	53,3	
Beiwert s:	0,30	0,43	0,32	0,49	0,52	0,14	0,26	0,39	0,35	0,14	0,49	

Mörtelalter [d]	HOZ_Öko	Öko_SR0_MK	Ref_B3	WW_CEM I	Öko_QM	Öko_SR0_QM	Öko_SR0_0,46	Öko_0,46	CEM I_CO2	Öko_SR0_QM_0,46	Öko_QM_0,46
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	9,2	8,8	16,1	13,0	13,8	8,0	10,0	17,9	29,6	9,4	14,3
3	25,4	21,1	34,0	30,3	30,1	19,0	22,5	33,7	47,2	20,6	29,6
7	42,8	29,3	41,0	39,2	39,3	28,6	33,4	45,9	54,5	30,1	40,4
28	60,5	58,5	53,4	55,4	60,8	49,9	61,0	64,7	62,2	53,8	62,0
Beiwert s:	0,41	0,55	0,25	0,32	0,36	0,48	0,50	0,31	0,16	0,48	0,37

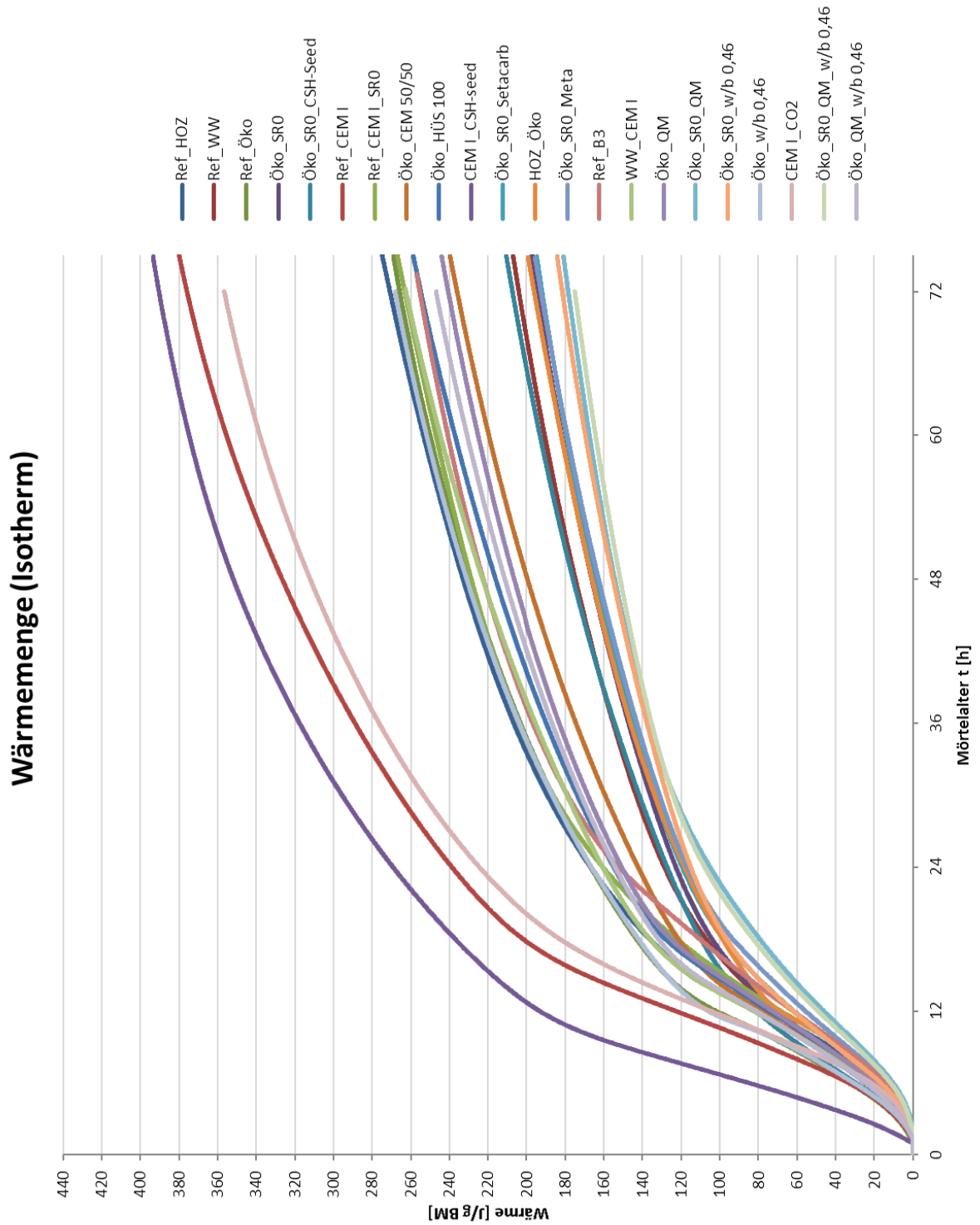
Biegezugfestigkeit R_t in [N/mm ²]												
Mörtelalter [d]	REF_HOZ	Ref_WW	Ref_Öko	Öko_SR0	Öko_SR0_CSH-Seed	Ref_CEM I	Ref_CEM I_SR0	Öko_CEM I 50/50	Öko_HÜS 100	CEM I_CSH-Seed	Öko_SR0_KSM Susp.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1	4,2	2,1	3,4	2,3	2,0	5,9	3,9	2,9	3,1	5,2	2,3	
3	6,3	4,4	5,0	4,1	3,3	7,2	5,4	4,4	5,4	6,4	4,1	
7	8,2	5,1	6,8	5,6	5,0	7,3	6,7	6,3	6,6	6,4	5,4	
28	8,9	7,1	8,6	7,9	8,1	8,1	7,9	8,2	7,5	7,6	6,8	

Mörtelalter [d]	HOZ_Öko	Öko_SR0_MK	Ref_B3	WW_CEM I	Öko_QM	Öko_SR0_QM	Öko_SR0_0,46	Öko_0,46	CEM I_CO2	Öko_SR0_QM_0,46	Öko_QM_0,46
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	2,3	2,1	3,7	2,6	3,1	2,1	2,6	3,5	5,0	2,3	3,1
3	4,5	4,1	5,7	5,1	5,6	3,9	4,4	5,7	7,1	4,3	4,5
7	6,6	5,6	6,1	6,3	6,2	5,3	5,2	6,6	7,2	5,3	6,5
28	8,5	7,6	7,4	7,6	8,2	7,5	8,1	8,1	7,0	8,1	8,1

A.2 Wärmeflusskurven der untersuchten Mörtelmischungen



A.3 Wärmeentwicklung der untersuchten Mörtelmischungen



A.4 Gesteinskornzusammensetzung

Kornverteilung für die Betonsorten HOZ, Öko, WW und B3

Kornfraktionen	50 % 0-4 Riedmüller 50 % 4-16 Riedmüller											
	Riedmüller 0/4			Riedmüller 4/16			Korngruppe 0/16 Gewichtungsfaktor anhand Fullerparabel 50/50			Fuller GK16, n=0,5		
	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang
Sieböffnung	g	%	%	g	%	%	g	%	%	g	%	%
Einwaage M ₁ [g]	439,6			2716,1								
22,4					0,00	100,00		0,00	100,00			
16				89,4	3,29	96,71		1,65	98,35		0,00	100,00
11,2				610,4	22,47	74,24		11,24	87,12		16,33	83,67
8		0,00	100,00	742,9	27,35	46,88		13,68	73,44		12,96	70,71
4	21,5	4,89	95,11	1160,7	42,73	4,15		23,81	49,63		20,71	50,00
2	74,3	16,90	78,21	64,3	2,37	1,78		9,63	39,99		14,64	35,36
1	38,8	8,83	69,38	2,4	0,09	1,69		4,46	35,54		10,36	25,00
0,5	48,0	10,92	58,46	1,3	0,05	1,65		5,48	30,05		7,32	17,68
0,25	146,0	33,21	25,25	3,4	0,13	1,52		16,67	13,39		5,18	12,50
0,125	71,5	16,26	8,99	3,5	0,13	1,39		8,20	5,19		3,66	8,84
0,063	13,9	3,16	5,82	3,7	0,14	1,26		1,65	3,54		2,56	6,27
0	0,7	0,16	5,66	0,8	0,03	1,23		0,09	3,45			
Auswaage Σ _{RI+P}	414,7	94,34		2682,8	98,77							

Korngrößenverteilung für die Betonsorte Öko_SR0

Kornfraktionen	50 % 0-4 Holler 50 % 4-16 Riedmüller											
	Holler 0/4			Riedmüller 4/16			Korngruppe 0/16 Gewichtungsfaktor anhand Fullerparabel 50/50			Fuller GK16, n=0,5		
	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang	Rückstand		Durchgang
Sieböffnung	g	%	%	g	%	%	g	%	%	g	%	%
Einwaage M ₁ [g]	540,2			2716,1								
22,4					0,00	100,00		0,00	100,00			
16				89,4	3,29	96,71		1,65	98,35		0,00	100,00
11,2				610,4	22,47	74,24		11,24	87,12		16,33	83,67
8		0,00	100,00	742,9	27,35	46,88		13,68	73,44		12,96	70,71
4	23,9	4,42	95,58	1160,7	42,73	4,15		23,58	49,86		20,71	50,00
2	116,3	21,53	74,05	64,3	2,37	1,78		11,95	37,91		14,64	35,36
1	126,0	23,32	50,72	2,4	0,09	1,69		11,71	26,21		10,36	25,00
0,5	134,7	24,94	25,79	1,3	0,05	1,65		12,49	13,72		7,32	17,68
0,25	88,0	16,29	9,50	3,4	0,13	1,52		8,21	5,51		5,18	12,50
0,125	31,9	5,91	3,59	3,5	0,13	1,39		3,02	2,49		3,66	8,84
0,063	9,4	1,74	1,85	3,7	0,14	1,26		0,94	1,55		2,56	6,27
0	0,2	0,04	1,81	0,8	0,03	1,23		0,03	1,52			
Auswaage Σ _{RI+P}	530,4	98,19		2682,8	98,77							

A.5 Beton Protokoll Druckfestigkeitsprüfungen

Öko- und HOZ-Beton:

Mischung B1 - "Öko-Beton": Wasserrzugabe 13:43 Uhr															
Herstelldatum	Prüfdatum	Prüfalter [h/d]	Uhrzeit	Probekörper Nr.	a Fläche1 [mm]	b Fläche1 [mm]	h [mm]	a Fläche 2 [mm]	b Fläche 2 [mm]	Druckfläche [mm]	Höchstkraft [kN]	Druckfestigkeit t [N/mm ²]	Masse [g]	Volumen [cm ³]	Rohdichte [g/cm ³]
15.01.2019	16.01.2019	1	13:58	D1	148,2	149,8	150,0	149,2	149,8	22275,3	222,8	10,00	7753,3	3341,3	2,320
15.01.2019	16.01.2019	1	14:00	D2	150,9	150,4	149,9	150,6	149,6	22612,6	232,9	10,30	7855,2	3389,6	2,312
		Mittelwert													2,316
15.01.2019	18.01.2019	3	13:58	D3	149,5	149,6	149,5	149,7	149,5	22372,7			7757,6	3344,7	2,319
15.01.2019	18.01.2019	3	14:00	D4	149,9	148,5	149,9	149,9	148,7	22275,1	606,7	27,24	7784,5	3339,0	2,331
		Mittelwert								0,0					2,325
15.01.2019	22.01.2019	7	13:54	D5	148,9	149,6	149,7	147,1	149,5	22133,4	827,9	37,40	7712,5	3313,4	2,328
15.01.2019	22.01.2019	7	14:01	D6	149,5	149,5	149,7	148,8	149,5	22297,9	831,9	37,31	7797,1	3338,0	2,336
		Mittelwert								0,0					2,332
15.01.2019	12.02.2019	28	14:22	D7	148,3	149,4	149,4	148,5	149,4	22171,0	1160,0	52,32	7774,3	3312,3	2,347
15.01.2019	12.02.2019	28	15:00	D8	148,7	148,4	149,3	149,2	149,4	22253,1	1160,0	52,13	7806,0	3322,4	2,350
		Mittelwert								0,0					2,348
15.01.2019	12.03.2019	56	16:35	D9	146,7	149,4	149,6	150,9	149,7	22253,4	1270,0	57,07	7819,0	3329,1	2,349
15.01.2019	12.03.2019	56	16:42	D10	147,0	149,5	149,6	149,4	149,5	22155,9	1240,0	55,97	7742,5	3314,5	2,336
		Mittelwert								0,0					2,342
Mischung A1 - "HOZ-Beton": Wasserrzugabe 11:53 Uhr															
Herstelldatum	Prüfdatum	Prüfalter [h/d]	Uhrzeit	Probekörper Nr.	a Fläche1 [mm]	b Fläche1 [mm]	h [mm]	a Fläche 2 [mm]	b Fläche 2 [mm]	Druckfläche [mm]	Höchstkraft [kN]	Druckfestigkeit t [N/mm ²]	Masse [g]	Volumen [cm ³]	Rohdichte [g/cm ³]
21.01.2019	22.01.2019	1	13:47	D1	147,3	149,4	150,0	149,0	149,5	22141,1	359,7	16,25	7746,1	3321,2	2,332
21.01.2019	22.01.2019	1	13:50	D2	147,6	149,5	149,5	147,9	149,4	22081,2	358,6	16,24	7689,1	3301,1	2,323
		Mittelwert													2,328
21.01.2019	24.01.2019	3	12:34	D3	148,7	149,3	149,6	148,3	149,5	22185,9	821,8	37,04	7822,5	3319,0	2,357
21.01.2019	24.01.2019	3	12:44	D4	147,9	148,2	149,5	148,7	149,3	22133,8	760,6	34,36	7705,0	3309,0	2,328
		Mittelwert								0,0					2,343
21.01.2019	28.01.2019	7	11:58	D5	148,5	149,5	149,6	148,6	149,6	22215,7	1220,0	54,92	7861,0	3323,5	2,365
21.01.2019	28.01.2019	7	12:03	D6	149,1	149,6	149,5	149,8	149,6	22357,7	1160,0	51,88	7816,6	3342,5	2,339
		Mittelwert								0,0					2,352
21.01.2019	18.02.2019	28	12:06	D7	148,6	149,8	149,6	149,3	149,5	22215,6	1390,0	62,57	7769,2	3323,4	2,338
21.01.2019	18.02.2019	28	12:20	D8	149,2	149,3	149,5	147,9	149,4	22185,9	1490,0	67,16	7832,9	3316,8	2,362
		Mittelwert								0,0					2,350
21.01.2019	18.03.2019	56	13:34	D9	149,8	149,3	149,4	149,3	149,4	22335,3	1530,0	68,50	7906,5	3336,9	2,369
21.01.2019	18.03.2019	56	13:40	D10	148,1	148,3	149,3	148,5	149,4	22148,6	1580,0	71,34	7836,2	3306,8	2,370
		Mittelwert								0,0					2,370

WW- und B3-Beton:

Mischung C1 - "WW-Beton": Wasserzugabe 15:13 Uhr															
Herstelldatum	Prüfdatum	Prüfalter [t:d]	Uhrzeit	Probekörper Nr.	a Fläche1 [mm]	b Fläche1 [mm]	h [mm]	a Fläche 2 [mm]	b Fläche 2 [mm]	Druckfläche [mm]	Höchstkraft [kN]	Druckfestigkeit t [N/mm²]	Masse [g]	Volumen [cm³]	Rohdichte [g/cm³]
05.02.2019	06.02.2019	1	15:42	D1	149,7	149,6	149,4	150,1	149,4	22410,0	122,4	5,46	7786,2	3348,1	2,326
05.02.2019	06.02.2019	1	15:49	D2	149,4	149,7	149,8	149,4	149,7	22365,2	124,6	5,57	7968,9	3350,3	2,379
		Mittelwert									123,5	5,5			2,352
05.02.2019	08.02.2019	3	15:20	D3	149,3	149,3	149,6	150,2	149,3	22357,7	362,6	16,22	7832,7	3344,7	2,342
05.02.2019	08.02.2019	3	15:25	D4	149,5	149,7	149,8	150,6	149,8	22470,0	400,0	17,80	8046,9	3366,0	2,391
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	12.02.2019	7	10:33	D5	149,4	149,5	149,4	149,5	149,5	22342,8	559,0	25,02	7897,7	3338,0	2,366
05.02.2019	12.02.2019	7	10:35	D6	150,1	149,8	149,8	149,4	149,9	22440,0	601,0	26,78	7989,0	3361,5	2,377
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	05.03.2019	28	14:49	D7	150,2	149,4	149,4	148,6	149,3	22312,9	993,3	44,34	7883,8	3333,6	2,365
05.02.2019	05.03.2019	28	14:57	D8	149,7	149,9	149,7	149,6	149,7	22417,6	1130,0	50,41	8018,2	3355,9	2,389
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	02.04.2019	56	15:02	D9	151,3	149,2	149,4	149,8	149,3	22469,6	1130,0	50,29	7941,2	3357,0	2,366
05.02.2019	02.04.2019	56	15:07	D10	150,5	150,5	150,6	149,8	150,5	22587,6	1220,0	53,99	8007,7	3403,2	2,353
		Mittelwert								0,0					
		Mittelwert									1175,0	52,1			2,359
Mischung D1 - "B3-Beton": Wasserzugabe 10:25 Uhr															
Herstelldatum	Prüfdatum	Prüfalter [t:d]	Uhrzeit	Probekörper Nr.	a Fläche1 [mm]	b Fläche1 [mm]	h [mm]	a Fläche 2 [mm]	b Fläche 2 [mm]	Druckfläche [mm]	Höchstkraft [kN]	Druckfestigkeit t [N/mm²]	Masse [g]	Volumen [cm³]	Rohdichte [g/cm³]
05.02.2019	06.02.2019	1	10:46	D1	148,2	149,6	149,4	148,1	149,6	22163,2	322,4	14,55	7759,0	3311,2	2,343
05.02.2019	06.02.2019	1	10:52	D2	151,0	150,4	150,2	149,9	150,4	22627,7	274,4	12,13	7861,9	3398,7	2,313
		Mittelwert									298,4	13,3			2,328
05.02.2019	08.02.2019	3	10:24	D3	149,1	149,5	149,4	149,8	149,3	22327,8	666,9	29,87	7639,5	3335,8	2,360
05.02.2019	08.02.2019	3	10:28	D4	150,3	150,5	150,5	149,8	150,5	22582,5	666,5	29,51	7875,7	3396,7	2,317
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	12.02.2019	7	14:01	D5	147,8	149,4	149,6	147,6	149,5	22073,8	790,1	35,79	7685,6	3302,2	2,327
05.02.2019	12.02.2019	7	14:06	D6	150,0	150,5	150,2	150,0	150,5	22575,0	896,1	39,69	7905,7	3390,8	2,332
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	05.03.2019	28	11:39	D7	150,0	149,5	149,5	149,2	149,4	22357,7	994,0	44,46	7818,3	3342,5	2,389
05.02.2019	05.03.2019	28	11:53	D8	149,6	149,9	150,5	148,8	149,8	22357,6	1040,0	46,52	7832,3	3364,8	2,328
		Mittelwert								0,0					
05.02.2019	02.04.2019	56	14:50	D9	149,2	149,5	149,5	149,7	149,4	22335,3	1050,0	47,01	7785,2	3339,1	2,332
05.02.2019	02.04.2019	56	14:55	D10	148,7	150,6	149,9	148,9	150,6	22484,6	1210,0	53,81	7878,7	3370,4	2,388
		Mittelwert								0,0					
		Mittelwert									1130,0	50,4			2,335

Öko_SR0-Beton:

Mischung E1 - "Öko_C3A-frei"-Beton: Wasserrzugabe 12:46 Uhr															
Herstellungsdatum	Prüfdatum	Prüfalter [h/d]	Uhrzeit	Probekörper Nr.	a Fläche1 [mm]	b Fläche1 [mm]	h [mm]	a Fläche 2 [mm]	b Fläche 2 [mm]	Druckfläche [mm]	Höchstkraft [kN]	Druckfestigkeit t [N/mm²]	Masse [g]	Volumen [cm³]	Rohdichte [g/cm³]
21.05.2019	22.05.2019	1	13:22	D1	148,3	149,3	149,4	147,9	149,4	22118,7	136,9	6,19	7722,1	3304,5	2,337
21.05.2019	22.05.2019	1	13:29	D2	149,3	150,3	150,0	148,5	150,4	22387,1	122,9	5,49	7733,6	3358,1	2,303
		Mittelwert													
21.05.2019	24.05.2019	3	12:24	D3	149,9	148,6	150,5	149,9	149,5	22342,6	315,2	14,11	7744,2	3362,6	2,303
21.05.2019	24.05.2019	3	12:31	D4	149,5	148,8	149,5	149,5	148,5	22223,2	294,1	13,23	7683,7	3322,4	2,313
21.05.2019	24.05.2019	3	13:11	D9	149,8	149,2	150,5	149,9	146,9	22185,2	308,3	13,90	7710,0	3338,9	2,309
		Mittelwert									305,9	13,7			2,308
21.05.2019	28.05.2019	7	11:35	D5	150,4	150,5	150,5	150,4	150,4	22635,2	507,0	22,40	7739,7	3407,5	2,271
21.05.2019	28.05.2019	7		D6	149,6	149,7	149,7	149,9	149,4	22397,3	473,0	21,12	7571,1	3353,1	2,258
										0,0					
		Mittelwert									490,0	21,8			2,265
21.05.2019	18.06.2019	28	16:15	D7	149,8	147,1	150,4	149,9	148,8	22170,4	997,4	44,99	7689,5	3334,4	2,306
21.05.2019	18.06.2019	28	16:19	D8	149,5	149,3	149,6	149,5	148,6	22268,0	1010,0	45,36	7793,2	3331,3	2,339
										0,0					
		Mittelwert									1003,7	45,2			2,323
21.05.2019	16.07.2019	56	16:03	D10	149,3	148,8	149,5	149,4	148,6	22208,3	1154,0	51,96	7841,9	3320,1	2,362
		Mittelwert								0,0					
											1154,0	52,0			2,362

A.6 Beton Protokoll Temperaturmessungen

Auswertung (stundenweise) ab 70 Minuten nach Wasserzugabe:					
	Öko	HOZ	B3	WW	Öko SR0
Tmax:	43,60	48,75	44,10	34,15	33,95
Tmin:	18,15	20,65	19,05	19,65	20,90
ΔT:	25,45	28,10	25,05	14,50	13,05
Zeit nach Wasserzugabe:					
[h]	70 min.	73 min.	74 min.	66 min.	76 min.
0	18,15	20,65	19,05	19,75	20,90
1	18,25	20,80	19,25	19,85	21,00
2	18,55	21,10	19,40	20,00	21,10
3	18,90	21,45	19,70	20,15	21,30
4	19,40	22,35	20,00	20,55	21,45
5	20,00	23,45	20,55	21,00	21,75
6	20,75	25,25	21,05	21,70	22,35
7	21,75	27,55	22,00	22,55	23,05
8	23,00	33,00	23,35	23,65	24,00
9	24,40	35,20	25,00	24,95	25,10
10	26,10	37,05	27,00	26,35	26,30
11	28,35	38,80	29,55	27,80	27,60
12	31,75	40,30	33,45	29,10	28,80
13	33,90	41,65	36,30	30,05	30,00
14	35,30	42,85	38,00	30,75	30,80
15	36,45	43,95	39,40	31,30	31,50
16	37,55	44,90	40,55	31,70	31,80
17	38,50	45,70	41,50	32,00	32,25
18	39,50	46,40	42,25	32,30	32,50
19	40,25	47,05	42,95	32,60	32,70
20	41,00	47,65	43,40	32,75	32,90
21	41,65	48,05	43,75	32,90	33,00
22	42,20	48,45	43,95	33,20	33,20
23	42,65	48,55	44,10	33,30	33,30
24	43,00	48,75	44,10	33,50	33,50
25	43,25	48,70	44,05	33,70	33,60
26	43,45	48,55	43,95	33,75	33,70
27	43,50	48,40	43,80	33,90	33,80
28	43,55	48,15	43,65	34,00	33,80
29	43,60	47,85	43,40	34,05	33,85
30	43,55	47,55	43,15	34,05	33,85
31	43,45	47,20	42,90	34,05	33,90
32	43,35	46,80	42,55	34,10	33,95
33	43,20	46,40	42,25	34,15	33,90
34	43,05	46,00	41,95	34,05	33,90
35	42,90	45,60	41,70	34,05	33,90
36	42,70	45,10	41,25	33,95	33,75
37	42,50	44,60	41,00	33,95	33,75
38	42,30	44,20	40,60	33,90	33,75
39	42,10	43,75	40,30	33,85	33,65
40	41,80	43,30	39,95	33,70	33,55
41	41,60	42,80	39,60	33,65	33,50

Auswertung (stundenweise) ab 70 Minuten nach Wasserzugabe:					
	Öko	HOZ	B3	WW	Öko SR0
Tmax:	43,60	48,75	44,10	34,15	33,95
Tmin:	18,15	20,65	19,05	19,65	20,90
ΔT:	25,45	28,10	25,05	14,50	13,05
Zeit nach Wasserzugabe:					
[h]	70 min.	73 min.	74 min.	66 min.	76 min.
42	41,30	42,40	39,25	33,45	33,40
43	41,05	41,95	38,95	33,45	33,25
44	40,75	41,50	38,55	33,30	33,15
45	40,50	41,10	38,25	33,10	33,10
46	40,25	40,70	37,95	33,05	32,95
47	40,00	40,30	37,65	32,90	32,85
48	39,65	39,90	37,35	32,80	32,80
49	39,35	39,50	36,95	32,60	32,60
50	39,15	39,15	36,65	32,45	32,45
51	38,85	38,75	36,35	32,30	32,40
52	38,55	38,35	36,05	32,25	32,25
53	38,25	37,95	35,70	32,00	32,05
54	38,00	37,65	35,45	31,85	31,95
55	37,75	37,25	35,05	31,75	31,80
56	37,45	36,85	34,75	31,60	31,70
57	37,15	36,50	34,50	31,40	31,50
58	36,85	36,20	34,25	31,20	31,40
59	36,65	35,90	33,85	31,15	31,20
60	36,35	35,55	33,65	30,95	31,05
61	36,10	35,25	33,35	30,85	30,95
62	35,80	34,90	33,05	30,60	30,80
63	35,50	34,60	32,80	30,55	30,60
64	35,30	34,30	32,55	30,35	30,45
65	35,00	33,95	32,30	30,25	30,30
66	34,70	33,70	32,05	30,05	30,20
67	34,55	33,40	31,75	29,95	30,05
68	34,30	33,10	31,55	29,75	29,90
69	34,00	32,80	31,30	29,60	29,75
70	33,80	32,55	31,05	29,45	29,65
71	33,60	32,25	30,85	29,30	29,50
72	33,40	32,00	30,55	29,15	29,35
73	33,20	31,70	30,35	29,05	29,20
74	33,00	31,45	30,15	28,85	29,10
75	32,75	31,15	29,85	28,75	28,90
76	32,50	30,90	29,80	28,60	28,75
77	32,30	30,70	29,55	28,50	28,70
78	32,10	30,45	29,35	28,25	28,50
79	31,95	30,20	29,15	28,25	28,35
80	31,75	30,00	28,95	28,10	28,25
81	31,55	29,75	28,75	28,00	28,15
82	31,35	29,50	28,55	27,85	27,95
83	31,15	29,35	28,35	27,75	27,85

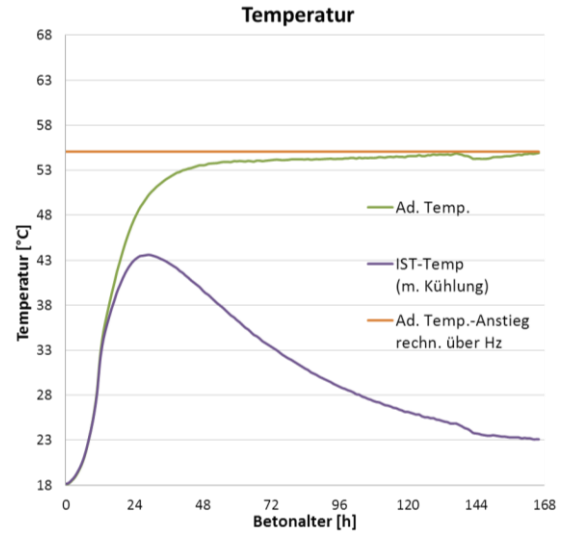
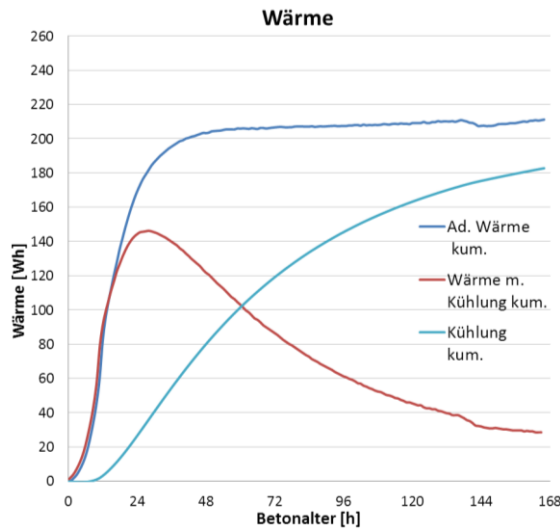
Auswertung (stundenweise) ab 70 Minuten nach Wasserzugabe:					
	Öko	HOZ	B3	WW	Öko SR0
Tmax:	43,60	48,75	44,10	34,15	33,95
Tmin:	18,15	20,65	19,05	19,65	20,90
ΔT:	25,45	28,10	25,05	14,50	13,05
Zeit nach Wasserzugabe:					
[h]	70 min.	73 min.	74 min.	66 min.	76 min.
84	30,95	29,15	28,15	27,55	27,70
85	30,80	28,95	28,00	27,45	27,55
86	30,55	28,75	27,85	27,35	27,45
87	30,40	28,50	27,70	27,25	27,35
88	30,25	28,35	27,45	27,15	27,25
89	30,05	28,15	27,35	27,05	27,15
90	29,90	27,95	27,15	26,85	26,95
91	29,75	27,75	27,05	26,80	26,85
92	29,60	27,60	26,90	26,70	26,70
93	29,45	27,45	26,75	26,60	26,60
94	29,25	27,25	26,55	26,45	26,50
95	29,10	27,15	26,50	26,40	26,40
96	28,95	26,95	26,35	26,25	26,25
97	28,80	26,85	26,25	26,15	26,20
98	28,70	26,65	26,10	26,05	26,15
99	28,55	26,55	25,95	26,00	26,00
100	28,45	26,45	25,80	25,90	25,90
101	28,30	26,25	25,75	25,75	25,85
102	28,10	26,15	25,55	25,70	25,70
103	28,05	26,00	25,45	25,65	25,60
104	27,85	25,85	25,35	25,55	25,50
105	27,75	25,75	25,25	25,40	25,45
106	27,60	25,60	25,15	25,35	25,35
107	27,50	25,45	25,05	25,25	25,25
108	27,35	25,35	25,00	25,20	25,15
109	27,25	25,25	24,85	25,05	25,10
110	27,20	25,15	24,75	24,95	24,95
111	27,05	25,00	24,65	24,90	24,90
112	26,90	24,90	24,55	24,85	24,80
113	26,85	24,80	24,45	24,75	24,75
114	26,75	24,75	24,45	24,75	24,65
115	26,60	24,55	24,25	24,60	24,60
116	26,55	24,55	24,20	24,55	24,50
117	26,40	24,45	24,15	24,45	24,40
118	26,30	24,30	24,05	24,40	24,35
119	26,15	24,25	23,95	24,40	24,25
120	26,15	24,15	23,90	24,30	24,25
121	26,05	24,10	23,80	24,20	24,10
122	25,95	24,00	23,75	24,15	24,05
123	25,85	23,90	23,65	24,10	24,05
124	25,85	23,85	23,60	24,05	23,95
125	25,65	23,70	23,55	24,00	23,90

Auswertung (stundenweise) ab 70 Minuten nach Wasserzugabe:					
	Öko	HOZ	B3	WW	Öko SR0
Tmax:	43,60	48,75	44,10	34,15	33,95
Tmin:	18,15	20,65	19,05	19,65	20,90
ΔT:	25,45	28,10	25,05	14,50	13,05
Zeit nach Wasserzugabe:					
[h]	70 min.	73 min.	74 min.	66 min.	76 min.
126	25,55	23,65	23,50	23,90	23,85
127	25,55	23,60	23,40	23,85	23,75
128	25,45	23,55	23,35	23,80	23,70
129	25,45	23,50	23,25	23,75	23,65
130	25,30	23,40	23,25	23,70	23,60
131	25,25	23,30	23,15	23,70	23,55
132	25,15	23,30	23,15	23,55	23,45
133	25,05	23,20	23,05	23,50	23,45
134	25,00	23,10	23,00	23,50	23,35
135	24,85	23,10	22,95	23,45	23,35
136	24,85	23,00	22,90	23,40	23,25
137	24,85	22,90	22,85	23,35	23,15
138	24,70	22,95	22,85	23,30	23,20
139	24,55	22,85	22,75	23,30	23,15
140	24,35	22,80	22,65	23,20	23,10
141	24,25	22,70	22,65	23,20	23,00
142	24,05	22,70	22,60	23,10	23,05
143	23,80	22,60	22,55	23,10	23,00
144	23,75	22,60	22,55	23,05	22,95
145	23,70	22,60	22,55	22,95	22,90
146	23,60	22,50	22,45	22,90	22,90
147	23,55	22,50	22,45	22,90	22,85
148	23,50	22,40	22,35	22,90	22,80
149	23,50	22,40	22,35	22,85	22,75
150	23,55	22,30	22,35	22,80	22,75
151	23,50	22,30	22,25	22,80	22,85
152	23,45	22,30	22,25	22,75	22,80
153	23,40	22,20	22,25	22,70	22,85
154	23,40	22,20	22,20	22,70	22,90
155	23,35	22,10	22,15	22,65	22,85
156	23,30	22,10	22,15	22,60	22,90
157	23,30	22,00	22,05	22,60	23,00
158	23,30	22,00	22,05	22,60	23,00
159	23,30	22,00	22,00	22,50	23,00
160	23,20	21,90	22,00	22,50	23,10
161	23,25	21,90	21,95	22,50	23,10
162	23,20	21,90	21,95	22,50	23,20
163	23,20	21,90	21,95	22,40	23,15
164	23,10	21,90	21,85	22,30	23,15
165	23,10	21,80	21,85	22,30	23,20
166	23,10	21,80	21,80	22,30	23,30

A.7 Beton Temperatur- und Wärmeverhältnisse (modellhaft)

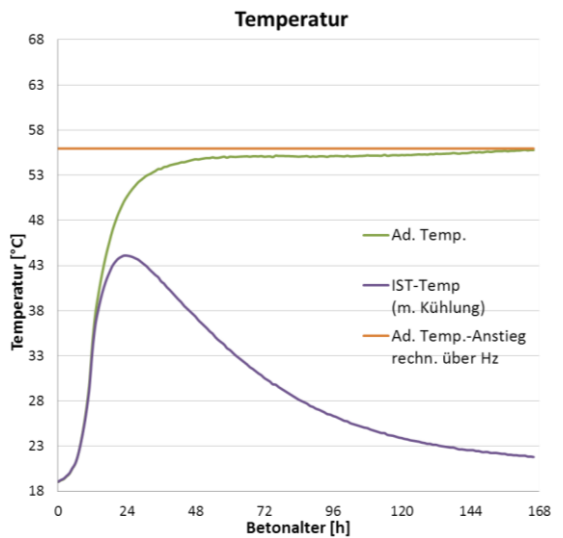
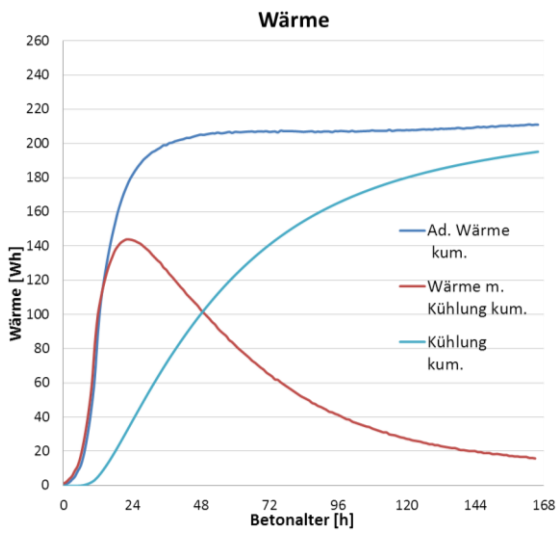
Öko – Beton

$H_{z7} \approx 300 \text{ J/g}$

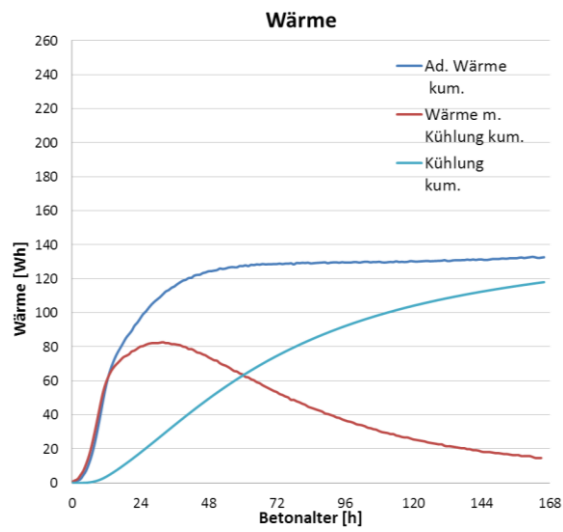


B3 - Beton

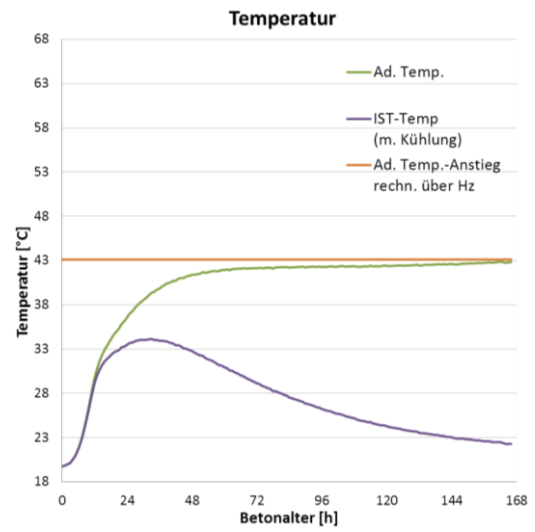
$H_{z7} \approx 300 \text{ J/g}$



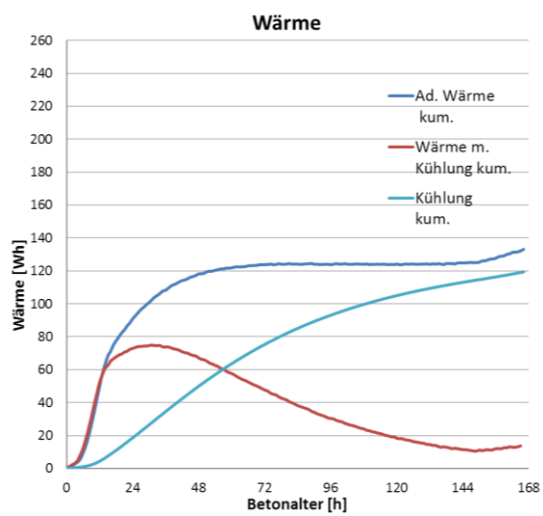
WW - Beton



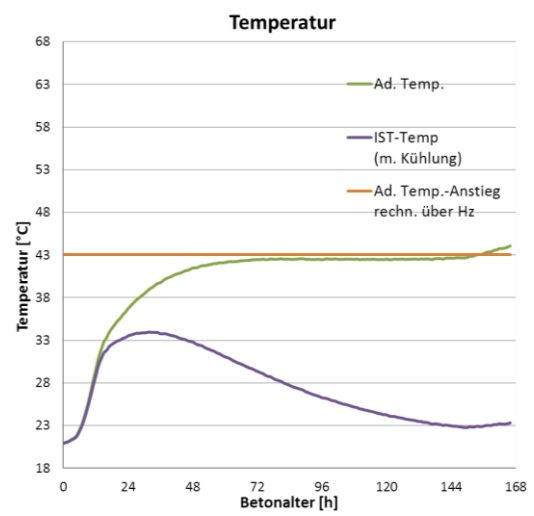
Hz₇ ≈ 190 J/g



Öko_SR0 - Beton



Hz₇ ≈ 175 J/g



A.8 Beton Stoffraumrechnungen

„WW-Beton“:

MISCHUNGSBERECHNUNG										
Betonsorte: "WW-Beton" C 25/30 (56) BS1 A PLUS GK16 F52										
W/B_a-Wert: 0,60 - 0,02 = 0,58 (Vorhaltemaß 0,02)										
						[kg/m³]				
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖN B 4710-1, NAD 10:						300,0				
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖBV Richtlinie - Weiße Wannen:						260,0				
anrechenbarer Bindemittelgehalt aus W/B (über k-Wert):						293,1	W/B _a =	0,58		
Gesamtbindemittelgehalt B _G :						318,6	W/B _G =	0,53		
							W/B _{PZ} =	0,89		
1. Stoffbedarf: 1 m³ verd. Beton				Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm³]	Stoffraum [l]				
Wasser				170,0	1,00	170,00				
CEM I 42,5 R - SR0 WT27 C ₃ A-frei				191,2	3,17	60,30				
AHWZ - Kombiprodukt "Supermix C"				127,4	2,75	46,34				
Luftporen						25,00				
Gesteinskörnung, trocken				1920,5		698,36				
Frischbetonrohddichte				2409,1	2,409	1000				
Mischungsverhältnis										
Zement/Bindemittel				Gesteinskörnung			Wasser/Bindemittel			
0,60										
2. Bestandteile für					1000 l = 1 m³				50 Liter je Mische	
Gesteinskörnung					Masse tr. [kg]	Wassergeh. d. Körn.		Masse feucht [kg]	Masse tr. je Mische [kg]	
Binde- mittel	Körnung [mm]	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm³]		[%]	[l]			
CEM I					191,2			191,2	9,56	
	0/4	50	349,2	2,73	953,3	3	28,6	981,9	47,66	
	4/16	50	349,2	2,77	967,2	1	9,7	976,9	48,36	
Summe		100	698,4		1920,5		38,3	1958,8	105,58	
Wasserzugabe je m³:		170	-		38,3	=	131,7		6,59	
Zusatzmittel:FM.....										
..... (..... ‰ der Masse des Zementes/Bindemittels)				 kg/m³		je Mische			

„Öko-Beton“:

MISCHUNGSBERECHNUNG									
Betonsorte: "Öko-Beton" C25/30 (56) XW2/XF3/XAT-B/XAL-B/XC2/XD2 GK16 F52									
W/P-Wert =		0,534							
							[kg/m ³]		
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖN B 4710-1, NAD 10:							300,0		
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖBV Richtlinie - Weiße Wannen:							260,0		
anrechenbarer Bindemittelgehalt Ba (informativ):							274,0		
Gesamtbindemittelgehalt B _G :							318,6		
							W/Ba = 0,62		
							W/B _G = 0,53		
							W/B _{PZ} = 0,89		
1. Stoffbedarf: 1 m³ verd. Beton				Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]			
Wasser				170,0	1,00	170,00			
CEM I 52,5 R				191,2	3,13	61,07			
AHWZ - HÜS 4000 Bernegger				103,5	2,80	36,98			
KSM (fein) - Omyacarb Extra GU				23,9	2,30	10,39			
Luftporen						25,00			
Gesteinskörnung, trocken				1915,5		696,56			
Frischbetonrohddichte				2404,1	2,404	1000			
Mischungsverhältnis									
Zement/Bindemittel				Gesteinskörnung		Wasser/Bindemittel			
0,60									
2. Bestandteile für					1000 l = 1 m³			50 Liter je Mische	
Gesteinskörnung					Masse tr. [kg]	Wassergeh. d. Körn.		Masse feucht [kg]	Masse tr. je Mische [kg]
Bindemittel	Körnung [mm]	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]		[%]	[l]		
CEM I					191,2				9,56
AHWZ					103,5				5,18
KSM					23,9				1,19
	0/4	50	348,3	2,73	950,8	3	28,5	979,3	47,54
	4/16	50	348,3	2,77	964,7	1	9,6	974,4	48,24
Summe		100	696,6		1915,5		38,2	1953,7	111,71
Wasserzugabe je m ³ :			170	-	38,2	=	131,8		6,59
Zusatzmittel:FM.....									
..... (..... ‰ der Masse des Zementes/Bindemittels)				 kg/m ³			je Mische	

„HOZ-Beton“:

MISCHUNGSBERECHNUNG									
Betonsorte: "HOZ-Beton" C25/30 (56) XW2/XF3/XAT-B/XAL-B/XC2/XD2 GK16 F52									
W/B _G -Wert =		0,534							
						[kg/m ³]			
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖN B 4710-1, NAD 10:						300,0			
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖBV Richtlinie - Weiße Wannen:						260,0			
anrechenbarer Bindemittelgehalt Ba (informativ):						W/Ba = 0,53			
Gesamtbindemittelgehalt B _G :						318,6 W/B _G = 0,53			
1. Stoffbedarf: 1 m³ verd. Beton									
Masse [kg]		Rohdichte [kg/dm ³]		Stoffraum [l]					
Wasser		170,0		1,00 170,00					
CEM III/A 52,5 R		318,6		3,00 106,20					
Luftporen				25,00					
Gesteinskörnung, trocken		1921,7		698,80					
Frischbetonrohddichte		2410,3		2,410 1000,00					
Mischungsverhältnis									
Zement/Bindemittel		Gesteinskörnung		Wasser/Bindemittel					
1,00									
2. Bestandteile für				1000 l = 1 m³			50 Liter je Mische		
Gesteinskörnung					Masse tr. [kg]	Wassergeh. d. Körn.		Masse feucht [kg]	Masse tr. je Mische [kg]
Binde-mittel	Körnung [mm]	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]		[%]	[kg]		
CEM III					318,6				15,93
	0/4	50	349,4	2,73	953,9	3	28,6	982,5	47,69
	4/16	50	349,4	2,77	967,8	1	9,7	977,5	48,39
Summe		100	698,8		1921,7		38,3	1960,0	112,02
Wasserzugabe je m ³ :		170	-		38,3	=	131,7		6,59
Zusatzmittel:FM.....									
..... (..... ‰ der Masse des Zementes/Bindemittels) kg/m ³ je Mische									

„B3-Beton“:

MISCHUNGSBERECHNUNG									
Betonart: "B3 Normbeton" C25/30 (56) B3 GK16 F52									
W/B _G -Wert =		0,534							
						[kg/m ³]			
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖN B 4710-1, NAD 10:						300,0			
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖBV Richtlinie - Weiße Wannen:						260,0			
anrechenbarer Bindemittelgehalt Ba (informativ):						W/Ba = 0,53			
Gesamtbindemittelgehalt B _G :						318,6 W/B _G = 0,53			
1. Stoffbedarf: 1 m³ verd. Beton									
	Masse [kg]		Rohdichte [kg/dm ³]		Stoffraum [l]				
Wasser	170,0		1,00		170,00				
CEM II/A-M 42,5 N	318,6		3,03		105,15				
Luftporen					25,00				
Gesteinskörnung, trocken	1924,6				699,85				
Frischbetonrohddichte	2413,2		2,413		1000,00				
Mischungsverhältnis									
Zement/Bindemittel		Gesteinskörnung		Wasser/Bindemittel					
1,00									
2. Bestandteile für				1000 l = 1 m³			50 Liter je Mische		
	Gesteinskörnung				Masse tr. [kg]	Wassergeh. d. Körn.		Masse feucht [kg]	Masse tr. je Mische [kg]
Binde-mittel	Körnung [mm]	Anteil [%]	Stoffraum [l]	Rohdichte [kg/dm ³]		[%]	[kg]		
CEM II					318,6				15,93
	0/4	50	349,9	2,73	955,3	3	28,7	984,0	47,76
	4/16	50	349,9	2,77	969,3	1	9,7	979,0	48,46
Summe		100	699,9		1924,6		38,4	1962,9	112,16
Wasserzugabe je m ³ :		170	-		38,4	=	131,6		6,58
Zusatzmittel:FM.....									
..... (..... ‰ der Masse des Zementes/Bindemittels) kg/m ³ je Mische									

„Öko_SR0-Beton“:

MISCHUNGSBERECHNUNG									
Betonsorte: "Öko_SR0" C25/30 (56) XW2/XF3/XAT-B/XAL-B/XC2/XD2 GK16 F52									
W/B _G -Wert =		0,534							
		[kg/m ³]							
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖN B 4710-1, NAD 10:		300,0							
Mindestbindemittelgehalt lt. ÖBV Richtlinie - Weiße Wannen:		260,0							
anrechenbarer Bindemittelgehalt Ba (informativ):		274,0							
Gesamtbindemittelgehalt B _G :		318,6							
		W/Ba = 0,62							
		W/B _G = 0,53							
		W/B _{PZ} = 0,89							
1. Stoffbedarf: 1 m³ verd. Beton									
	Masse [kg]	Rohdichte [kg/dm ³]	Stoffraum [l]						
Wasser	170,0	1,00	170,00						
CEM I 42,5 R - SR0 WT27 C3A-frei	191,2	3,17	60,30						
AHWZ - HÜS 4000 Bernegger	103,5	2,80	36,98						
KSM (fein) - Omyacarb Extra GU	23,9	2,30	10,39						
Luftporen			25,00						
Gesteinskörnung, trocken	1917,7		697,33						
Frischbetonrohddichte	2406,3	2,406	1000						
Mischungsverhältnis									
Zement/Bindemittel		Gesteinskörnung							
0,60									
		Wasser/Bindemittel							
2. Bestandteile für									
1000 l = 1 m³									
50 Liter je Mische									
Gesteinskörnung									
Binde-	Körnung	Anteil	Stoffraum	Rohdichte	Masse	Wassergeh. d. Körn.		Masse	Masse tr.
mittel	[mm]	[%]	[l]	[kg/dm ³]	tr. [kg]	[%]	[l]	feucht [kg]	je Mische
									[kg]
CEM I					191,2				9,56
AHWZ					103,5				5,18
KSM					23,9				1,19
	0/4	50	348,7	2,73	951,9	3	28,6	980,4	47,59
	4/16	50	348,7	2,77	965,8	1	9,7	975,5	48,29
Summe		100	697,3		1917,7		38,2	1955,9	111,81
Wasserzugabe je m ³ :		170	-		38,2	=	131,8		6,59
Zusatzmittel:FM.....									
..... (..... ‰ der Masse des Zementes/Bindemittels) kg/m ³ je Mische									

A.9 Digitaler Anhang

EXCEL

Beton_Versuchsprogramm.xls
Beton_Übersicht Wasserbindemittelwerte.xls
Beton_Fließmitteldosierung.xls
Beton_Ergebnisse der Frischbetonprüfungen.xls
Beton_Auswertung Druckfestigkeit.xls
Beton_Auswertung Temperaturanstieg.xls
Beton_Auswertung Karbonatisierung.xls
Beton_Auswertung WU-Prüfung.xls
Beton_Modell Wärmeentwicklung _teiladiabatisch nach adiabatisch.xls
Beton_Protokoll Druckfestigkeitsprüfung.xls
Beton_Zementzusammensetzung Übersicht.xls
Gesteinskörnung_Korngrößenverteilung_50-50 Gewichtung.xls
Mörtelzusammensetzungen und Versuchskalender.xls
Mörtel_Kalorimeter Auswertung gesammelt.xls
Mörtel_Protokoll und Auswertung Festigkeit.xls
PSD_Ausgangsstoffe.xls
Quantification XRD.xls

ORDNER: Mischungsberechnungen und Herstellungsprotokolle

Beton-MB-Formblatt_k-Wert_B3-Beton.xls
Beton-MB-Formblatt_k-Wert_HOZ-Beton.xls
Beton-MB-Formblatt_k-Wert_Öko-Beton.xls
Beton-MB-Formblatt_k-Wert_Öko_SR0-Beton.xls
Beton-MB-Formblatt_k-Wert_WW-Beton.xls
Beton_Protokoll_Betonherstellung_B3.doc
Beton_Protokoll_Betonherstellung_HOZ.doc
Beton_Protokoll_Betonherstellung_Öko.doc
Beton_Protokoll_Betonherstellung_Öko_SR0.doc
Beton_Protokoll_Betonherstellung_WW.doc

ORDNER: Fotos

WORD

Diplomarbeit.doc

PDF

Diplomarbeit.pdf

