

Schlussbericht

Titel	Thermisch-mechanische Aufbereitung von Betonbrechsand zur Herstellung eines reaktiven Betonzusatzstoffs
Laufzeit	01.03.2021 – 29.02.2024
Zuwendungsgeber	Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung
Projektnummer	T0218/36374/2020
Zuwendungsempfänger	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) Abteilung Baustoffe und Betonbau MPA Karlsruhe CMM Karlsruhe Prof. Dr.-Ing. F. Dehn Gotthard-Franz-Str. 3 76131 Karlsruhe
Autoren	J. P. Höffgen, M.Sc. Prof. Dr.-Ing. F. Dehn
Datum	30.09.2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Ausführliche Beschreibung der Projektergebnisse	3
2.1 Randbedingungen der thermisch-mechanischen Aufbereitung von Betonbrechsanden (Modellstoffe)	4
2.1.1 Modellstoffe: Mörtelherstellung und -lagerung	4
2.1.2 Modellstoffe: Mechanische Aufbereitung	8
2.1.3 Modellstoffe: Thermisch-mechanische Aufbereitung	9
2.1.4 Modellstoffe: Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe .	18
2.1.5 Modellstoffe: Mörtel Eigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe	24
2.2 Thermisch-mechanische Aufbereitung von praxisüblichen Betonbrechsanden (Realstoffe)	36
2.2.1 Beschaffung und Charakterisierung der Betonbrechsande	36
2.2.2 Realstoffe: Thermisch-mechanische Aufbereitung	38
2.2.3 Realstoffe: Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe . .	39
2.2.4 Realstoffe: Mörtel Eigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe	41
2.3 Betone mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Betonzusatzstoffen	46
2.3.1 Betonherstellung und Frischbetoneigenschaften	46
2.3.2 Zeitliche Festigkeitsentwicklung	48
2.3.3 Verformungsverhalten	52
2.3.4 Dauerhaftigkeitseigenschaften	61
2.3.5 Umweltverträglichkeit	66
2.4 Entwicklung Anwendungsempfehlung	68
3 Ausblick und Anschlussmöglichkeiten	71
Literaturverzeichnis	73
A Abbildungen	A1
B Tabellen	A3

Abbildungsverzeichnis

2.1	Zeitplan	3
2.2	Korngrößenverteilung der verwendeten Referenzbindemittel	4
2.3	Korngrößenverteilung der verwendeten Gesteinskörnungen	5
2.4	Chemische Zusammensetzung der Modellstoffe im Dreistoffsystem	7
2.5	Histogramme der Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe nach der Mahlung . .	8
2.6	Thermogravimetrische Charakterisierung der Modellstoffe	9
2.7	Thermogravimetrische Untersuchung des Modellstoffs CEM-100 bei unterschiedlichen Aufheizraten	12
2.8	Thermogravimetrische Messung am Modellstoff CEM-100 gekoppelt mit Massenspektroskopie zur qualitativen Identifikation der Abgabe von Wasser und Kohlenstoffdioxid	13
2.9	Thermogravimetrische Untersuchung des aufbereiteten Modellstoffs CEM infolge unterschiedlicher Aufbereitungsrandbedingungen	14
2.10	Thermogravimetrische Untersuchung des aufbereiteten Modellstoffs CEM infolge unterschiedlicher Tiegelgrößen und Aufbereitungsdauern im statischen Ofen . . .	16
2.11	Thermogravimetrische Untersuchung des im statischen Ofen und im Drehrohrofen aufbereiteten Modellstoffs CEM	17
2.12	Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe CEM und RS50 nach der thermischen Aufbereitung bei unterschiedlichen Temperaturen	17
2.13	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und aufbereiteten Modellstoffen für verschiedene Temperaturen	19
2.14	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und aufbereiteten Modellstoffen für verschiedene Rheinsandgehalte	21
2.15	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und bei 400 °C und 600 °C aufbereiteten Modellstoffen für verschiedene Gesteinskörnungsarten und -gehalte	22
2.16	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und CEM-400, CEM-600, S0-600 und FA0-600 für unterschiedliche Austauschraten sowie Mischungen aus CEM I mit 30 m% Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Kalksteinmehl	23
2.17	Mörteldruckfestigkeit f_c im Alter von 2 d in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d für unterschiedliche Mischungen, bei denen CEM I partiell durch aufbereitete Modellstoffe substituiert wurde	26

2.18	Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit von CEM I-Mörtel mit unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten im Alter von 1 d, 2 d, 7 d und 28 d	27
2.19	Relative Festigkeitsentwicklung von Mörtel mit bei unterschiedlichen Temperaturen thermisch aufbereiteten Modellstoffen (CEM, RS75, RS62, RS50) mit $f = 0,3$ und $\frac{w}{b} = 0,50$	27
2.20	Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit f_c und Wasserzementwert $\frac{w}{z}$ und rechnerisch modellierter Einfluss der Materialstreuung auf den k -Wert in Relation zur Austauschrate	28
2.21	k -Werte aufbereiteter Modellstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung	30
2.22	Mit Gleichung 2.10 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{measured} und daraus berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit	32
2.23	Mit Gleichung 2.13 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{measured} und daraus berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit	33
2.24	Mit Gleichung 2.17 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{measured} und daraus berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit	34
2.25	Einfluss des Anteils von Betonzusatzstoffen auf errechnete k -Werte	35
2.26	Chemische Zusammensetzung der Realstoffe im Dreistoffsystem	36
2.27	Thermogravimetrische Charakterisierung ausgewählter Realstoffe	38
2.28	Partikelgrößenverteilung ausgewählter Realstoffe nach der thermischen Aufbereitung bei 600 °C	39
2.29	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und jeweils 30 m% Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) bzw. Kalksteinmehl (L) . . .	40
2.30	Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und aufbereiteten Realstoffen	40
2.31	Mörteldruckfestigkeit f_c im Alter von 2 d in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d für unterschiedliche Mischungen, bei denen CEM I partiell durch etablierte Betonzusatzstoffe und aufbereitete Realstoffe substituiert wurde	42
2.32	Berechnete k -Werte und Mörteldruckfestigkeiten für Kalksteinmehl, Steinkohlenflugasche, Hüttensand und CEM I (k_{measured}) über den Erwartungswerten	42
2.33	k -Werte ausgewählter aufbereiteter Realstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung	43
2.34	k -Werte zusätzlicher ausgewählter aufbereiteter Realstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung	44
2.35	Mit Gleichung 2.13 für Realstoffe berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{mod} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{ist} und daraus berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit	44
2.36	Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Referenzmischungen mit CEM I, FA, S und L	48

2.37	Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen mit den Modellstoffen CEM und RS50 bei unterschiedlichen Aktivierungstemperaturen und Substitutionsraten	49
2.38	Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen mit den thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen	50
2.39	Kenngrößen der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit der untersuchten Betone	51
2.40	Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone .	53
2.41	Dynamischer E-Modul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone	55
2.42	Schwindverformungen der Referenzbetone	57
2.43	Schwindverformungen der Mischungen mit den Modellstoffen CEM und RS50 bei unterschiedlichen Aktivierungstemperaturen und Substitutionsraten	58
2.44	Schwindverformungen der Mischungen mit den thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen	59
2.45	Berechnete Endschwindmaße ϵ_{cds0} aller Betone aufgetragen über der Referenzdruckfestigkeit $f_{cm,ref}$ und dem dynamischen E-Modul E_c	60
2.46	Wasseraufnahmekoeffizienten in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeit der untersuchten Betone	62
2.47	Chlorideindringtiefe in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeit der untersuchten Betone	63
2.48	Carbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeit der untersuchten Betone	64
2.49	Kumulativer Massenverlust ausgewählter Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel	65
2.50	Kumulativer Massenverlust unterschiedlicher Betone nach 28 Frost-Tau-Wechseln	66
2.51	Eluatfraktionen und Feststoffgehalte von aufbereiteten Realstoffen und damit hergestellten Betonen	67

Tabellenverzeichnis

2.1	Zusammensetzung der Modellstoffe	5
2.2	Biegezug- und Druckfestigkeit der Modellstoffe	7
2.3	Massenverlust, Hydratationswärme sowie Biegezug- und Druckfestigkeit infolge von unterschiedlichen Randbedingungen der thermischen Aufbereitung bei 500 °C	12
2.4	Ergebnisse von Wärmeflusskalorimetriemessungen an aufbereiteten Proben des Modellstoffs CEM mit variierten Randbedingungen	15
2.5	Untersuchte Betonbrechsande inkl. Herkunft, Varianten und Bezeichnungen . . .	37
2.6	Nach Gleichung 2.30 berechnete Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Beton- druckfestigkeitsklassen mit zugehörigen mittleren Würfeldruckfestigkeiten	55

1 Einleitung

Beton ist der weltweit wichtigste Massenbaustoff, für den es nur in geringem Umfang Alternativen gibt. Neben der Verwendung im Hochbau ist Beton für die Herstellung von dauerhaften Infrastrukturbauwerken wie Brücken, Tunneln oder Wasserstraßen unerlässlich.

Beton besteht neben inerten Gesteinskörnungen aus Zement und Wasser, die festigkeitsbildend miteinander reagieren und erstere zusammenhalten. Bei der Herstellung von Zement als Bindemittel werden jedoch prozessbedingt erhebliche Mengen Kohlenstoffdioxid (CO_2) freigesetzt, wodurch der Massenbaustoff Beton grundsätzlich eine vergleichsweise schlechte Klimabilanz aufweist. Die hohen CO_2 -Emissionen von Zement resultieren teilweise aus den für den Brennprozess verwendeten fossilen Brennstoffen. Der größte Anteil entstammt jedoch dem Zementklinkerrohmehl, das mineralisiertes CO_2 enthält, das infolge des Brennprozesses entweicht, wodurch die Reaktivität des Zementklinkers entsteht. Während ersteres prozesstechnisch durch den Umstieg auf erneuerbare Brennstoffe vermieden werden kann, lässt sich letzteres nicht reduzieren und allenfalls in Form von „Carbon Capture and Storage“ kompensieren.

Andererseits entstehen beim Rückbau von Betonbauwerken Abfallströme, die im Sinne eines effizienten Ressourceneinsatzes weiterverwendet werden müssen. Das bisherige Betonrecycling fokussiert vor allem auf die Herstellung rezyklierter Gesteinskörnungen, die überwiegend für ungebundene Schichten des Verkehrswegebbaus eingesetzt werden. Eine Wiederverwendung als rezyklierte Gesteinskörnung im Beton ist ebenfalls möglich. Hierfür müssen die Gesteinskörnungen jedoch mit erhöhtem Aufwand aufbereitet werden, sodass die Gesteinskörnung mit möglichst geringem Anteil des porösen Zementsteins zurückgewonnen wird, da letzterer sich negativ auf Frisch- und Festbetoneigenschaften auswirkt. Bei der mechanischen Aufbereitung reichert sich hydratisierter Zement in den Feinstoffen an, sodass der Einsatz feiner rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonbruch derzeit sehr restriktiv geregelt wird. Zudem wird das Potential des Zementrecyclings mit diesem Ansatz nicht gehoben.

Das primäre Ziel dieses Forschungsprojekts umfasste daher die Entwicklung und Charakterisierung eines neuartigen Betonzusatzstoffs, der durch eine thermisch-mechanische Aktivierung aus rezykliertem Betonabbruch als Sekundärrohstoff gewonnen werden sollte.

Hierfür waren zunächst Randbedingungen der Aufbereitung festzulegen und die Wirksamkeit von Betonbrechsanden unterschiedlicher Zusammensetzung zu untersuchen. Dafür sollten sowohl unterschiedliche Betonbrechsande von verschiedenen Aufbereitungsunternehmen, als auch im Labor hergestellte Betonbrechsande mit bekannter, definierter Zusammensetzung betrachtet werden. Das Potential der neuartigen Betonzusatzstoffe aus rezykliertem thermisch-mechanisch aufbereitetem Betonabbruch waren hinsichtlich der Wechselwirkungen im gesamten

Bindemittelsystem zu analysieren. Dabei sollte ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, der neben den üblichen Untersuchungen zum Hydratationsverhalten und der Auswirkungen der Betonzusatzstoffe auf die mechanischen Eigenschaften insbesondere die Dauerhaftigkeit, das Langzeitverformungsverhalten und die Umweltverträglichkeit von daraus hergestellten (Neu)Betonen beinhaltet.

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts begann im März 2021 und erstreckte sich auf die folgenden 43 Monate. Entgegen der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit von 36 Monaten war eine kostenneutrale Verlängerung erforderlich, um die während der Projektbearbeitung aufgetretenen Verzögerungen zu kompensieren. Diese lassen sich einerseits mit der COVID-19-Pandemie begründen, die insbesondere im ersten Jahr der Projektlaufzeit zu Verzögerungen bei experimentellen Untersuchungen führte. Andererseits war der Projektbearbeiter im Laufe des Projekts über zwei mehrmonatige Zeiträume in Elternzeit und daher beurlaubt.

Mit der Einreichung des vorliegenden Schlussberichts endet die unmittelbare Arbeit am Forschungsprojekt *THEMA Betonbrechsand*. Auf der Grundlage der Ergebnisse konnten jedoch erfolgreich mehrere Nachfolgeprojekte eingeworben werden. Zudem befinden sich mehrere englischsprachige Publikationen in Vorbereitung, aus deren Entwürfen die im vorliegenden Bericht verwendeten Abbildungen entnommen wurden.

2 Ausführliche Beschreibung der Projektergebnisse

Im nachfolgenden Kapitel werden die Untersuchungsergebnisse des Projekts ausführlich beschrieben. Die Gliederung orientiert sich dabei an dem im Antrag enthaltenen Projektzeitplan mit den einzelnen Arbeitspaketen und -schritten, der in einer aktualisierten Fassung in Abb. 2.1) dargestellt ist.

In Abschnitt 2.1 wird zunächst der Einfluss eigens für das vorliegende Projekt im Labor hergestellter Brechsande, sog. Modellstoffe, auf das Hydratationsverhalten und die Festigkeitsentwicklung von Zementmörteln dargestellt. In Abschnitt 2.2 werden die gewonnenen Erkenntnisse analogen Untersuchungen an realen Betonbrechsanden sowie etablierten Betonzusatzstoffen gegenübergestellt. Abschnitt 2.3 beschreibt den Einfluss von thermisch aktivierten Betonbrechsanden – Modell- und Realstoffe – auf das Kurz- und Langzeitverhalten von Betonen. Abschnitt 2.4 fasst die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich einer Anwendungsempfehlung zusammen.

AP	Beschreibung	2021				2022				2023				1
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
0.1	Ausführliche Literatursichtung													
0.2	Erstellung des Versuchsplans													
1	Randbedingungen der thermisch-mechanischen Aufbereitung von Betonbrechsanden (Modellstoffe)													
1.1	Mörtelherstellung und Lagerung													
1.2	Thermisch-mechanische Aufbereitung													
1.3	Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe													
1.4	Mörteleigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe													
2	Thermisch-mechanische Aufbereitung von praxisüblichen Betonbrechsanden (Realstoffe)													
2.1	Beschaffung und Charakterisierung der Betonbrechsande													
2.2	Thermisch-mechanische Aufbereitung													
2.3	Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe													
2.4	Mörteleigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe													
2.5	Umweltverträglichkeit der Betonzusatzstoffe													
3	Beton mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Betonzusatzstoffen													
3.1	Betonherstellung und Frischbetoneigenschaften													
3.2	Zeitliche Festigkeitsentwicklung													
3.3	Verformungsverhalten													
3.4	Dauerhaftigkeitseigenschaften													
3.5	Entwicklung Anwendungsempfehlung													

Abb. 2.1: Vorgesehener Zeitplan des Projekts, inkl. Darstellung der einzelnen Arbeitspakete und Arbeitsschritte

2.1 Randbedingungen der thermisch-mechanischen Aufbereitung von Betonbrechsanden (Modellstoffe)

2.1.1 Modellstoffe: Mörtelherstellung und -lagerung

2.1.1.1 Analyse der Ausgangsstoffe

Für die Hauptuntersuchungen – bestehend aus der Herstellung der Modellstoffe sowie der Untersuchung von Aufbereitungsparametern – wurden schwerpunktmäßig drei unterschiedliche Gesteinskörnungen (Rheinsand (RS), Kalksteinsand (LS) und Grauwacke (GW)) sowie jeweils ein Portlandzement CEM I 42,5 R (CEM I), Hüttensand (S) und eine Steinkohlenflugasche (FA) beschafft. Für die Untersuchungen an Bindemitteln, Mörteln und Betonen wurde zudem ein Kalksteinmehl (L) verwendet, das jedoch keinen Einsatz bei der Herstellung der Modellstoffe fand.

Die Ausgangsstoffe wurden zunächst hinsichtlich ihrer physikalischen, chemischen und mineralogischen Eigenschaften charakterisiert. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.2 für die verwendeten Bindemittel und in Abb. 2.3 für die verwendeten Gesteinskörnungen sowie den Tabellen B.1, B.2, B.3 und B.4 dargestellt.

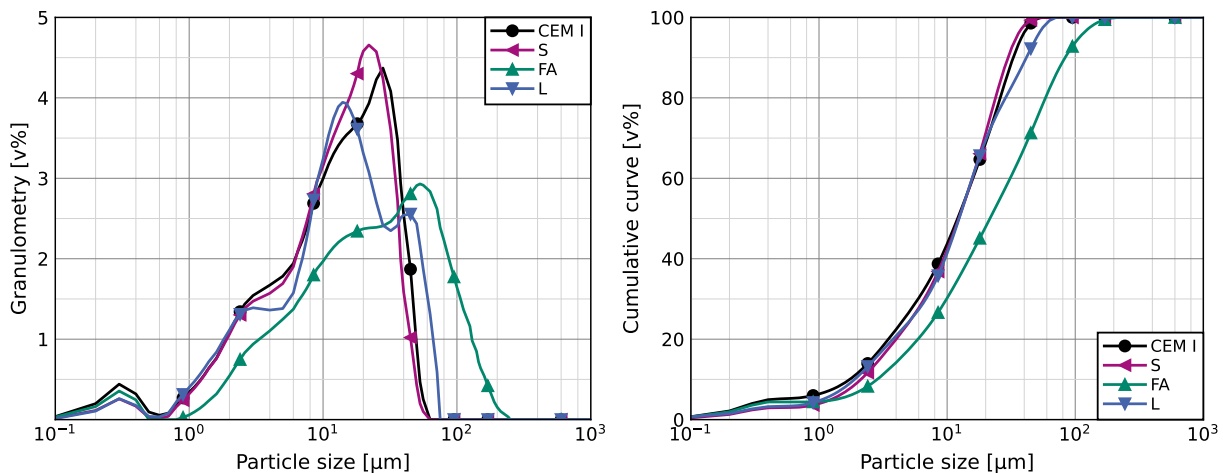


Abb. 2.2: Korngrößenverteilung der in den Hauptversuchen verwendeten Referenzbindemittel Portlandzement (CEM I), Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L). Histogramm (links) und kumulierte Korngrößenverteilung (rechts)

2.1.1.2 Zusammensetzung und Herstellung der Modellstoffe

Um die Bandbreite der in der Praxis vorhandenen Betonbrechsande möglichst umfassend abzubilden, wurden 12 Modellstoffe hergestellt. Variationen zwischen Modellstoffen betreffen den Gehalt und die Art der verwendeten Sande sowie den partiellen Austausch von Portlandzement durch Betonzusatzstoffe. Die Zusammensetzung der Modellstoffe ist in Tab. 2.1 dargestellt.

Alle Modellstoffe wurden mit einem festen Wasserbindemittelwert von $w/b = 0,5$ hergestellt, da einerseits anzunehmen ist, dass bei $w/b = 0,5$ das gesamte Bindemittel hydratisiert, selbst wenn der lokale w/b -Wert aufgrund Adsorption des Wassers geringfügig reduziert sein kann. Höhere w/b -Werte, wie sie in praxisüblichen Betonen häufig vorkommen, bringen keinen

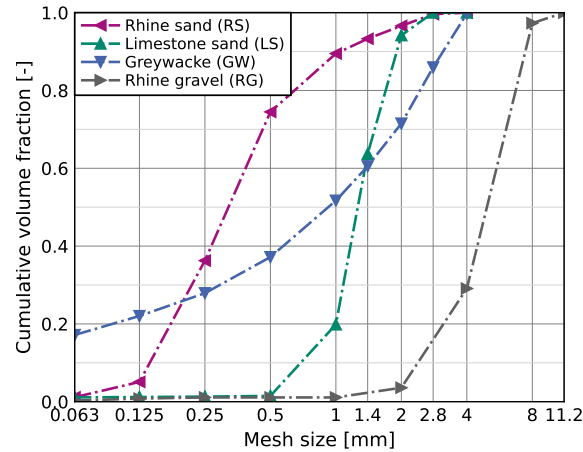


Abb. 2.3: Korngrößenverteilung der verwendeten primären Gesteinskörnungen über Siebungen

Tab. 2.1: Zusammensetzung der Modellstoffe. w/b : Wasserbindemittelwert; v_l : Leimgehalt; GK: Gesteinskörnung

	Bindemittel	w/b	v_l [v%]	GK
CEM	100 m% CEM I	0,5	100	–
RS75			75	
RS62	100 m% CEM I	0,5	62,5	RS
RS50			50	
LS75	100 m% CEM I	0,5	75	LS
LS50			50	
GW75	100 m% CEM I	0,5	75	GW
GW50			50	
FA0	70 m% CEM I	0,5	100	–
FA50	30 m% FA		50	RS
S0	70 m% CEM I	0,5	100	–
S50	30 m% S		50	RS

erhöhten Hydratationsgrad mit sich, sondern wirken sich lediglich auf die Porosität der Zementsteinmatrix aus. Andererseits erhöht sich mit steigendem w/b -Wert die Entmischungsneigung der Frischmörtel, insbesondere mit steigendem Leimgehalt. Niedrigere w/b -Werte hatten in Vorversuchen zur Folge, dass bei niedrigen Leimgehalten keine homogenen Mischungen hergestellt werden konnten.

Die Grundlage der Modellstoffe bildet Zementleim bzw. erhärteter Zementstein (HCP) aus CEM I 42,5 R. Der Einfluss der Sandart soll schwerpunktmäßig an Mörteln mit einem Gesteinskörnungsgehalt von 50 v% untersucht werden. Zum Einsatz kommen ein quarzitischer Rheinsand (RS) und ein Kalksteinbrechsand (LS), welche die überwiegend verwendeten Gesteinskörnungsarten repräsentieren sollen. Ergänzend wurden Modellstoffe mit Grauwacke (GW) hergestellt, deren Alkalireaktivität aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt [5] bekannt war. Um den Einfluss des Gesteinskörnungsgehalts zu untersuchen, wurden zusätzliche Modellstoffe mit einem Gesteinskörnungsgehalt von 25 v% – und im Fall von RS 37,5 v% – hergestellt. Da zudem in den vergangenen Jahren der Einsatz von reinen Portlandzementen rückläufig ist, komplettie-

ren reine Bindemittelleime und Mörtel mit einem Gesteinskörnungsgehalt von 50 v%, bei denen jeweils 30 m% des CEM I durch Steinkohlenflugasche (FA) bzw. Hüttensand (S), welche die überwiegend verwendeten puzzolanisch bzw. latent-hydraulisch reagierenden Betonzusatzstoffe sind, ersetzt wurden, die Modellstoffmatrix.

Bei der Herstellung der Modellstoffe wurde auf die Zugabe von Betonzusatzmitteln verzichtet. Zunächst wurden die mineralischen Bestandteile trocken gemischt und anschließend das Wasser in mehreren Schritten zugegeben, um eine möglichst homogene Mischung zu erzielen. Bei Augenscheinprüfungen konnten insbesondere bei Modellstoffen ohne Gesteinskörnung dennoch Bindemittelagglomerate festgestellt werden. Die Bindemittelleime und Frischmörtel wurden anschließend in Eimern mit einem Fassungsvermögen von 30 l gefüllt. Bei allen Modellstoffen wurde eine unterschiedlich stark ausgeprägte Wasserabsorption (Bluten) beobachtet, sodass die Eimer bis zu 8 h in einem Ofen bei 40 °C gelagert wurden. Abgesondertes Blutwasser wurde regelmäßig händisch untergemischt. Sobald kein weiteres Bluten beobachtet wurde, wurden die Eimer über Nacht bei 10 °C – 15 °C gelagert, um die Kerntemperatur während der Hydratation zu reduzieren. Anschließend erfolgte eine weitere Lagerung bei Laborklima (ca. 18 °C – 22 °C). Eine Austrocknung der Modellstoffe wurde dadurch verhindert, dass die verbleibenden Luftspalte zwischen Probenoberseite und Eimerdeckel mit Wasser aufgefüllt wurden. Um die Hydratation zu beschleunigen, wurden alle Eimer für ca. 6 Wochen in einem Klimaschrank bei 50 °C gelagert. Aufgrund eines undokumentierten Ausfalls der Steuerungselektronik wurde der Zeitpunkt des Endes der Wärmebehandlung nicht genau festgehalten. Ein Einfluss der reduzierten Wärmebehandlungsdauer auf die Eigenschaften der Modellstoffe wurde für unwahrscheinlich erachtet. Um dennoch mögliche zeitliche Einflüsse auf den Hydratationsgrad der Modellstoffe gänzlich auszuschließen, wurde die anschließende Probenlagerung bei Laborklima auf ein Modellstoffalter von mindestens 180 d ausgedehnt.

Nach der Herstellung wurde die Biegezug- und Druckfestigkeit der Modellstoffe untersucht. Prüfzeitpunkte waren hierbei 7 d und 28 d. Bei einigen Modellstoffen konnten zusätzliche Festigkeitsuntersuchungen im Alter von 2 d durchgeführt werden. Die Untersuchungen fanden an Prismen mit den Abmessungen $(20 \times 20 \times 80) \text{ mm}^3$ statt. Für ergänzende Messungen im Alter von 28 d wurden zudem Prismen mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$ verwendet. Letztere wurden gem. DIN EN 196-1:2016-11 mit Laststeigerungsraten von $\dot{F}_f = 50 \text{ N/s}$ im Biegezugversuch und $\dot{F}_c = 2,4 \text{ kN/s}$ im Druckversuch durchgeführt. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Laststeigerungsraten für die Prismen mit einer Breite von 20 mm auf $\dot{F}_f = 10 \text{ N/s}$ bzw. $\dot{F}_c = 0,6 \text{ kN/s}$ reduziert. Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen zeigt Tab. 2.2.

An Rückstellproben wurde im Alter von 365 d die chemische Zusammensetzung der einzelnen Modellstoffe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF) bestimmt. Tab. B.5 zeigt die ausführlichen Ergebnisse der XRF-Analyse. Die Ergebnisse werden in Abb. 2.4 im Vergleich mit den Ausgangsstoffen visualisiert.

Tab. 2.2: Biegezug- (f_{ct}) und Druckfestigkeit (f_c) der Modellstoffe im Alter von 2 d, 7 d, 28 d und 365 d an Prismen mit den Abmessungen $(20 \times 20 \times 80) \text{ mm}^3$ und im Alter von 28 d (*) an Prismen mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$

	f_{ct} im Alter von					f_c im Alter von				
	2 d	7 d	28 d	28 d*	365 d	2 d	7 d	28 d	28 d*	365 d
CEM	4,6	7,1	7,4	3,0	8,1	20,3	36,8	42,5	47,6	53,6
RS75		7,4	8,5	3,7	8,5		38,7	46,7	53,7	55,9
RS62	6,0	8,0	8,6	4,1	6,3	27,1	46,1	50,4	57,2	53,6
RS50	6,1	7,7	8,5	4,1	8,9	26,5	48,3	50,0	54,8	60,5
LS75		6,7	7,1	3,3	7,4		41,5	45,6	49,0	53,1
LS50	6,2	7,9	8,7	4,2	10,1	29,7	49,8	56,5	61,1	64,1
GW75		7,0	8,6	3,4	7,9		43,0	50,4	52,7	60,3
GW50	6,1	8,3	9,9	4,1	11,2	32,9	52,8	47,6	59,2	65,4
FA0	2,8	4,4 ⁺	6,7	2,4	9,2	11,0	22,9	35,1	41,2	56,8
FA50	3,9	5,6	5,7	3,2	9,6	18,0	32,9	37,9	44,7	56,6
S0	3,8	4,5 ⁺	7,2	3,1	8,9	13,3	24,2	37,4	42,5	53,9
S50	4,6	6,9	8,9	3,8	11,2	21,8	39,0	54,3	55,2	73,8

⁺ Bei den Modellstoffen FA0 und S0 wurde im Alter von 7 d eine Laststeigerungsrate von $\dot{F}_f = 1 \text{ N/s}$ angewendet.

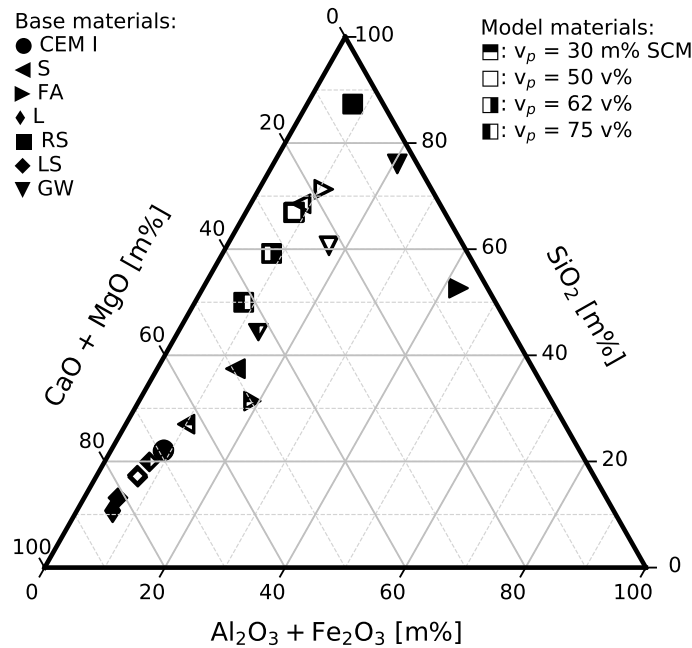


Abb. 2.4: Chemische Zusammensetzung der Modellstoffe im Dreistoffsystem mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) nach DIN EN 196-2:2013-10

2.1.2 Modellstoffe: Mechanische Aufbereitung

Zeitgleich mit der Bestimmung der Festigkeit im Alter von 365 d begann die mechanische Aufbereitung der Modellstoffe. Hierfür wurden die Probekörper aus den Eimern entnommen und zunächst mit einer hydraulischen Prüfmaschine auf Faustgröße zerdrückt. Die Bruchstücke wurden anschließend bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und mit einem Backenbrecher auf einen Größtkorndurchmesser von 8 mm zerkleinert. Der überwiegende Teil der Proben wurde danach bei einem externen Unternehmen in einer Schwingmühle gemahlen. Für die Modellstoffe wurde beschlossen, die Mahlung vor der thermischen Aufbereitung durchzuführen, um Sekundäreffekte, welche die Analyse der späteren Versuchsergebnisse erschweren würden, zu vermeiden. Durch die einheitliche Mahlung in großen Chargen konnte eine gute Homogenität erreicht werden. Abb. 2.5 zeigt die Histogramme der Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe. Die resultierenden kumulativen Verteilungen sind in Abb. A.1 dargestellt. Hierbei werden die Modellstoffe gemäß ihrer Trocknungstemperatur mit dem Suffix „-100“ bezeichnet.

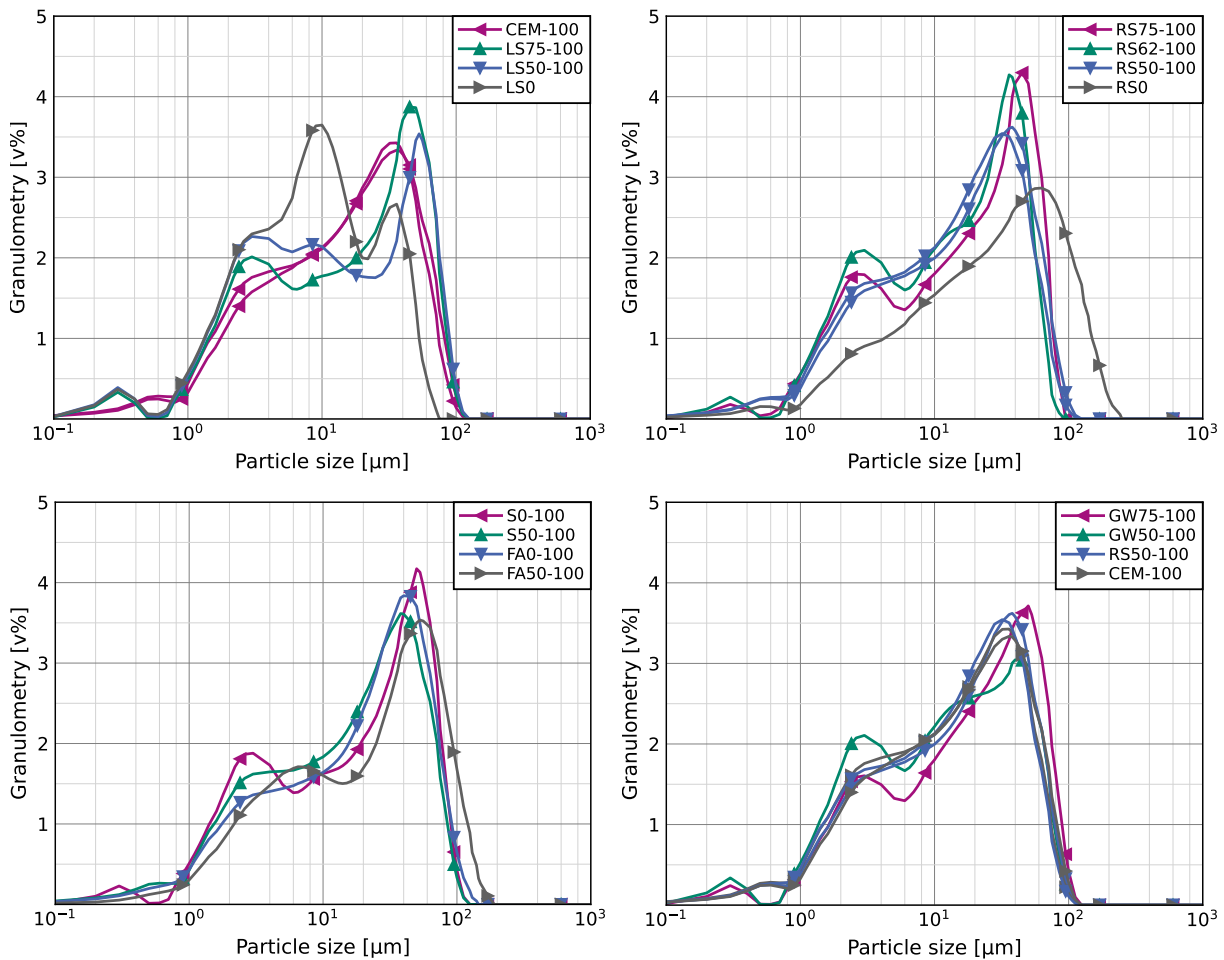


Abb. 2.5: Histogramme der Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe nach der Mahlung

Es lässt sich für alle gemahlten Modellstoffe eine sehr gute Übereinstimmung der Partikelgrößenverteilung erkennen. Lediglich die beiden Stoffe „LS0“ und „RS0“ zeigen deutliche Abweichungen sowohl untereinander als auch von den übrigen Modellstoffen. Hierbei handelt es sich um Proben der natürlichen Gesteinskörnungen (LS und RS), die in einer Scheiben-

schwingmühle am KIT-^{IMB}_{MPA}_{CMM} in einer kleinen Charge gemahlen wurden, um Vergleiche zwischen den Modellstoffen und der ursprünglichen Gesteinskörnung ohne Zementstein zu ermöglichen.

Im Vergleich mit den Kornverteilungskurven der Referenz-Bindemittel in Abb. 2.2 zeigt sich, dass die gemahlenen Modellstoffe geringfügig gröber als CEM I, S und L, aber feiner als FA sind.

2.1.3 Modellstoffe: Thermisch-mechanische Aufbereitung

2.1.3.1 Thermogravimetrische Charakterisierung der Modellstoffe

Abb. 2.6 zeigt die Ergebnisse von Thermogravimetrieuntersuchungen an den Rückstellproben ausgewählter Modellstoffe zzgl. der gemahlenen Gesteinskörnungen RS und LS. Die Mörtel wurden unmittelbar nach der Trocknung bei 105 °C mit einer Kugelmühle aufgemahlen, um den Einfluss physikalisch gebundenen Wassers auf die Messergebnisse zu minimieren. Für die Messungen wurde jeweils eine Probenmasse von 160 mg ± 1 mg verwendet. Die Versuche wurden mit einer Heizrate von 10 K/min durchgeführt.

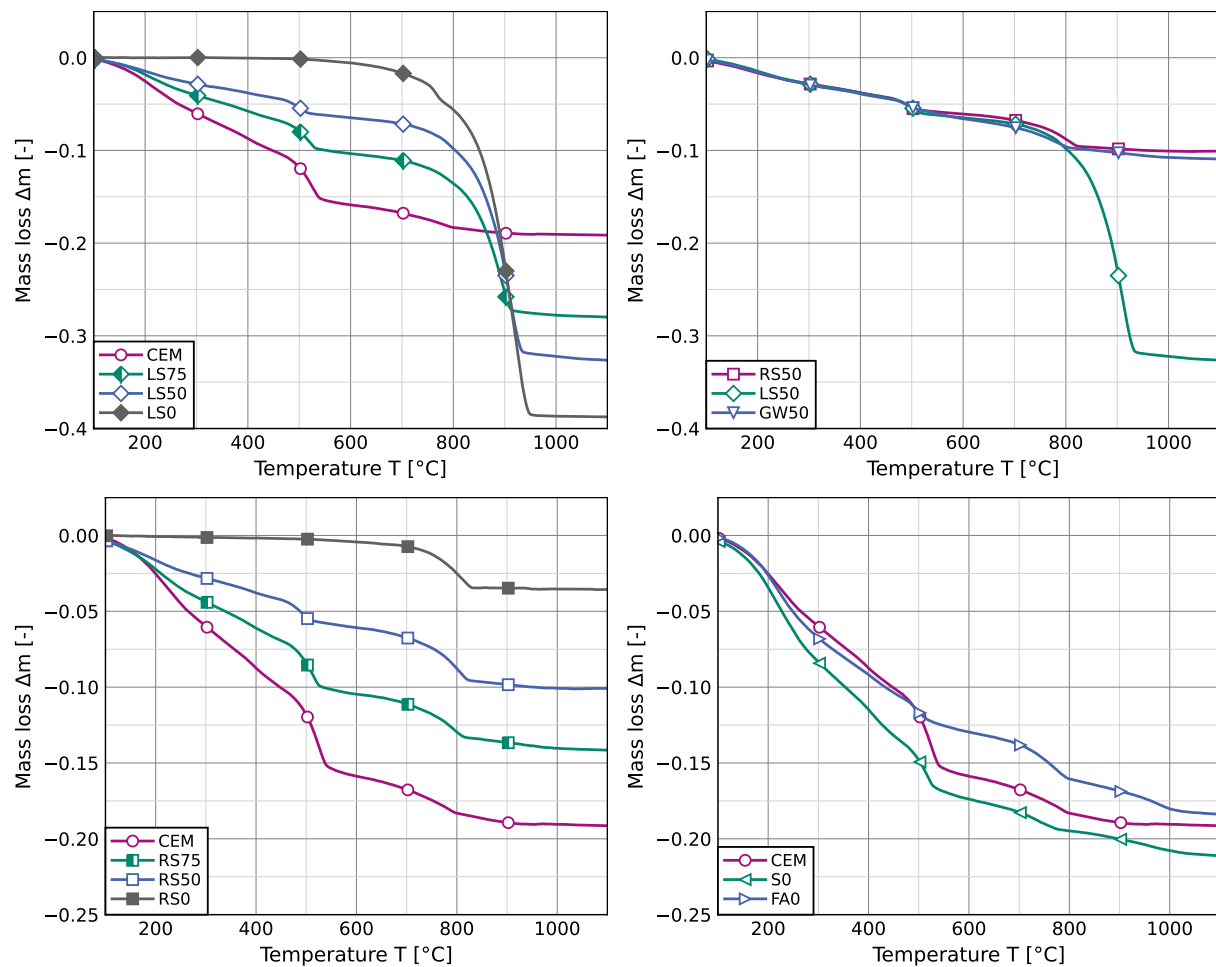


Abb. 2.6: Thermogravimetrische Charakterisierung der Modellstoffe in Tiegeln mit 160 mg Probengröße bei einer Aufheizrate von 10 K/min

Hierbei zeigt sich in guter Übereinstimmung mit den XRF-Ergebnissen der Einfluss von Art und Gehalt der Gesteinskörnung. Die Modellstoffe mit Kalksteinbrechsand (LS) als Gesteinskörnung weisen einen hohen Massenverlust bei Temperaturen über 800 °C auf, der bei den Modellstoffen mit Grauwacke nur geringfügig und bei Proben mit Rheinsand nicht vorhanden

ist. Dies ist auf die Zersetzung von Calciumcarbonat (CaCO_3) in der Gesteinskörnung zurückzuführen. Alle Modellstoffe weisen jedoch einen Massenverlust zwischen 700°C und 800°C auf, der ebenfalls durch die Zersetzung von Calciumcarbonat hervorgerufen wird. Die unterschiedlichen Zersetzungstemperaturen lassen sich mit unterschiedlichen mineralogischen und petrographischen Zusammensetzungen bzw. Konfigurationen von CaCO_3 begründen.

Neben der offensichtlichen Beeinflussung der Massenänderung durch den Anteil der Gesteinskörnung zeigt Abb. 2.6 zudem Unterschiede zwischen Zementsteinen mit unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen auf. Der Modellstoff FA0, bei dessen Herstellung 30 m% des hydraulisch reaktiven CEM I durch puzzolanische Steinkohlenflugasche ersetzt wurde, weist einen ähnlichen Massenverlust bis zu Temperaturen von ca. 500°C wie der Modellstoff CEM auf. Der anschließende erhöhte Massenverlust, der auf die Zersetzung von Calcium-Hydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) zurückzuführen ist, fällt jedoch deutlich geringer aus. Dies lässt sich damit begründen, dass $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durch die puzzolanische Reaktion der Flugasche verbraucht wird. Dadurch, dass der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt des Modellstoffs FA0 auf nahezu 0 reduziert ist, ist es zudem denkbar, dass FA0 unbekannte Anteile primärer, nicht reagierter Flugasche aufweist, die sich auf die Verwendbarkeit als Betonzusatzstoff auswirken. Der Modellstoff S0 weist zwar einen erhöhten Massenverlust bei 500°C auf, dieser fällt jedoch geringer aus als beim Modellstoff CEM. Dadurch, dass hier latent-hydraulischer Hüttensand 30 m% des CEM I ersetzt, wird bei der Hydratation weniger $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zugunsten von Calcium-Silicat-Hydraten (C-S-H) erzeugt. Dadurch lässt sich der im Vergleich zu CEM erhöhte Massenverlust bei Temperaturen unterhalb von 500°C erklären, der überwiegend auf die Zersetzung von C-S-H zurückzuführen ist.

2.1.3.2 Voruntersuchungen zur thermischen Aufbereitung

Aufbauend auf den im Antrag beschriebenen Untersuchungen wurden zeitgleich zu den Mahlungen der Modellstoffe Voruntersuchungen durchgeführt, um die Randbedingungen der thermischen Aufbereitung festzulegen.

Im Vordergrund stand zunächst die Stabilität von Versuchsergebnissen bei einer Behandlungstemperatur von 500°C . Hierfür wurde ein Versuchsprogramm erstellt, das den Einfluss unterschiedlicher Tiegelgrößen, Aufheizraten, Haltedauern sowie weiterer singulärer Parameter auf die Effektivität der thermischen Aufbereitung abbilden konnte. Ausgangsstoff war der Modellstoff CEM, der nach einer Trocknung bei 105°C in einer Scheibenschwingmühle in den Laboren des KIT-^{IMB}_{MPA}_{CMM} auf Korngrößen kleiner als $125\mu\text{m}$ aufgemahlen wurde. Untersucht wurden dabei die folgenden Parameterkombinationen:

0. Ausgangsstoff ohne thermische Aufbereitung
1. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 1 h
2. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 2 h
3. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 4 h
4. Tiegelgröße: 20 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 2 h
5. Tiegelgröße: 2500 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 2 h

6. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 2 h,
Abkühlung verteilt auf einem Blech
7. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 667 K/h, Haltedauer: 2 h,
im hinteren Bereich eines Muffelofens
8. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 667 K/h, Haltedauer: 2 h,
im vorderen Bereich eines Muffelofens
9. Tiegelgröße: 2500 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 2 h,
mit Deckel
10. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: vorgeheizter Ofen, Haltedauer: 2 h
11. Tiegelgröße: 200 ml, Aufheizrate: 200 K/h, Haltedauer: 2 h
12. Tiegelgröße: 2500 ml, Aufheizrate: 400 K/h, Haltedauer: 6 h,
mit Deckel

Das vordergründige Ziel der Versuchsreihe war die Verknüpfung der bisherigen Vorversuche (Parameterkombinationen 7 bzw. 8) mit der Anforderung, aufgrund der größeren benötigten Probenmengen auf größere Tiegel und einen anderen Ofen ausweichen zu müssen.

Durch Wägungen vor und nach der thermischen Behandlung wurden für jede Parameterkombination die jeweiligen relativen Massenverluste Δm bestimmt. Anschließend fanden Wärmeflusskalorimetriemessungen nach DIN EN 196-8:2010-07 statt. Hierfür wurden jeweils 2,1 g CEM I und 0,9 g des thermisch aufbereiteten Zementsteins mit 1,2 g Wasser vermischt und die Hydratationswärmeentwicklung bei 20 °C gegen eine Parallelprobe mit gleicher Wärmekapazität gemessen. Im letzten Schritt wurden für ausgewählte Parameterkombinationen Mörtel hergestellt, um die Festigkeitsentwicklung zu beurteilen. Die Mörtel wiesen einen Leimgehalt von $v_l = 50 \text{ v\%}$ und einen Wasser-Bindemittelwert $w/b = 0,5$ auf. Die Grundmischung entspricht damit dem Modellstoff RS50. Die Austauschrate des CEM I durch den aufbereiteten Zementstein betrug 30 m%. Es wurden jeweils Prismen mit den Abmessungen $(20 \times 20 \times 80) \text{ mm}^3$ hergestellt und nach dem Ausschalen im Alter von 1 d bis zur Prüfung bei 20 °C unter Wasser gelagert. Die maßgeblichen Versuchsergebnisse sind in Tab. 2.3 dargestellt. Für die Massenverluste (außer bei Tiegeln mit einem Fassungsvermögen von 2500 ml) und die Hydratationswärme wurden jeweils Doppelbestimmungen durchgeführt; die Festigkeitsversuche wurden je Prüfzeitpunkt an jeweils drei Prismen aus einer Herstellungscharge durchgeführt.

Die Massenverluste während der thermischen Behandlung nehmen mit steigender Tiegelgröße ab und mit steigender Behandlungsdauer zu. Dies zeigt, dass die Dehydratation in den verwendeten statischen Öfen ein zeitabhängiger Prozess ist: Einerseits erwärmen sich die Proben von außen nach innen; andererseits muss das abgegebene dampfförmige Wasser mit zunehmender Probenmenge und -größe einen längeren Weg zurücklegen. Die weiteren untersuchten Parameter (Aufheizrate und Abkühlgeschwindigkeit) haben keinen derart ausgeprägten Effekt auf den Massenverlust. Durch die Doppelbestimmung wurde außerdem festgestellt, dass der zuvor verwendete Muffelofen zu keiner gleichmäßigen Dehydratation führt. Die Ergebnisse für die

Tab. 2.3: Relativer Massenverlust (Δm), Hydratationswärme (Q_{2d}) nach 2 d sowie Biegezug- (f_{ct}) und Druckfestigkeit (f_c) im Alter von 2 d und 28 d infolge von unterschiedlichen Randbedingungen der thermischen Aufbereitung bei 500 °C

Nr.	Δm m%	Q_{2d} J/g	f_{ct} [MPa]		f_c [MPa]	
			2 d	28 d	2 d	28 d
0			4,0	6,9	18,3	36,1
1	12,6	218	5,0	7,8	23,2	44,1
2	13,9	215	4,8	7,2	23,9	41,4
3	15,8	241	5,0	7,6	24,8	44,4
4	17,1	224				
5	9,3	208	4,3	7,0	19,7	37,8
6	14,0	223				
7	12,8	226	5,0	7,9	24,2	44,3
8	11,9	220	5,0	7,5	21,3	40,6
9	8,8	202	4,1	7,3	19,1	37,9
10	14,7	220				
11	14,4	224	5,1	7,7	24,2	44,1
12	12,0	216	4,8	7,8	21,8	39,7

Hydratationswärme und Festigkeiten entsprechen weitestgehend den Tendenzen der Massenverluste.

Um die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Proben zu verstehen, wurden Thermogravimetriemessungen am inzwischen verfügbaren gemahlten Modellstoff CEM-100 mit unterschiedlichen Aufheizraten durchgeführt. Die Ergebnisse in Abb. 2.7 zeigen, dass mit sinkender Aufheizrate Zersetzungsprozesse bei niedrigeren Temperaturen stattfinden, was sich in erhöhten Massenverlusten bei gleichen Temperaturen äußert. Insbesondere die Zersetzung des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zeigt einen starken Einfluss der Aufheizrate, sodass bei einer Festlegung auf eine Aufbereitungstemperatur von 500 °C in Abhängigkeit der weiteren Randbedingungen der thermischen Aufbereitung eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse fraglich ist.

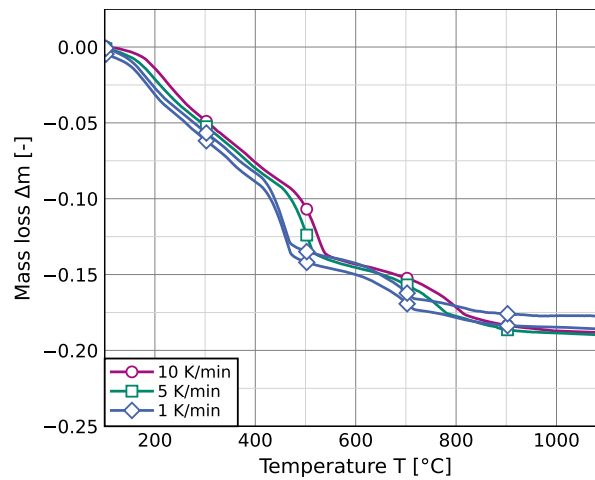


Abb. 2.7: Thermogravimetrische Untersuchung des Modellstoffs CEM-100 bei unterschiedlichen Aufheizraten (Tiegelgröße 5 g)

Daher wurde beschlossen, sich stattdessen auf eine Aufbereitungstemperatur von 600 °C zu fokussieren. Die Thermogravimetrieversuche in Abb. 2.6 legen nahe, dass bei dieser Temperatur der differenzielle Massenverlust (DTG) bei allen Modellstoffen gering ist, sodass von unvollständigen Erwärmungen weniger Auswirkungen auf die Dehydratation zu erwarten sind. Andererseits zeigt Abb. 2.8, dass bei einer Temperatur von 600 °C nur sehr geringe Mengen an klimaschädlichem CO₂ freigesetzt werden.

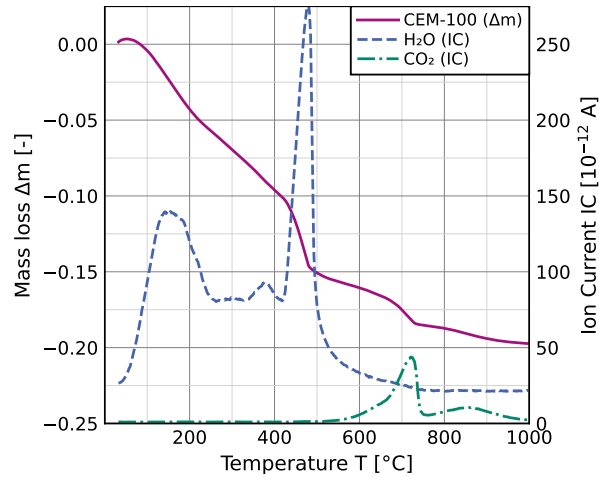


Abb. 2.8: Thermogravimetrische Messung am Modellstoff CEM-100 gekoppelt mit Massenspektroskopie zur qualitativen Identifikation der Abgabe von Wasser (H₂O) und Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Neben der Aufbereitungstemperatur von 600 °C wurden aus Abb. 2.6 und Abb. 2.8 zwei weitere Aufbereitungstemperaturen identifiziert. Bei einer Temperatur von 400 °C ist abgesehen von der Ca(OH)₂-Zersetzung der überwiegende Teil der Dehydratation abgeschlossen. Bei einer Aufbereitung bei 800 °C ist zudem ein hoher Anteil der Carbonate im Zementstein zersetzt, wobei sich der Abbau calcitischer Anteile der Gesteinskörnung bei höheren Temperaturen fortsetzt.

Um diese Vorauswahl der Aufbereitungstemperaturen detaillierter zu untersuchen, wurden Proben des gemahlten Modellstoffs CEM-100 im Umfang von jeweils 5 g in einem thermogravimetrischen Versuchsaufbau aufbereitet. Hierbei ließen sich die Aufheizrate [K/min], Zieltemperatur [°C], Haltedauer [h] und anfängliche Abkühlrate [K/min] in einer großen Bandbreite variieren. Insbesondere durch die unterschiedlichen Haltedauern, Aufheiz- und Abkühlraten konnte der Einfluss der Systemträgheit und damit der Steuerungsgenauigkeit aufgegriffen werden. Aus Zeitgründen konnten nur Einfachbestimmungen durchgeführt werden.

Die untersuchten Kombinationen der vier Parameter (Aufheizrate – Zieltemperatur – Haltedauer – Abkühlrate) umfassen:

- 1 K/min – 600 °C – 0 h – 10 K/min
- 5 K/min – 600 °C – 0 h – 10 K/min
- 10 K/min – 600 °C – 0 h – 10 K/min
- 5 K/min – 600 °C – 2 h – 10 K/min
- 10 K/min – 600 °C – 2 h – 10 K/min
- 5 K/min – 600 °C – 0 h – 5 K/min

- 5 K/min – 600 °C – 0 h – 20 K/min
- 5 K/min – 400 °C – 0 h – 10 K/min
- 5 K/min – 400 °C – 2 h – 10 K/min
- 5 K/min – 800 °C – 0 h – 10 K/min
- 5 K/min – 800 °C – 2 h – 10 K/min

Aus den derart aufbereiteten Proben wurden wiederum Teilproben entnommen und zunächst in einer erneuten thermogravimetrischen Untersuchung charakterisiert. Hierfür wurden Probenmassen von 160 mg bei einer Aufheizrate von 10 K/min untersucht. Abb. 2.9 zeigt die resultierenden Massenverluste in Abhängigkeit der Temperatur bis 1100 °C.

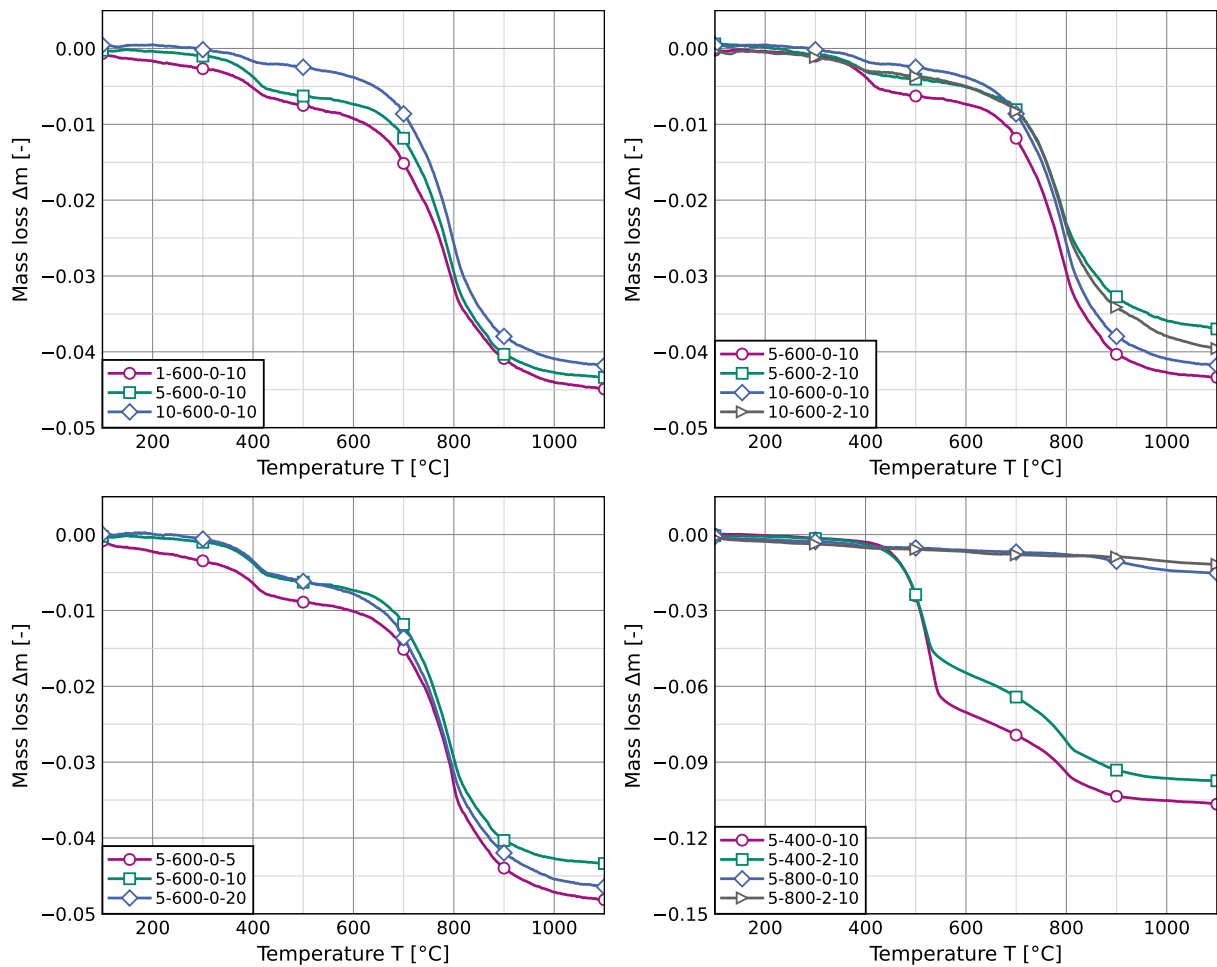


Abb. 2.9: Thermogravimetrische Untersuchung des aufbereiteten Modellstoffs CEM infolge unterschiedlicher Aufbereitungsrandbedingungen (Aufheizrate 10 K/min, Tiegelgröße 160 mg)

Bei einer idealen thermischen Aufbereitung wäre zu erwarten, dass die Kurvenverläufe bis zum erneuten Erreichen der Aufbereitungstemperatur konstant sind und erst anschließend einen erneuten Massenverlust aufweisen. Abb. 2.9 zeigt, dass dies bei keiner der Proben, die bei 600 °C aufbereitet wurden, der Fall ist – sämtliche Proben zeigen einen jeweils unterschiedlich ausgeprägten Massenverlust. Hierbei lässt sich jedoch keine systematische Beeinflussung durch die betrachteten Randbedingungen der Aufbereitung erkennen. Ersichtlich ist, dass ein erhöhter

Massenverlust jeweils bei ca. 400 °C stattfindet, die Zersetzung des Ca(OH)_2 bei ca. 500 °C jedoch in allen Fällen abgeschlossen ist. Dies legt nahe, dass es sich bei den beobachteten Massenverlusten um Verbindungen handelt, die nach der thermischen Behandlung entstehen, z. B. dadurch, dass die heißen Proben nach der Aufbereitung nicht unmittelbar aus dem Prüfgerät entnommen werden können. Gleichzeitig unterstreichen die Ergebnisse die Wichtigkeit einer schnellen Weiterverarbeitung der Proben.

Die Aufbereitungstemperaturen von 400 °C und 800 °C wurden lediglich hinsichtlich unterschiedlicher Haltedauern hin betrachtet. Hier zeigt sich, dass die Aufbereitung bei 800 °C im Gegensatz zur Aufbereitung bei 600 °C in beiden Fällen nur sehr geringe Massenverluste bei den erneuten thermogravimetrischen Messungen mit sich bringt. Auch beide Proben, die bei 400 °C aufbereitet wurden, zeigen nur einen geringen Massenverlust bis zur vorherigen Aufbereitungstemperatur. Hier ist jedoch ein plausibler Einfluss der Behandlungsdauer erkennbar: Eine Temperatur von 400 °C reicht nicht aus, um Ca(OH)_2 zu zersetzen. Eine Verlängerung der Aufbereitungsdauer kann sich jedoch ähnlich auswirken wie eine Reduktion der Aufheizrate (vgl. Abb. 2.7), sodass bei einer Dauer von 2 h eine geringe Menge des Ca(OH)_2 zersetzt wird.

Aufgrund der Chargengröße von 5 g konnten die aufbereiteten Proben für Hydrationswärmemessungen (Doppelbestimmung, 1,75 g CEM I, 0,75 g aufbereiteter CEM, 1,5 g Wasser) verwendet werden. Die Erhöhung des Verhältnisses von Wasser zu Bindemittel von 0,4 in den vorangegangenen Versuchen auf 0,6 brachte eine verbesserte Durchmischung der Proben mit sich. Die maßgebenden Kenngrößen der Wärmeflusskalorimetriemessungen sind in Tab. 2.4 dargestellt.

Tab. 2.4: Ergebnisse von Wärmeflusskalorimetriemessungen an aufbereiteten Proben des Modellstoffs CEM mit variierten Randbedingungen.

Probenbezeichnung: CEM-Aufheizrate K/min – Zieltemperatur °C – Haltedauer h – Abkühlrate K/min

Q_t : Hydrationswärme bis zum Zeitpunkt t , W_t : Hydrationswärmefluss zum Zeitpunkt t , t_b : Zeitpunkt des lokalen Minimums des Hydrationswärmeflusses, t_p : Zeitpunkt des lokalen Maximums des Hydrationswärmeflusses

	$Q_{0,5\text{ h}}$ J/g	t_b h	W_{t_b} mW/g	Q_{t_b} J/g	t_p h	W_{t_p} mW/g	Q_{t_p} J/g	$Q_{5\text{ d}}$ J/g
CEM I (acht Proben)	18,8	2,4	0,4	23,2	11,4	2,8	72,5	296,8
CEM-5K-400C-0h-10K	19,5	2,3	0,7	26,0	11,1	2,0	74,5	280,6
CEM-5K-400C-2h-10K	25,0	2,4	0,7	31,8	11,5	2,1	82,9	289,8
CEM-1K-600C-0h-10K	46,2	2,9	0,7	56,2	12,0	2,5	109,5	312,8
CEM-5K-600C-0h-5K	51,7	3,0	0,6	60,9	12,0	2,4	111,2	310,4
CEM-5K-600C-0h-10K	51,0	3,0	0,6	60,3	11,9	2,4	110,7	313,8
CEM-5K-600C-0h-20K	50,9	3,1	0,5	59,6	12,2	2,4	109,7	311,5
CEM-5K-600C-2h-10K	52,1	3,0	0,6	62,0	12,0	2,3	111,8	305,0
CEM-10K-600C-0h-10K	43,1	2,6	0,6	51,1	11,8	2,3	99,8	293,1
CEM-10K-600C-2h-10K	40,3	2,8	0,8	52,6	11,4	2,2	100,6	287,8
CEM-5K-800C-0h-10K	79,5	2,3	0,8	86,8	9,5	1,7	120,1	295,8
CEM-5K-800C-2h-10K	82,1	2,0	0,7	88,0	9,0	1,5	117,1	276,7

Die Versuchsergebnisse lassen darauf schließen, dass weder die Aufheiz-, noch die Abkühlrate einen messbaren Einfluss auf die Hydrationswärmeentwicklung haben. Aufgrund der kleinen Probengröße ist zudem ersichtlich, dass (mit Ausnahme der Aufbereitungstemperatur von 400 °C, was sich aber nur begrenzt in den Wärmeflusskalorimetriemessungen zeigt) die Dehydratation bereits mit Erreichen der Zieltemperatur abgeschlossen ist und eine zusätzliche Haltezeit keinen Einfluss zeigt. Es zeigt sich eine mit steigender Aufbereitungstemperatur beschleunigte Hydrationswärmeentwicklung. Während die Wärmeentwicklung der bei 400 °C aufbereiteten Proben der Vergleichsmessung mit reinem CEM I am ehesten ähnelt, nimmt die Wärmeabgabe in den ersten 30 min nach dem Kontakt mit Wasser für die bei 600 °C und 800 °C behandelten Proben stark zu. Bei 800 °C ist zudem eine Verschiebung des lokalen Wärmeflussmaximums hin zu früheren Zeitpunkten ersichtlich.

Im Rahmen weiterer Vorversuche wurde der Modellstoff CEM in unterschiedlichen Tiegeln für 3 h bzw. 6 h in einem statischen Hochtemperaturofen aufbereitet. Die Zieltemperatur lag bei 600 °C, die jeweils nach einer Aufheizung innerhalb von 2 h erreicht wurde (Aufheizrate 5 K/min). Unmittelbar nach Beendigung der voreingestellten Versuchsdauer wurde der Ofen automatisch geöffnet und die Proben in ihren abgedeckten Tiegeln an Laborluft gekühlt. Anschließend wurden an Teilproben Thermogravimetriemessungen durchgeführt, die in Abb. 2.10 abgebildet sind.

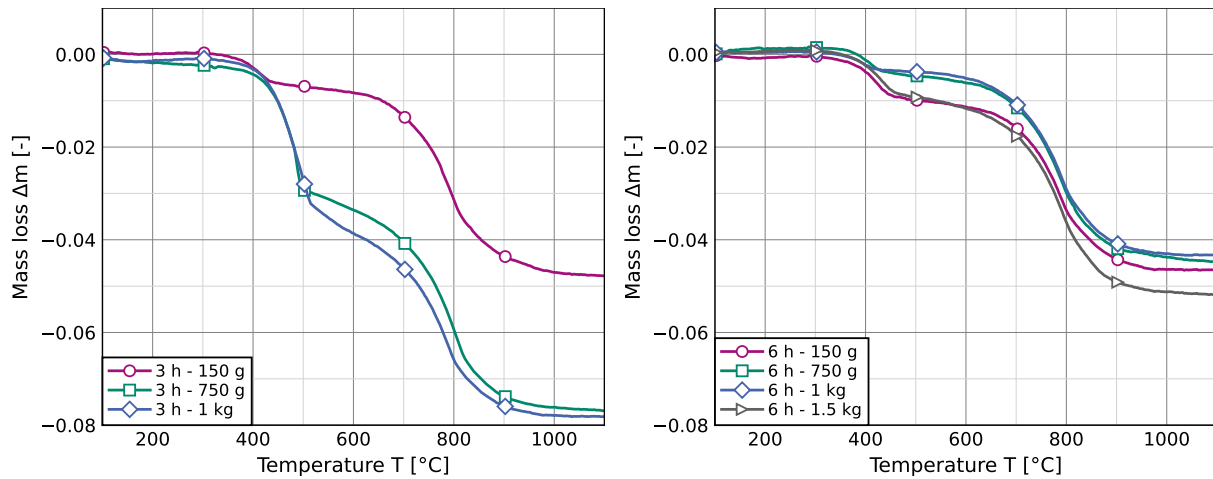


Abb. 2.10: Thermogravimetrische Untersuchung des aufbereiteten Modellstoffs CEM infolge unterschiedlicher Tiegelgrößen und Aufbereitungsdauern im statischen Ofen (Aufheizrate 10 K/min, Tiegelgröße 160 mg)

Die Messungen verdeutlichen eine gegenseitige Beeinflussung zwischen Tiegelgröße und Aufbereitungsdauer: Während kleine Tiegel bereits nach 3 h eine ähnlich erfolgreiche Aufbereitung zeigen wie die Proben in Abb. 2.9, zeigen größere Proben (untersucht wurden 0,75 kg und 1,0 kg) einen deutlich erhöhten Massenverlust zwischen 400 °C und 600 °C, was nahelegt, dass die Proben nicht vollständig durchgehitzt wurden. Folglich sind bei größeren Proben längere Aufbereitungstemperaturen erforderlich. Bei allen betrachteten Probengrößen bis 1,5 kg erwiesen sich jedoch 6 h als ausreichend.

Zum Abschluss des Projekts wurde in Ergänzung zu den am KIT-<sup>IMB
MPA
CMM</sup> vorhandenen statischen Öfen ein Drehrohrföfen angeschafft. Hierbei wird im Gegensatz zur Aufbereitung in Tiegeln die Probe während der Erwärmung fortlaufend umgewälzt, sodass sich eine homogene Temperaturverteilung einstellt. Die Aufheizrate betrug in allen vier Versuchen 5 K/min. Die Proben wurden

an Laborluft in ihren Behältern gekühlt und nach Erreichen einer Temperatur $< 200^\circ\text{C}$ in Exsikkatoren gelagert. Abb. 2.11 zeigt die Ergebnisse der thermogravimetrischen Untersuchungen an dem entsprechend aufbereiteten Modellstoff CEM.

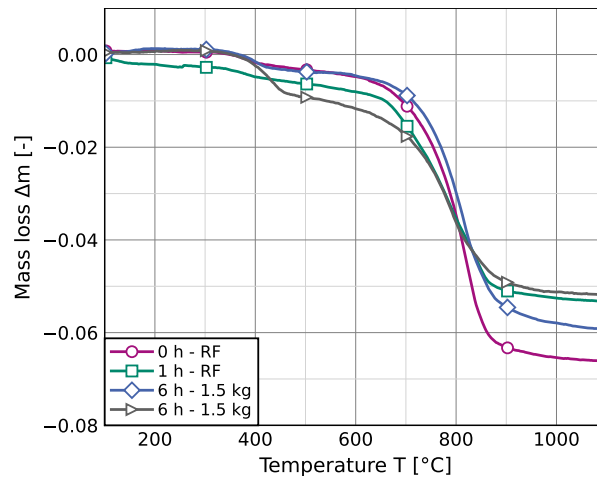


Abb. 2.11: Thermogravimetrische Untersuchung des im statischen Ofen (1,5 kg) und im Drehrohrföfen (RF) aufbereiteten Modellstoffs CEM (Aufheizrate 10 K/min, Tiegelgröße 160 mg)

Hierbei wird deutlich, dass die Probe, bei der die Wärmebehandlung unmittelbar nach Erreichen der Zieltemperatur von 600°C beendet wurde (0 h), im Anschluss den geringsten Massenverlust unterhalb von 600°C aufwies. Eine Verlängerung der Aufbereitung um 1 h brachte keinen zusätzlichen Nutzen, wobei der Massenverlust anschließend geringfügig erhöht war. Hierbei lässt sich analog zu den vorangegangenen Versuchen im statischen Ofen ein Einfluss der Lagerung vermuten. Alle Proben weisen unterschiedliche Massenverluste oberhalb 700°C auf, wobei hier keine Systematik erkennbar ist.

Zum Abschluss der Vorversuche wurde untersucht, ob die thermische Aufbereitung Auswirkungen auf die Partikelgrößenverteilung hat. Hierbei wurden für die Modellstoffe CEM und RS50 Lasergranulometriemessungen an Proben, die bei 400°C , 600°C und 800°C aufbereitet wurden, durchgeführt. Die Ergebnisse in Abb. 2.12 zeigen keine systematische Änderung der Partikelgrößenverteilungen infolge der thermischen Aufbereitung.

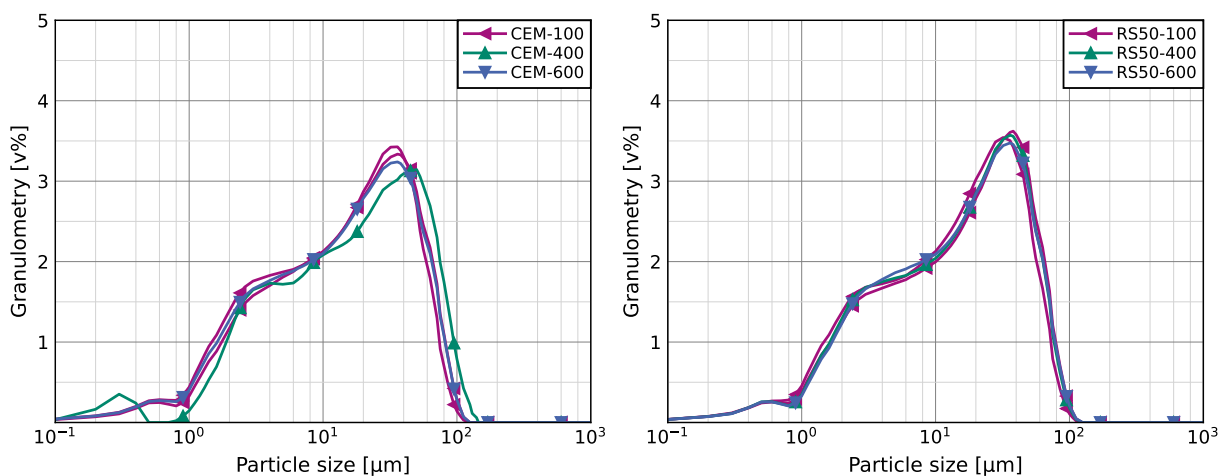


Abb. 2.12: Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe CEM und RS50 nach der thermischen Aufbereitung bei unterschiedlichen Temperaturen

2.1.4 Modellstoffe: Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe

Aufbauend auf den in Abschnitt 2.1.3 dargestellten Ergebnissen wurde das Verfahren für die thermische Aufbereitung festgelegt: Die gemahlten Modellstoffe wurden mit einer Masse von 1,0 kg in einem statischen Ofen in abgedeckten Tiegeln mit einem Fassungsvermögen von 2,5 l bei drei unterschiedlichen Temperaturen (400 °C, 600 °C und 800 °C) behandelt. Die Aufheizrate betrug jeweils 5 K/min und die Verweilzeit bei der Zieltemperatur 6 h. Anschließend wurden die Tiegel automatisch aus dem Ofen gefahren und an Laborluft abgekühlt, bis sie in einen Exsikkator gestellt werden konnten. Die Probenbezeichnungen setzen sich demnach aus dem Modellstoff und der Aufbereitungstemperatur zusammen. Zusätzlich wurden alle Modellstoffe ohne thermische Behandlung nach der Mahlung geprüft; als Aufbereitungstemperatur wird hier die Trocknungstemperatur zu 100 °C verwendet.

Anhand von Hydratationswärmeflusskalorimetriemessungen wurde im ersten Schritt der Hauptversuche das Hydratationsverhalten der aufbereiteten Modellstoffe im Zusammenspiel mit CEM I untersucht. Hierfür wurden jeweils 2,5 g Bindemittel mit 1,5 g Wasser bei 20 °C für 60 s vermischt und die resultierenden Wärmeeflüsse ab Beginn der Wasserzugabe gegen eine Referenzprobe gleicher Wärmespeicherkapazität gemessen. Für den Ausgangsstoff CEM I wurde eine Achtfachbestimmung durchgeführt, um die Wiederholpräzision zu quantifizieren und Standardabweichungen zu bestimmen. Ebenfalls wurden die Wärmeflusskalorimetriemessungen der Referenzmaterialien S, FA und L mit 1,75 g CEM I, 0,75 g Betonzusatzstoff und 1,5 g Wasser wiederholt. Die tabellarischen Ergebnisse der Untersuchungen enthalten Tab. B.10 und Tab. B.11.

Im ersten Schritt wurde der Einfluss der Aufbereitungstemperatur für die unterschiedlichen Modellstoffzusammensetzungen untersucht. Hierbei wurden 30 m% des CEM I durch die aufbereiteten Modellstoffe ersetzt. Abb. 2.13 enthält die Mittelwerte der Doppelbestimmungen für die Modellstoffe CEM, RS50, S0 und FA0.

Für den Modellstoff CEM zeigen die Ergebnisse einen deutlichen Einfluss der Aufbereitungstemperatur: In den ersten Minuten nach der Wasserzugabe weisen die Mischungen aus CEM I mit thermisch aktiviertem Modellstoff CEM mit steigender Temperatur eine deutlich erhöhte Wärmeabgabe auf. Anschließend geht die Wärmeabgabe bei allen Mischungen zurück. Im Vergleich zu reinem CEM I findet bei Mischungen mit allen vier aufbereiteten CEM-Proben eine erhöhte Wärmeabgabe in den ersten 6 h der Messungen statt. Anschließend weisen die Kurven einen flacheren Verlauf als die Referenzprobe aus reinem CEM I auf – die Wärmeabgabe ist in Abhängigkeit der Aufbereitungstemperatur reduziert. CEM-600 zeigt das höchste lokale Maximum, wobei sich die insgesamt innerhalb von 5 d abgegebene Wärmemenge zwischen CEM-600 und CEM-400 kaum unterscheidet. Der Modellstoff CEM-100 weist die niedrigste Hydratationswärmeabgabe auf. Das Verhalten infolge des Modellstoffs CEM-800 ist jedoch besonders auffällig: Obwohl nur 30 m% des CEM I ausgetauscht wurden, ist die Höhe des lokalen Maximums des Hydratationswärmeefflusses um ca. 50 % reduziert und findet zudem deutlich früher statt. Anschließend verläuft die Hydratationswärmeefflusskurve der Mischung aus CEM I und CEM-800

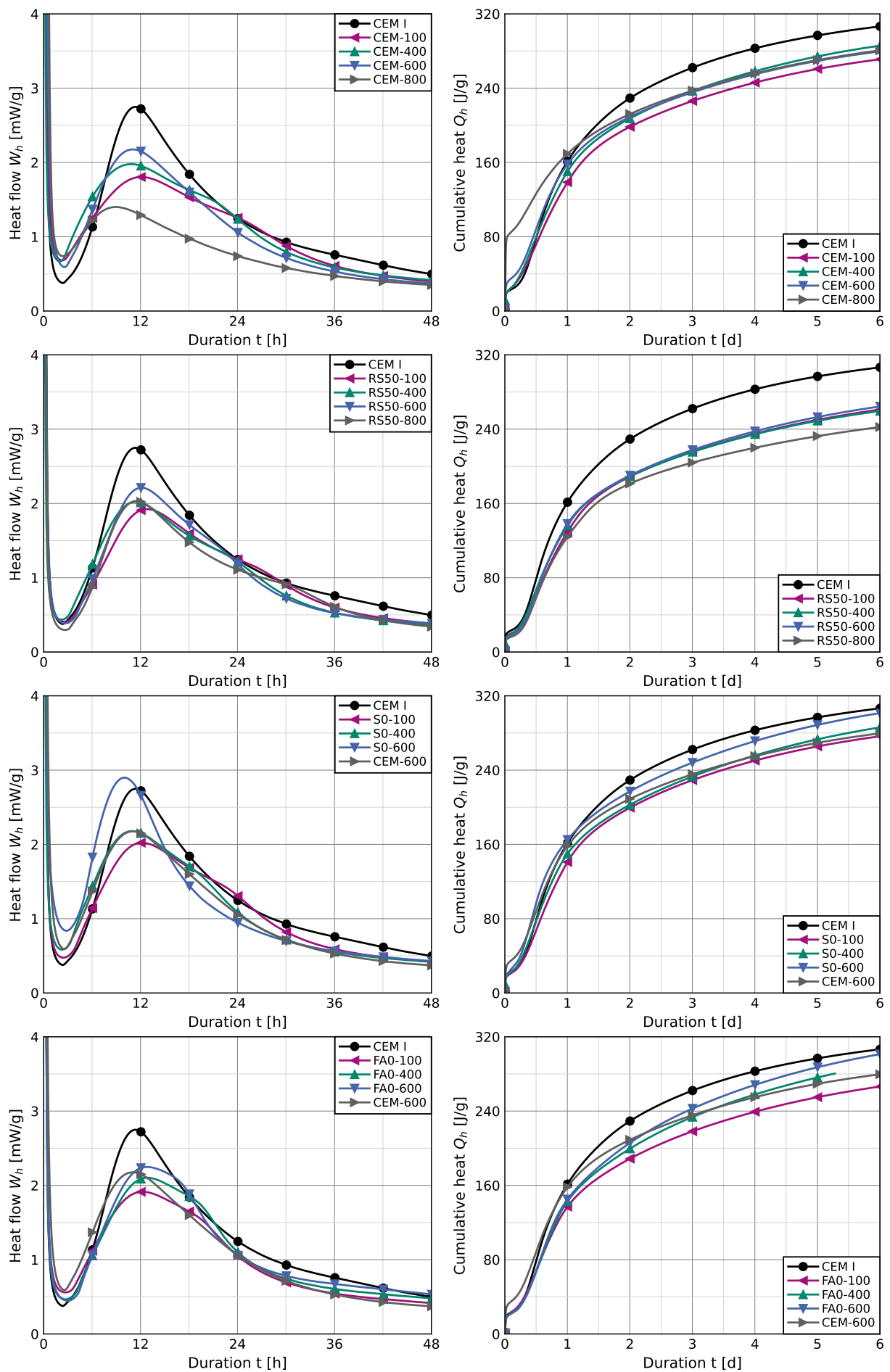


Abb. 2.13: Hydratationswärmeflüsse von ausgewählten Mischungen aus 70 m% CEM I und 30 m% aufbereiteter Modellstoffe für verschiedene Temperaturen

deutlich flacher als die der anderen untersuchten Mischungen. Insgesamt erreicht keine der untersuchten Mischungen aus CEM I und thermisch aktiviertem Modellstoff CEM die kumulativ abgegebene Wärmemenge des reinen CEM I.

Auf den Modellstoff RS50 sind diese Beobachtungen nur eingeschränkt übertragbar, wenn gleich sich analoge Tendenzen zeigen. Dabei wird die Analyse dadurch erschwert, dass in den Kalorimetriemessungen reaktiver CEM I 70 m% der Feststoffmenge ausmacht. Zudem besteht RS50 gemäß dem Mischungsentwurf aus CEM I und Rheinsand in einem Massenverhältnis von 0,46, sodass sich der Anteil des potentiell reaktivierten Zementsteins an der Feststoffmenge der Kalorimetrie einwaage von 30 m% für CEM auf 9,4 m% für RS50 reduziert. Die Hydratationswärmeabgabe wird dementsprechend in geringerem Maße von der Aufbereitungstemperatur beeinflusst. Die Modellstoffe RS50-100, RS50-400 und RS50-600 weisen nahezu die gleichen Hydratationswärmeabgaben auf, wobei der Modellstoff RS50-600 analog zu CEM-600 das höchste lokale Maximum aufweist. RS50-800 wirkt sich im Vergleich zu CEM-800 weniger ausgeprägt auf die Hydratationswärmeabgabe aus, bringt jedoch insgesamt eine geringere Wärmeabgabe mit sich als RS50-100. Alle Mischungen aus CEM I mit thermisch aufbereitetem Modellstoff RS50 geben kumulativ weniger Wärme ab als die entsprechenden Mischungen aus CEM I mit dem Modellstoff CEM.

Modellstoffe, deren Zementsteinmatrix aus Hydratationsprodukten von CEM I und Hütten sand (S0) oder Steinkohlenflugasche (FA0) bestehen, zeigen ein vom aufbereiteten Modellstoff CEM abweichendes Verhalten. Verglichen mit CEM-600 ist die kumulierte Hydratationswärmeabgabe von S0-600 deutlich erhöht und erreicht das Niveau von reinem CEM I, wobei das lokale Maximum des Hydratationswärmefflusses etwas früher erreicht wird und höher ausfällt. S0-100 und S0-400 zeigen eine gegenüber CEM-100 bzw. CEM-400 ebenfalls leicht erhöhte Wärmeabgabe. Die Wärmeabgabe in den ersten Minuten nach Wasserzugabe ist jedoch im Vergleich zu insbesondere CEM-600 deutlich reduziert und ähnelt der von reinem CEM I. Gleiches gilt für den Modellstoff FA0, wobei hier abgesehen von der initialen Wärmeabgabe in den ersten 24 h nach Wasserzugabe keine erhöhte Wärmeabgabe feststellbar ist. Anschließend weisen die aufbereiteten Materialien – unabhängig von der Aufbereitungstemperatur – einen erhöhten Hydratationswärmeffluss auf.

Abb. 2.14 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für bei 600 °C aufbereitete Modellstoffe mit unterschiedlichem Rheinsandgehalt. Hierbei lässt sich eine mit sinkendem Zementsteingehalt abnehmende Hydratationswärmeabgabe beobachten. Weitere Details lassen sich jedoch in Betracht der Streuung der Versuchsergebnisse nicht ablesen.

Abb. 2.15 stellt die Wärmefflusskurven von Modellstoffen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungsarten einander gegenüber. Die einzelnen Messergebnisse liegen eng beieinander, sodass Interpretationen vor dem Hintergrund der Streuung der Versuchsergebnisse erschwert werden. Hier lässt sich einerseits beobachten, dass die Aufbereitungstemperatur nur einen untergeordneten Einfluss auf die Hydratationswärmeabgabe hat. Ebenso verhält es sich mit der Art der Gesteinskörnung. Hier lässt sich erkennen, dass der Modellstoff mit 50 v% Grauwacke (GW50) eine verringerte Hydratationswärmeabgabe zu Beginn der Hydratation zeigt, was jedoch im weiteren

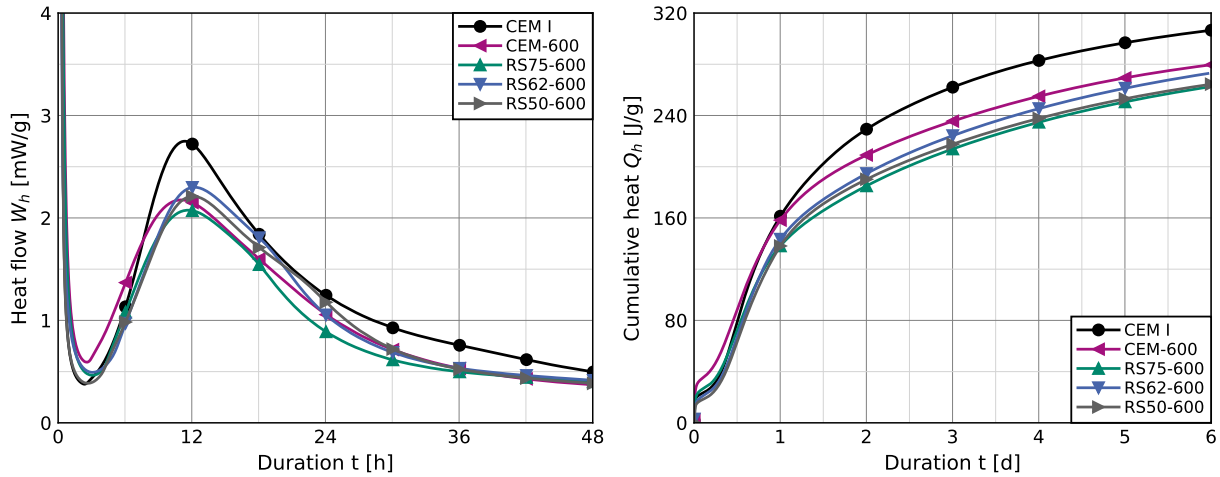


Abb. 2.14: Hydratationswärmeflüsse von ausgewählten Mischungen aus 70 m% CEM I und 30 m% bei 600 °C aufbereiteten Modellstoffen für verschiedene Rheinsandgehalte

Verlauf kompensiert wird. Modellstoffe mit 75 v% Zementsteingehalt zeigen jeweils geringfügig erhöhte kumulative Hydratationswärmeabgaben.

In Abb. 2.16 werden die Ergebnisse von Hydratationswärmeflussmessungen an den aufbereiteten Modellstoffen CEM-400, CEM-600, S0-600 und FA0-600 für unterschiedliche Austauschraten des CEM I (10 m%, 30 m%, 50 m% und 100 m%) einander und den Ergebnissen von Mischungen aus 70 m% CEM I mit jeweils 30 m% Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L) gegenübergestellt.

Die Versuchsergebnisse in Abb. 2.16 zeigen einerseits deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Modellstoffen untereinander, als auch zwischen den Austauschraten eines jeweiligen aufbereiteten Modellstoffs.

Eine Aufbereitung des Modellstoffs CEM bei 400 °C erzeugt ein Bindemittel, das eine hydraulische Reaktivität aufweist. Die kumulative Hydratationswärmeabgabe des reinen CEM-400 entspricht nach 5 d 55 % der Wärmeabgabe von CEM I. Ausgehend von den Ergebnissen für reinen CEM I reduziert sich die Hydratationswärmeabgabe mit steigender Austauschrate, wobei eine Mischung mit 50 m% CEM-400 eine höhere Hydratationswärmeabgabe aufweist als eine Mischung mit 30 m% inertem Kalksteinmehl. Die Betrachtung der Wärmeflüsse zeigt ein differenziertes Bild: CEM-400 gibt in den ersten Minuten nach Wasserzugabe mehr Wärme ab als CEM I. Der Wärmefluss von reinem CEM-400 fällt danach auf ein Plateau ab, während Mischungen mit CEM I zu einem lokalen Maximum ansteigen. Bei einem Austausch von 50 m% des CEM I durch CEM-400 verringert sich der Hydratationswärmefluss nach Erreichen des Maximums stärker als bei einem Austausch von 30 m%.

CEM-600 ist ebenfalls hydraulisch reaktiv, wobei die Hydratationswärmeabgabe nach 5 d 84 % des CEM I entspricht. Die Differenz zu CEM-400 entspricht ungefähr der Hydratationswärmeabgabe innerhalb der ersten Stunde nach der Wasserzugabe, wobei der Wärmefluss von CEM-600 im Gegensatz zu CEM-400 nach 10 h ein klar erkennbares Maximum aufweist. Anschließend reduziert sich der Hydratationswärmefluss jedoch stärker als bei CEM-400. Mischungen aus CEM I und CEM-600 ordnen sich entsprechend ihrer Austauschraten zwischen den reinen Bindemitteln ein.

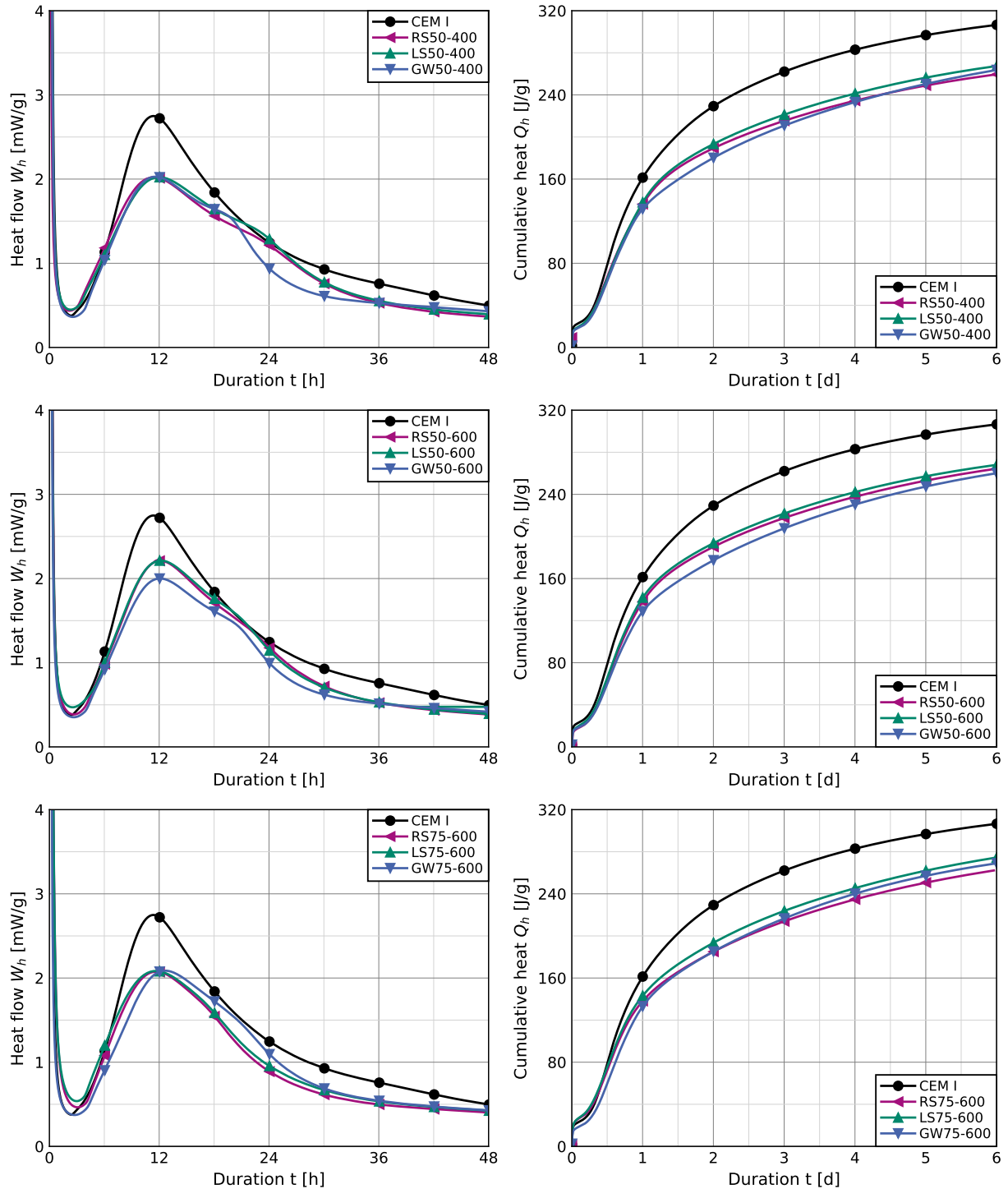


Abb. 2.15: Hydratationswärmeflüsse von ausgewählten Mischungen aus 70 m% CEM I und 30 m% bei 400 °C und 600 °C aufbereiteter Modellstoffe für verschiedene Gesteinskörnungsarten und -gehalte

Auch S0-600 zeigt eine hydraulische Reaktivität, die mit einer größeren Hydratationswärmeabgabe verbunden ist als CEM-600 und nach 5 d 98 % der Hydratationswärme von CEM I erreicht. Die Betrachtung der Hydratationswärmeflüsse zeigt einen ausgeglicheneren Verlauf als CEM I, mit einem deutlich erhöhten lokalen Minimum nach 3 h und einem reduzierten und zeitlich nach hinten verschobenen Maximum nach 15 h, sodass der Wärmefluss vor dem Minimum und nach dem Maximum jeweils oberhalb von CEM I liegt. Die Lage der Minima und Maxima

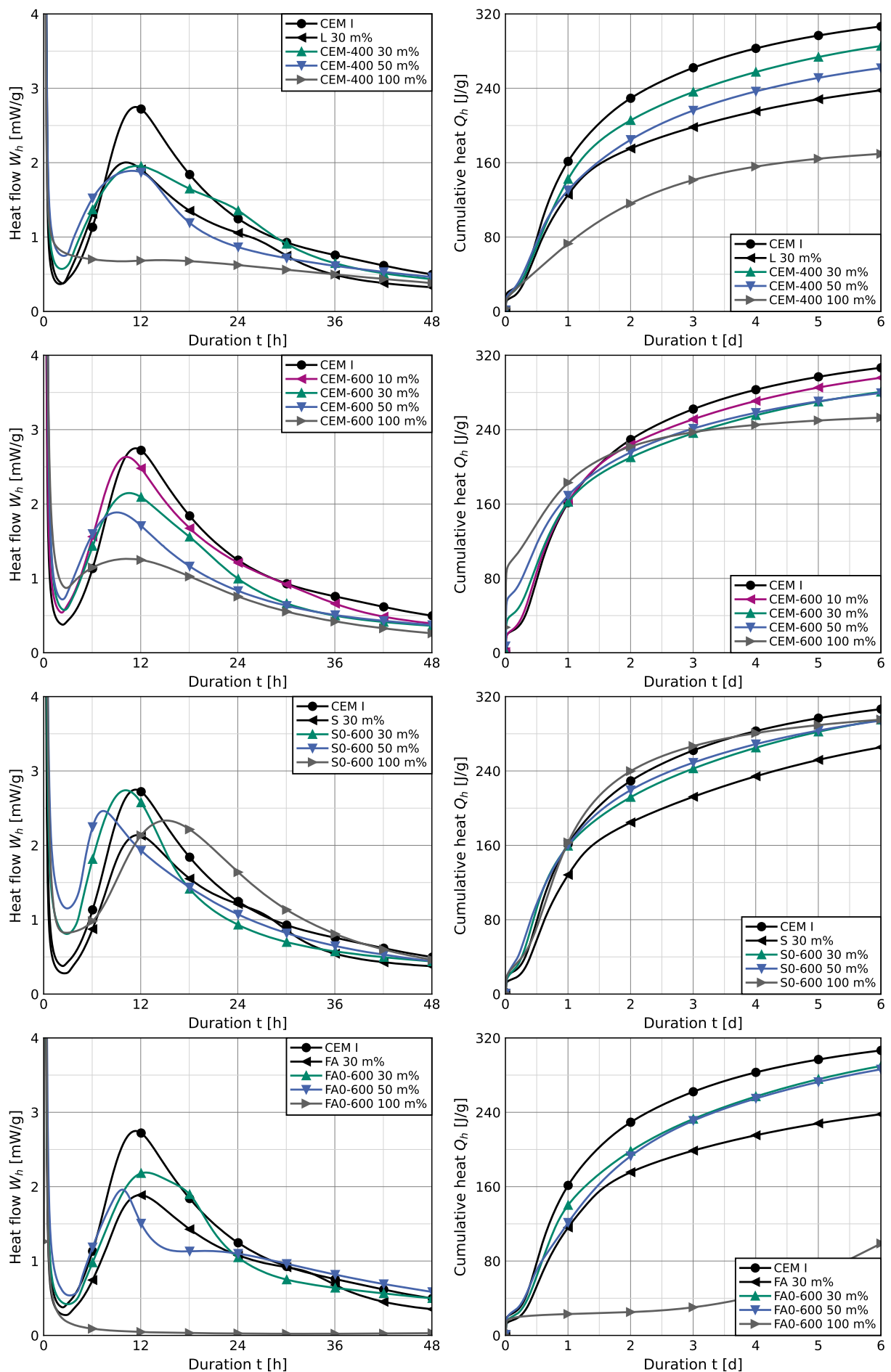


Abb. 2.16: Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus CEM I und CEM-400, CEM-600, S0-600 und FA0-600 für unterschiedliche Austauschraten sowie Mischungen aus 70 m% CEM I mit jeweils 30 m% Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L)

von Mischungen mit 30 m% und 50 m% S0-600 sind ebenfalls verändert, wobei sich jedoch kein systematischer Zusammenhang mit der Austauschrate erkennen lässt. Ebenso weisen die Hydrationswärmefflüsse von S0-600 keine Ähnlichkeiten zur betrachteten Mischung aus CEM I und Hüttensand auf.

Bei einer Betrachtung des Modellstoffs FA0-600 ist nach dem Abklingen des initialen Wärmefflusses innerhalb der ersten Stunden nach Wasserzugabe kein hydraulisches Verhalten erkennbar. Erst nach mehreren Tagen steigt die Hydrationswärmeabgabe messbar an; ein lokales Maximum wird nach 163 h erreicht. Jedoch wurde die Messung aufgrund des engen Zeitplans nach 6 d beendet. Mischungen aus CEM I und FA0-600 zeigen keine Ähnlichkeit zur Mischung aus CEM I mit 30 m% FA, wobei die Mischung mit 50 m% FA0-600 nach Erreichen des lokalen Maximums auf ein Plateau abfällt.

In der Gesamtschau zeigen die vorliegenden Ergebnisse der Hydrationswärmefflussmessungen einen deutlichen Einfluss der Aufbereitungstemperatur, der Bindemittelzusammensetzung und – in geringerem Maße – des Gesteinskörnungsgehalts. Die Art der Gesteinskörnung ist für die Hydrationswärmeabgabe von untergeordneter Bedeutung. Das Verhältnis von CEM I zu thermisch aufbereiteten Modellstoffen bringt zusätzliche Effekte ein, die sich mit den zuvor genannten Faktoren überlagern und interagieren. Die hierbei beobachteten Effekte lassen sich mit den vorhandenen Ergebnissen nicht abschließend klären, wobei insbesondere die in Abschnitt 2.1.3 aufgeworfene Hypothese der unvollständigen Reaktion der Flugasche in Zusammenhang mit der Reduktion des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts einfließt.

2.1.5 Modellstoffe: Mörtелеigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe

2.1.5.1 Probenherstellung

Zur Beurteilung der Auswirkung des teilweisen Portlandzementaustauschs durch thermisch-mechanisch aufbereitete Modellstoffe auf die Festigkeitsentwicklung von Mörteln wurden insgesamt 171 Mörtelmischungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung hergestellt. Alle Mörtel hatten jeweils einen Leimanteil von $v_l = 50 \text{ v\%}$ mit Rheinsand als Gesteinskörnung. Die Basis-mischung mit einem Wasserzementwert von $\frac{w}{z} = 0,50$ war somit identisch mit dem Modellstoff RS50. Je Mischung wurden sechs – in gesonderten Fällen 12 – Prismen mit den Abmessungen $(20 \times 20 \times 80) \text{ mm}^3$ hergestellt. Nach dem Ausschalen wurden die Proben bis zum Prüfalter von 2 d und 28 d unter Wasser bei 20°C gelagert. Für Mischungen mit 12 Proben wurden zusätzliche Prüfungen nach 1 d und 7 d festgelegt. Je Prüfalter wurden drei Prismen auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft; die Prüfungsgeschwindigkeiten beliefen sich auf 10 N/s für Biegezugversuche mit einer Spannweite von 50 mm und 600 N/s für Druckversuche mit Stempelabmessungen von $(20 \times 20) \text{ mm}^2$.

Für die Analyse der Auswirkungen von thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen auf die Festigkeit wurden Probensätze aus jeweils drei Mischungen ($f = 0,3$ bei $\frac{w}{b} = 0,50$, $f = 0,3$ bei $\frac{w}{b} = 0,40$ und $f = 0,1$ bei $\frac{w}{b} = 0,50$) hergestellt. Die Mischungen mit $f = 0,5$ bei $\frac{w}{b} = 0,50$ fanden nur vereinzelt Anwendung. Auf die Parameterkombination $f = 0,1$ bei $\frac{w}{b} = 0,50$ wurde bei Modellstoffen, die bei 100°C getrocknet wurden, i. d. R. verzichtet. Zur Verbesserung der Datengrundlage wurden an einigen Serien Doppelbestimmungen aus zwei Aufbereitungschargen

durchgeführt. Die Matrix der Modellstoffe wurde dabei für zwei Probensätze um die Materialien „LS0“ und „RS0“ erweitert. Hierfür wurden die jeweils verwendeten Gesteinskörnungen auf Korngrößen $< 125 \mu\text{m}$ aufgemahlen.

Die Verarbeitbarkeit der Mischungen wurde während der Mischvorgänge durch die individuelle Dosierung eines PCE-basierten Fließmittels eingestellt, sodass das Ausbreitmaß, gemessen nach DIN EN 1015-3:2007-05, zwischen 15 cm und 18 cm lag. Der Wassergehalt des Fließmittels (70 m%) wurde nachträglich in den weiteren Berechnungen durch eine Erhöhung des $\frac{w}{b}$ -Werts berücksichtigt, wenngleich weiterhin der nominelle $\frac{w}{b}$ -Wert für die Identifikation der Mischungen verwendet wird.

Die Basis für die experimentellen Untersuchungen bildeten 14 Serien mit CEM I als Bindemittel, wobei Sand und Zement aus drei unterschiedlichen Teilchargen stammten. Zunächst wurden zwei Sätze aus je vier Mischungen mit $\frac{w}{z} = \{0,45; 0,50; 0,55; 0,60\}$ angemischt, wobei beim zweiten Probensatz jeweils zwölf Prismen hergestellt wurden. Der dritte Probensatz setzte sich aus sechs Serien mit zusätzlichen $\frac{w}{z}$ -Werten von 0,40 und 0,65 zusammen.

Tabellarische Darstellungen der Ergebnisse der Mörteldruckfestigkeitsversuche sind in Tab. B.13, Tab. B.14, Tab. B.15, Tab. B.16, Tab. B.17 und Tab. B.18 enthalten.

2.1.5.2 Untersuchungen zur Festigkeitsentwicklung

Zur Analyse der Festigkeitsentwicklung der hergestellten Mörtelmischungen wurden zwei grundlegende Ansätze verwendet. Der Quotient R_2 nach Gleichung 2.1 beschreibt das Verhältnis der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 2 d und 28 d und wurde für alle Mischungen bestimmt.

$$R_2 = \frac{f_{c,2d}}{f_{c,28d}} \quad (2.1)$$

Abbildung 2.17 zeigt Ergebnisse für die Mörteldruckfestigkeit f_c im Alter von 2 d und 28 d für unterschiedliche Zusammensetzungen, bei denen thermisch-mechanisch aktivierte Modellstoffe CEM I teilweise substituieren. Der Quotient ergibt sich in der vorliegenden Darstellung aus Ursprungsgeraden unterschiedlicher Steigung. Abgesehen von der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d, die wiederum stark vom Betonzusatzstoffanteil und vom $\frac{w}{b}$ -Wert abhängt, kann kein systematischer Einfluss (z. B. durch die Modellstoffzusammensetzung oder Aufbereitungstemperatur) der Betonzusatzstoffverwendung auf R_2 festgestellt werden.

Die resultierenden Werte für R_2 entsprechen damit den Ergebnissen für CEM I-Mörtel mit unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten. Diese reichen von $R_2 = 0,46$ für $\frac{w}{z} = 0,60$ (mit $f_{c,28d} = 40,4 \text{ MPa}$) über $R_2 = 0,50$ für $\frac{w}{z} = 0,55$ (mit $f_{c,28d} = 48,0 \text{ MPa}$) und $R_2 = 0,51$ für $\frac{w}{z} = 0,50$ (mit $f_{c,28d} = 53,3 \text{ MPa}$) bis zu $R_2 = 0,62$ für $\frac{w}{z} = 0,45$ (mit $f_{c,28d} = 56,3 \text{ MPa}$) [jeweils Mittelwerte aus drei Serien].

Zusätzlich wurde Gleichung 14.6-45 aus [3] adaptiert und mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate an die Versuchsergebnisse von Mischungen, die zu vier Zeitpunkten geprüft wurden, angepasst (Gleichung 2.2).

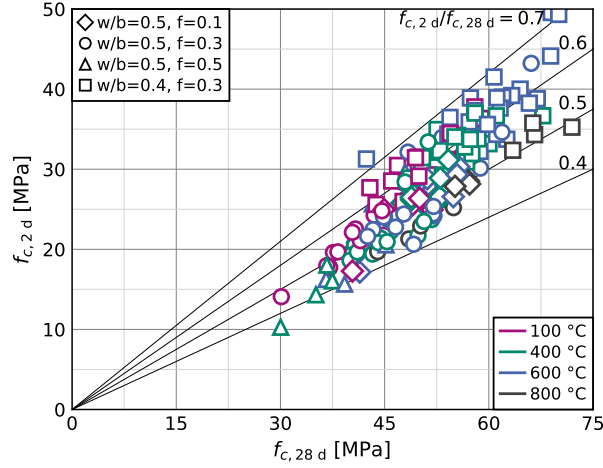


Abb. 2.17: Mörteldruckfestigkeit f_c im Alter von 2 d in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d für unterschiedliche Mischungen, bei denen CEM I partiell durch aufbereitete Modellstoffe substituiert wurde. Symbole geben die Mischungszusammensetzung an, Farben die Aufbereitungstemperatur der Modellstoffe

$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{c,28d} \quad \text{mit} \quad (2.2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s_c \cdot \left[1 - \left(\frac{28}{t} \right)^r \right] \right\} \quad (2.3)$$

Der Parameter r beträgt bindemittelunabhängig 0,5. Eine globale Analyse ergab, dass dadurch die Festigkeitsentwicklung der vorliegenden Mörtel im Alter von 7 d unterschätzt wird. Eine globale Verwendung von $r = 0,85$ würde eine bessere Anpassung an die Versuchsdaten erlauben. Dennoch wurde für die anschließende Bewertung der aktivierten Modellstoffe $r = 0,5$ angewendet, um einen besseren Vergleich mit den in [3] angegebenen Werten zu ermöglichen. Anschließend wurde der Parameter s_c für jede einzelne Mischung berechnet.

Abbildung 2.18 und Abb. 2.19 veranschaulichen die Ergebnisse für $f_c(t)$ und $\beta_{cc}(t)$, die an Mörteln mit CEM I mit unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten gemessen bzw. berechnet wurden. Es zeigten sich die erwartete Steigerung der Druckfestigkeit mit sinkendem $\frac{w}{z}$ -Wert sowie eine mit steigender Festigkeit beschleunigte Anfangsfestigkeitsentwicklung. Die mittels Regressionsanalyse berechneten Parameter s_c liegen zwischen 0,20 für $\frac{w}{z} = 0,45$ und 0,32 für $\frac{w}{z} = 0,60$. Damit entsprechen die Werte für s_c den in [3] Werten von 0,3 und 0,2 für CEM I 42,5 R für charakteristisch Betondruckfestigkeiten $f_{ck} \leq 35$ MPa bzw. 35 MPa $< f_{ck} < 60$ MPa.

In Abb. 2.19 sind die entsprechenden berechneten Kurven von $\beta_{cc}(t)$ für vier Basismischungen aus CEM I und zehn Mischungen mit CEM I-Substitution durch thermisch aktivierte Modellstoffe ($f = 0,3$ bei $\frac{w}{b} = 0,50$) abgebildet. Als Betonzusatzstoffe wurden die Modellstoffe CEM, RS75, RS62 und RS50 verwendet, die bei 400 °C, 600 °C und 800 °C thermisch aufbereitet wurden. Festigkeitsprüfungen fanden im Alter von 1 d, 2 d, 7 d und 28 d an jeweils drei Prismen statt. Der Austausch von CEM I durch aktivierte Modellstoffe führt allgemein zu sinkenden Festigkeiten im Alter von 28 d. Davon abgesehen wird die relative zeitliche Festigkeitsentwicklung, illustriert durch die Zeitfunktionen $\beta_{cc}(t)$, jedoch nicht beeinflusst. Die ermittelten Werte für s_c liegen zwischen 0,19 für RS62-400 und 0,32 für CEM-800.

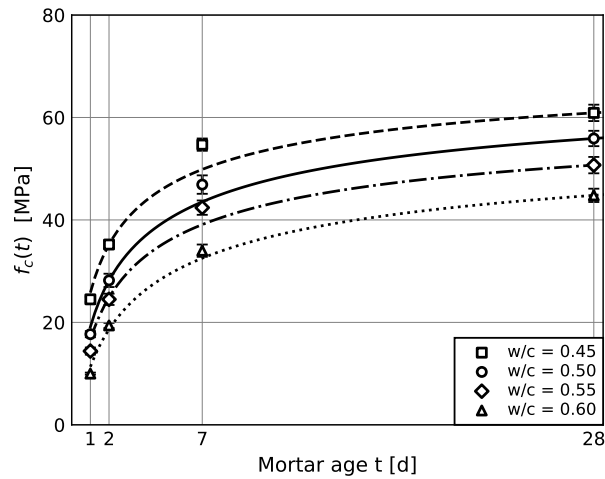


Abb. 2.18: Zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit von CEM I-Mörtel mit unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten im Alter von 1 d, 2 d, 7 d und 28 d, jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen aus sechs Prismenhälften sowie Regressionskurven nach Gleichung 2.2

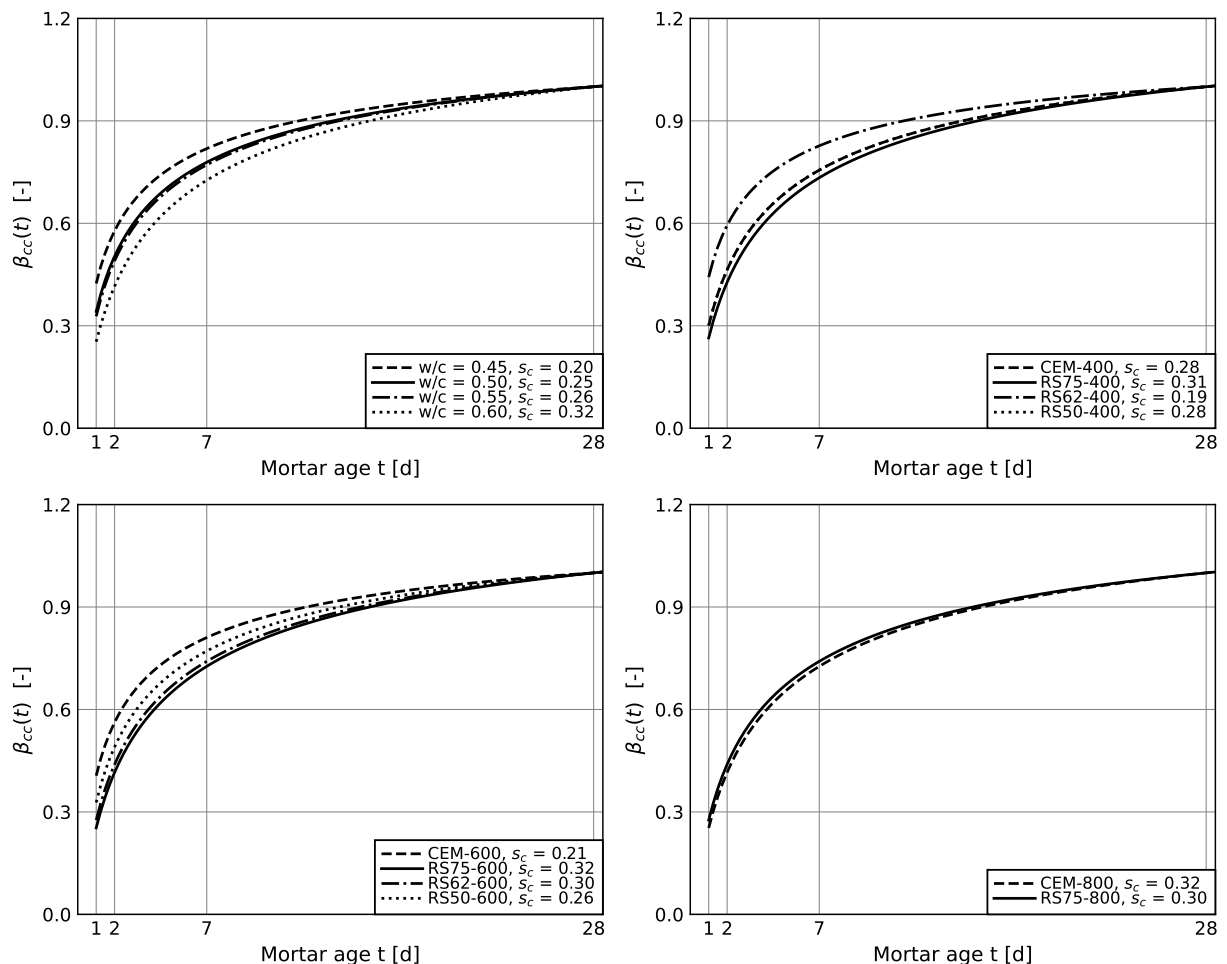


Abb. 2.19: Relative Festigkeitsentwicklung von Mörtel mit bei unterschiedlichen Temperaturen thermisch aufbereiteten Modellstoffen (CEM, RS75, RS62, RS50) mit $f = 0,3$ und $\frac{w}{b} = 0,50$ sowie reinem CEM I bei unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten

2.1.5.3 Untersuchungen zum Einfluss von thermisch aufbereiteten Modellstoffen auf die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen

Die Analyse der Versuchsergebnisse zum Einfluss der Verwendung aufbereiteter Modellstoffe auf die Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d orientierte sich am sog. k -Wert-Konzept, das

in DIN EN 206:2017-01 und DIN CEN/TR 16639:2014-06 beschrieben wird. Hierbei wird der $\frac{w}{z}$ -Wert durch einen äquivalenten Wasserzementwert $\left(\frac{w}{z_{\text{eq}}}\right)$ nach Gleichung 2.4 ersetzt. Die k -Werte dienen dabei als Maß für die Reaktivität der Betonzusatzstoffe und somit als Indikation für deren Einfluss auf die Druckfestigkeit.

$$\frac{w}{z_{\text{eq}}} = \frac{w}{z + k \cdot SCM} \quad \text{mit } SCM: \text{ Masse des (reaktiven) Betonzusatzstoffs} \quad (2.4)$$

Demnach wird für jeden Betonzusatzstoff ein Anrechenbarkeitsfaktor k ermittelt, für den die Beton- bzw. Mörtel Eigenschaften – zunächst und vorliegend beschränkt auf die Druckfestigkeit – denen eines Materials mit gleichem $\frac{w}{z}$ -Wert ohne Betonzusatzstoffe entspricht. Für Hütten sand schlägt DIN EN 206:2017-01 $k_S = 0,6$ und für Steinkohlenflugasche $k_{FA} = 0,4$ vor. Nach DIN CEN/TR 16639:2014-06 liegen k -Werte für Flugasche zwischen $0,2 \leq k_{FA} \leq 0,8$ und für Hütten sand zwischen $0,4 \leq k_S \leq 1,0$. Zusätzlich werden die Massenanteile im Beton begrenzt, was für die vorliegenden Untersuchungen jedoch nicht relevant ist. Das k -Wert-Konzept gilt nur für reaktive Betonzusatzstoffe, lässt sich jedoch auch (eingeschränkt) auf inerte Betonzusatzstoffe wie Kalksteinmehl übertragen, wobei $k_L = 0,0$ gilt.

Unerlässlich für die Bestimmung von äquivalenten Wasserzementwerten ist die Kenntnis des Zusammenhangs zwischen der Druckfestigkeit f_c und dem Wasserzementwert $\frac{w}{z}$ – die sog. Walzkurve – die im ersten Schritt für die 14 verwendeten Basismischungen aus drei Serien ohne Betonzusatzstoffe bestimmt wurde (siehe Abb. 2.20).

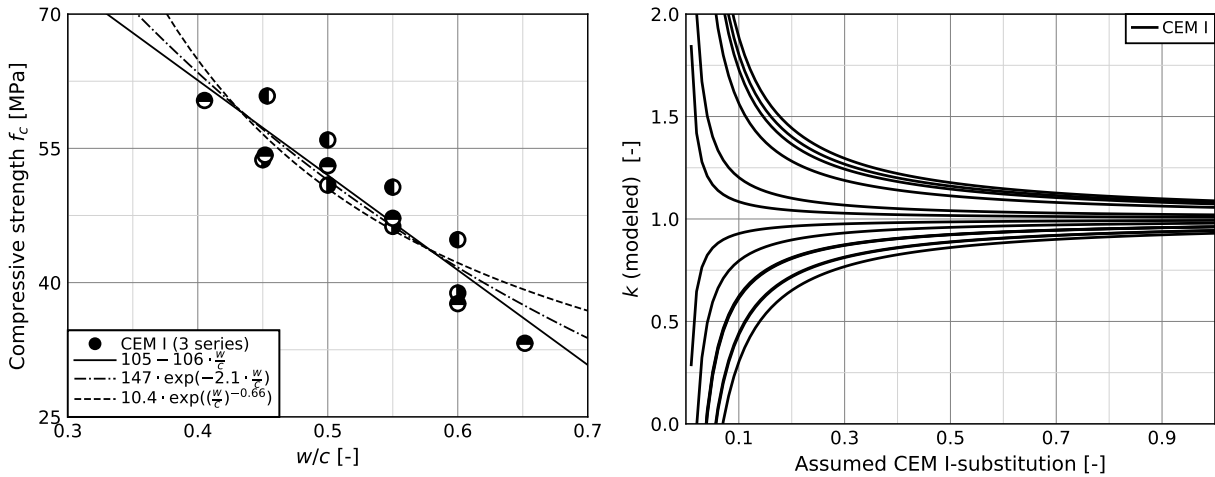


Abb. 2.20: Links: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit f_c und Wasserzementwert $\frac{w}{z}$ (Walzkurve)
Rechts: Rechnerisch modellierter Einfluss der Materialstreuung auf den k -Wert in Relation zur Austauschrate

Zur rechnerischen Abbildung wurden die Versuchsergebnisse durch Regressionskurven approximiert. Hierfür wurden drei Ansätze überprüft, die in Abb. 2.20 mit den jeweiligen optimierten Parametern dargestellt sind.

$$f_{c,28d} = a - b \cdot \frac{w}{z} \quad (2.5)$$

$$f_{c,28d} = a \cdot \exp\left(-b \cdot \frac{w}{z}\right) \quad (2.6)$$

$$f_{c,28d} = a \cdot \exp\left(\left[\frac{w}{z}\right]^{-b}\right) \quad (2.7)$$

Der lineare Ansatz (Gleichung 2.5) – der in DIN CEN/TR 16639:2014-06 empfohlen wird – liefert die beste Anpassung an die Versuchsergebnisse. Auch wenn ein lineares Materialverhalten physikalisch unplausibel ist, wurden Gleichung 2.6 und Gleichung 2.7 als Walz-Kurve für die weiteren Analysen verworfen. Die Berechnung von k erfolgt, indem für jede Mischung mit den jeweiligen Mischungsparametern ($\frac{w}{b}$ -Wert und Bindemittelanteil f) über die mittlere Festigkeit im Alter von 28 d ein äquivalenter Wasserzementwert (Gleichung 2.8) und hieraus der jeweilige k -Wert (Gleichung 2.9) berechnet wird. Der Vergleich der einzelnen Ansätze verdeutlicht, dass für Mörteldruckfestigkeiten zwischen 43,4 MPa und 58,4 MPa der lineare Ansatz höhere Werte für $\frac{w}{z}$ und damit niedrigere Werte für k ausgibt und somit einer konservativen Herangehensweise entspricht.

$$\frac{w}{z_{eq}} = \frac{a - f_{c,28d}}{b} \quad (2.8)$$

$$k = \frac{1-f}{f} \cdot \left(\frac{\frac{w}{b}}{\frac{w}{z_{eq}}} \cdot \frac{1}{1-f} - 1 \right) = 1 + \frac{1}{f} \cdot \left(\frac{\frac{w}{b}}{\frac{w}{z_{eq}}} - 1 \right) \quad (2.9)$$

Gleichung 2.9 verdeutlicht, dass der Anteil der Betonzusatzstoffe am Bindemittel (f) hyperbolisch in die Berechnung von k eingeht. Allerdings unterliegen die der Walzkurve zugrundeliegenden Messwerte Streuungen, sowohl innerhalb der jeweiligen Serien als auch zwischen den Serien (vgl. Abb. 2.20 (links)). Das Vorgehen in Gleichung 2.8 unterstellt jedoch, dass die Walzkurve das Betonverhalten perfekt abbildet. Tatsächlich werden jedoch infolge der Berechnung in Gleichung 2.9 sämtliche Streuungen – sowohl des Betonzusatzstoffs als auch der restlichen Betonausgangsstoffe – auf die resultierenden k -Werte projiziert. Für CEM I gilt per Definition $k = 1,0$. Dies lässt sich durch eine Rückrechnung gem. Gleichung 2.9 überprüfen, indem $f = 1,0$ gesetzt wird. Die individuellen k -Werte berechnen sich damit als der Quotient aus $\frac{w}{z_b}$ und $\frac{w}{z_{eq}}$ und liegen in einem Bereich von 0,93 bis 1,09 um den Mittelwert 1,00. Nun lässt sich der Einfluss der Substitutionsrate anschaulich darstellen, indem Gleichung 2.9 als Funktion von f interpretiert wird. Der verwendete CEM I wird dabei virtuell aufgeteilt in ein Bindemittel mit bekanntem k -Wert (1,0) bei einem Anteil von $(1-f)$ und in Bindemittel mit einem Anteil f , dessen k -Wert es zu bestimmen gilt. Die Auswirkung hiervon illustriert Abb. 2.20 (rechts). Für $f = 0,5$ berechnet sich die Spannweite des Anrechenbarkeitsfaktors zu $0,86 \leq k(f = 0,5) \leq 1,18$ bei einem unveränderten Mittelwert von $k = 1,00$. Die Spannweite steigt mit kleiner werdenden Substitutionsrate auf $0,77 \leq k(f = 0,3) \leq 1,30$ und $0,30 \leq k(f = 0,1) \leq 1,89$. Diese Auswirkungen sind modellimmanent und müssen bei der Interpretation der weiteren Versuchsergebnisse

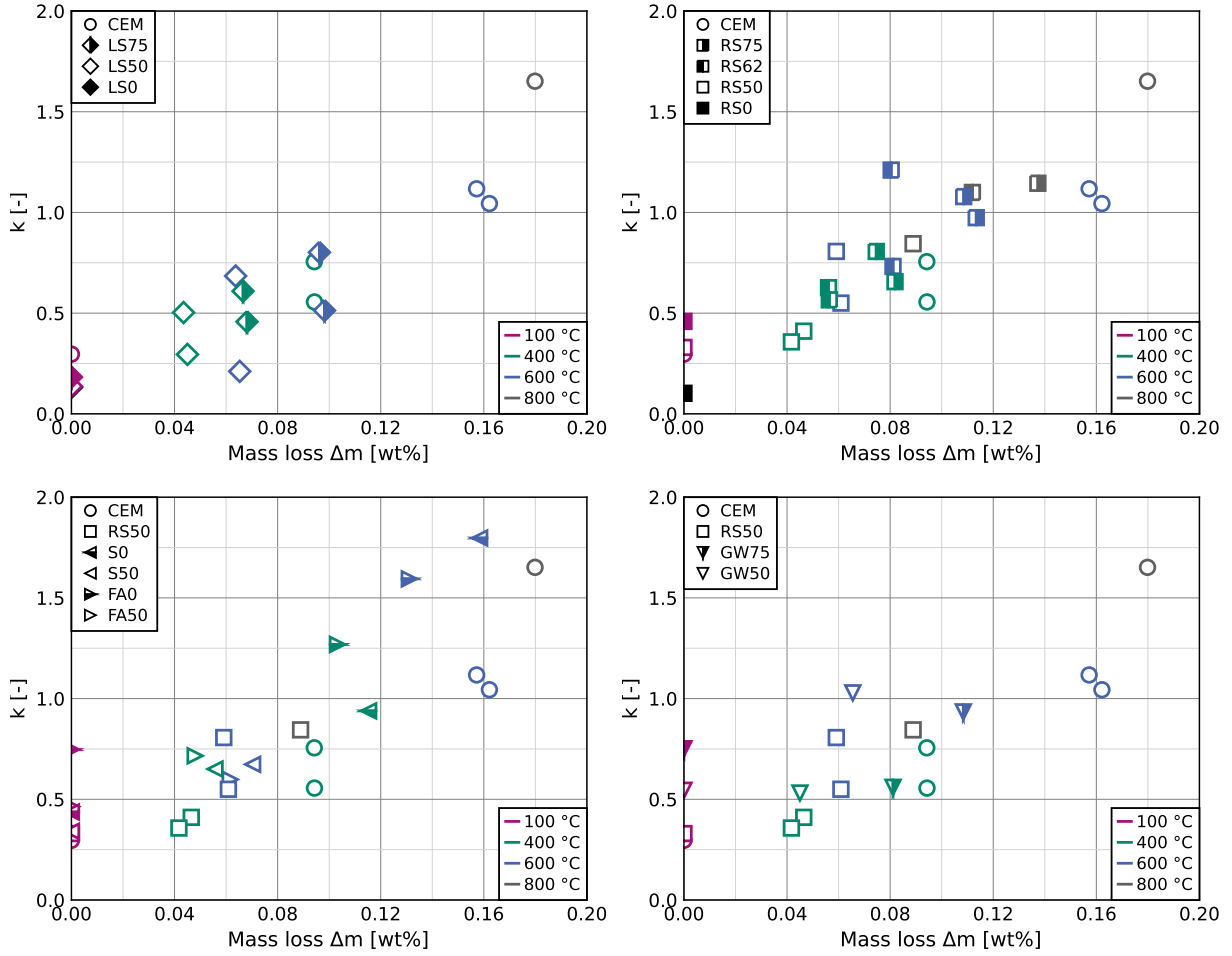


Abb. 2.21: k -Werte aufbereiteter Modellstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung (jeweils Mittelwerte für $\frac{w}{b} = 0,40$ und $\frac{w}{b} = 0,50$)

berücksichtigt werden.

Für die Auswertung der k -Werte der Mischungen mit aufbereiteten Modellstoffen als Betonzusatzstoff wurde zunächst untersucht, inwieweit der Bindemittelanteil f und der Wasserbindemittelwert $\frac{w}{b}$ einen Einfluss auf die Gesamtheit der Ergebnisse haben. Hierfür wurden jeweils paarweise Mischungen aus einem Probensatz betrachtet. Für $\frac{w}{b} = 0,50$ lagen 38 erfolgreiche Versuchspaare vor, die als arithmetische Mittel $k(f = 0,1) = 0,97$ und $k(f = 0,3) = 0,69$ ergaben, was einen Einfluss des Betonzusatzstoffgehalts auf die Analyseergebnisse nahelegt. 54 Versuchspaare für $f = 0,3$ ergaben $k(\frac{w}{b} = 0,40) = 0,74$ und $k(\frac{w}{b} = 0,50) = 0,71$, wodurch der Einfluss des Wasserbindemittelwerts auf die berechneten k -Werte als vernachlässigbar angenommen wurde.

Daher wurden im nächsten Schritt diese 54 Versuchspaare für die Bestimmung von aufbereitungs- und materialbedingten Einflussgrößen auf die Größe der aus den Versuchsergebnissen abgeleiteten k -Werte herangezogen. Abbildung 2.21 veranschaulicht die arithmetischen Mittelwerte der 54 Versuchspaare.

Als maßgebendes Kriterium für die Reaktivität infolge thermischer Aufbereitung ergibt sich der Massenverlust durch die Dehydratation. Durch den Vergleich der Modellstoffe CEM, LS75 und LS50 (Abb. 2.21 oben links) wird ersichtlich, dass die Aufbereitungstemperatur die Reakti-

vität nur indirekt beeinflusst. Bei 400 °C aufbereiteter CEM (CEM-400) weist mit $\Delta m = 9,4 \text{ m\%}$ einen ähnlichen Massenverlust auf wie LS75-600 mit $\Delta m = 9,7 \text{ m\%}$, was für beide Modellstoffe zu $k = 0,66$ führt (Mittelwerte über zwei Versuchspaare). Analog verhalten sich LS75-400 und LS50-600, wobei hier ein Ausreißer aufgrund der Materialstreuung naheliegend ist. Für alle untersuchten Versuchsserien mit den Modellstoffen CEM, LS75, LS50 und LS0 lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen k und Δm beobachten. Eine plausible Abweichung stellt CEM-800 mit $\Delta m = 18,0 \text{ m\%}$ dar, da der Massenverlust nur bis zu Aufbereitungstemperaturen von ca. 650 °C auf die Dehydratation zurückzuführen ist, da anschließend die Zersetzung von Carbonaten unter Abgabe von CO_2 einsetzt.

Werden anstatt der Modellstoffe mit Kalkstein als Gesteinskörnung Modellstoffe mit Rheinsand betrachtet (Abb. 2.21 oben rechts), ist unabhängig des Massenverlusts eine geringfügige Erhöhung der k -Werte zu beobachten, gleiches gilt verstärkt für Modellstoffe mit Grauwacke (Abb. 2.21 unten rechts). Gemahlener Kalkstein (bzw. Kalksteinmehl) verhält sich als Betonzusatzstoff inert, wohingegen SiO_2 aus der in den Modellstoffen enthaltenen Gesteinskörnung eine puzzolanische Reaktivität aufweisen kann. Voraussetzungen sind dafür, dass SiO_2 amorph ist oder kristallines quarzitisches SiO_2 sehr fein aufgemahlen wurde. Während davon ausgegangen werden kann, dass Modellstoffe mit Rheinsand und Grauwacke einige Partikel mit ausreichender Feinheit aufweisen, enthält Grauwacke zusätzlich amorphes SiO_2 .

Weitere bzw. zusätzliche positive Effekte auf die Reaktivität thermisch aktivierter Modellstoffe zeigen sich, wenn sie Reaktionsprodukte von Hüttensand oder Steinkohlenflugasche enthalten (Abb. 2.21 unten links).

Aufbauend auf den geschilderten Beobachtungen wurden anschließend verschiedene Modellansätze zur Vorhersage von k -Werten aufgrund der Modellstoffzusammensetzung und des Massenverlusts bei der thermischen Aufbereitung untersucht.

Im ersten Modellansatz nach Gleichung 2.10 wurden Effekte aus der Bindemittelart und des Typs der Gesteinskörnung vernachlässigt und Anrechenbarkeitsfaktoren als Produkt des Anteils dehydratisierten Zementsteins (m_{pdh}) an der Modellstoffmasse mit einem Parameter k_{h0} berechnet.

$$k = k_{h0} \cdot m_{pdh} \quad (2.10)$$

$$m_{pdh} = \Delta m \cdot \left(1 + \frac{1}{m_{h0}}\right) \quad (2.11)$$

$$k_{h0} = 1,67 \quad (2.12)$$

m_{pdh} berechnete sich aus dem Massenverlust Δm , der wiederum durch die für eine vollständige Hydratation von CEM I erforderliche Wassermenge m_{h0} skaliert wurde. Für die vorliegenden Berechnungen wurde $m_{h0} = 0,23$ aus [1] übernommen. k_{h0} wurde mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate aus den 100 Einzelergebnissen der 50 Versuchspaare mit $f = 0,3$ zu $k_{h0} = 1,67$ bestimmt. Die Summe der Fehlerquadrate betrug $\Delta^2 = 20,4$. Dabei wurden Versuchspaare mit einer Aufbereitungstemperatur von 800 °C nicht in die Analyse einbezogen.

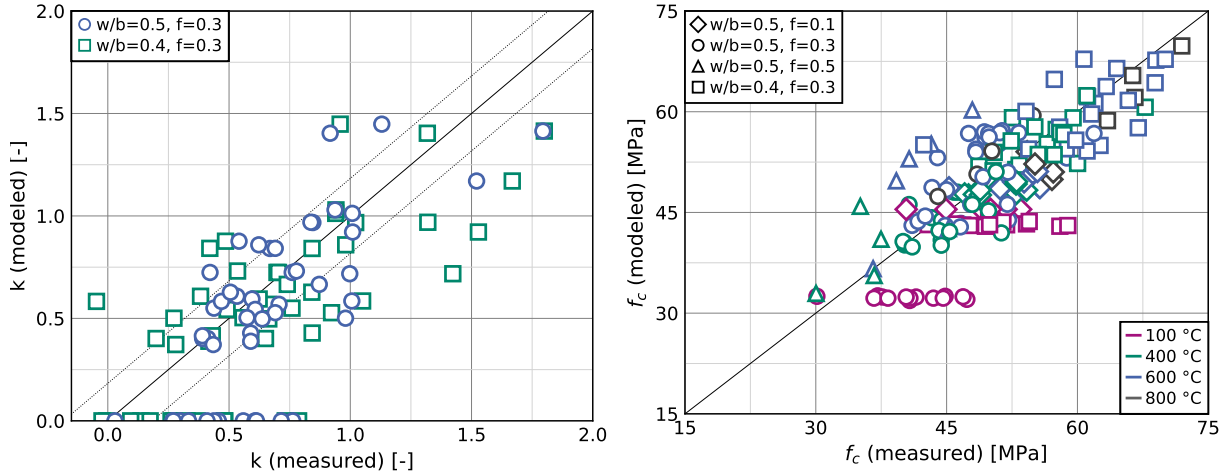


Abb. 2.22: Links: mit Gleichung 2.10 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{ist} für $f = 0,3$
rechts: mit k_{measured} , Gleichung 2.8 und Gleichung 2.6 berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit für alle Mischungen

Abb. 2.22 zeigt sowohl die Ergebnisse der Regression für k nach Gleichung 2.10 (modellierter k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmtem k_{measured}) als auch die entsprechenden berechneten Mörteldruckfestigkeiten $f_{c,\text{modeled}}$ über den gemessenen $f_{c,28\text{d}}$. Hierfür wurden zusätzlich zu den 100 Ergebnissen, die für die Regressionsanalyse von k_{modeled} verwendet wurden, sämtliche Serien mit unterschiedlichen Bindemittelanteilen bewertet (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,48$). Auffällig ist, dass insbesondere niedrige k -Werte für Modellstoffe, die nicht wärmebehandelt wurden, durch den Modellansatz unterschätzt werden. Für die Veranschaulichung der Materialstreuung (s. o.) enthält Abb. 2.22 (links) neben der Winkelhalbierenden, die dem Erwartungswert eines perfekten Modells entspricht, ein Streuband von $\pm 0,183$, was der Standardabweichung aus Abb. 2.20 (rechts) für $f = 0,3$ entspricht.

Im zweiten Schritt wurde Gleichung 2.10 ergänzt, um die Erhöhung der Reaktivität durch die Bindemittelart und den Gesteinskörnungstyp zu berücksichtigen (Gleichung 2.13). Dadurch reduziert sich die Summe der Fehlerquadrate zu $\Delta^2 = 14,8$ und das Bestimmtheitsmaß für die Druckfestigkeit verbessert sich zu $R^2 = 0,76$. Die Ergebnisse sind in Abb. 2.23 veranschaulicht.

$$k = k_{h0} \cdot m_{pdh} + k_{a0} + k_{b0} \quad (2.13)$$

$$k_{h0} = 1,10 \quad (2.14)$$

$$k_{a0} = \begin{cases} 0,00 & \text{für LS} \\ 0,10 & \text{für RS} \\ 0,30 & \text{für GW} \end{cases} \quad (2.15)$$

$$k_{b0} = \begin{cases} 0,15 & \text{für CEM I} \\ 0,25 & \text{für CEM I + S} \\ 0,45 & \text{für CEM I + FA} \end{cases} \quad (2.16)$$

Im dritten Schritt wurde eine weitere Optimierung der Vorhersage des k -Werts untersucht. Hierfür wurde angenommen, dass die additiven Beiträge der Gesteinskörnung und der Binde-

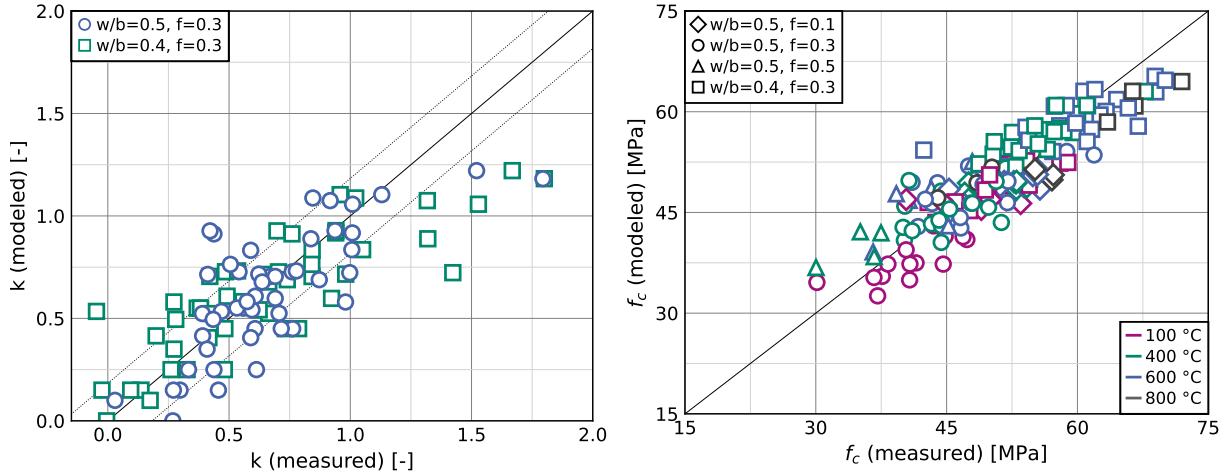


Abb. 2.23: Links: mit Gleichung 2.13 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{ist} für $f = 0,3$
rechts: mit k_{measured} , Gleichung 2.8 und Gleichung 2.6 berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit für alle Mischungen

mittelart proportional zum Gehalt an Gesteinskörnung bzw. hydratisiertem Bindemittel (oder Zementstein) im aufbereiteten Modellstoff sind. Dafür müssen jeweils zusätzlich zum Anteil dehydratisierten Zementsteins (m_{pdh} nach Gleichung 2.11) der Anteil der Gesteinskörnung m_a und der Anteil des hydratisierten Bindemittels m_{ph} am (teilweise) dehydratisierten Modellstoff berechnet werden. Als Eingangsgröße dient der Massenanteil des Bindemittels m_{pr} an den Feststoffen bei der Modellstoffherstellung. Durch die Modellanpassung erhöht sich die Summe der Fehlerquadrate geringfügig auf $\Delta^2 = 14,9$. Das Bestimmtheitsmaß für die Druckfestigkeit reduziert sich ebenfalls unwesentlich ($R^2 = 0,74$). Die Ergebnisse sind in Abb. 2.24 veranschaulicht.

$$k = k_{h0} \cdot m_{pdh} + k_{a0} \cdot m_a + k_{b0} \cdot m_{ph} \quad (2.17)$$

$$m_a = \frac{1 - m_{p100}}{1 - \Delta m} \quad (2.18)$$

$$m_{ph} = (m_{p100} - m_{pdh} \cdot (1 - \Delta m) - \Delta m) \cdot \frac{1}{1 - \Delta m} \leq 1 \quad (2.19)$$

$$m_{p100} = \frac{m_{pr} \cdot (1 + m_{h0})}{m_{pr} \cdot (1 + m_{h0}) + 1 - m_{pr}} \quad (2.20)$$

$$k_{h0} = 1,35 \quad (2.21)$$

$$k_{a0} = \begin{cases} 0,05 & \text{für LS} \\ 0,25 & \text{für RS} \\ 0,60 & \text{für GW} \end{cases} \quad (2.22)$$

$$k_{b0} = \begin{cases} 0,30 & \text{für CEM I} \\ 0,30 & \text{für CEM I + S} \\ 1,10 & \text{für CEM I + FA} \end{cases} \quad (2.23)$$

Abschließend wurde eine Ergänzung des Vorhersagemodells für k um den Anteil der Modellstoffe am Bindemittel (f) untersucht. Hierfür wurde der zweite Modellansatz nach Gleichung 2.13 ausgewählt, da dieser deutlich einfacher als Gleichung 2.17 ist und zudem auch

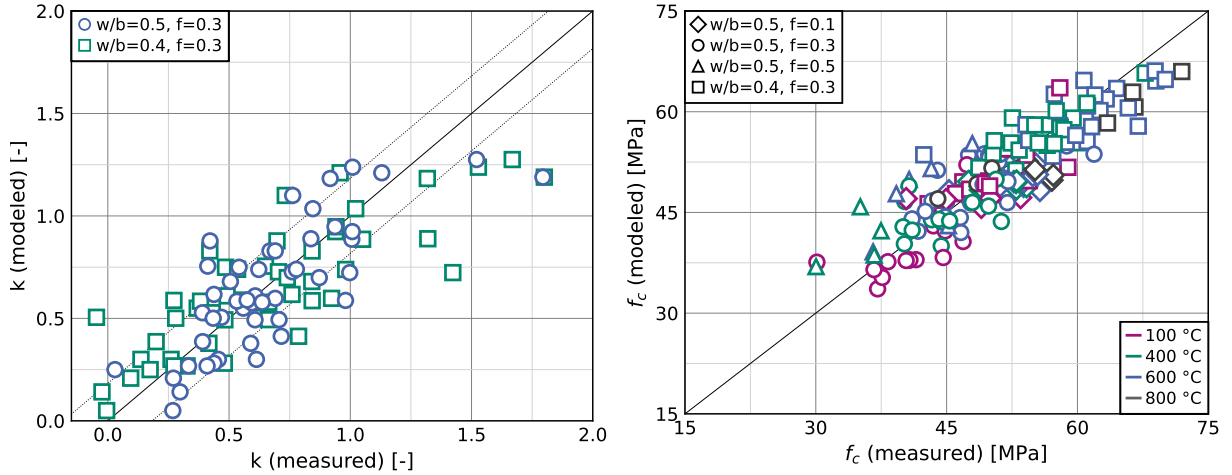


Abb. 2.24: Links: mit Gleichung 2.17 berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{measured} für $f = 0,3$
rechts: mit k_{measured} , Gleichung 2.8 und Gleichung 2.6 berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit für alle Mischungen

angewendet werden kann, ohne die Mischungszusammensetzung der Modellstoffe zu kennen. Dafür wurden unterschiedliche Ansätze für die verschiedenen linearen und nichtlinearen Einflüsse von f auf (Teil-)Summen in Gleichung 2.13 betrachtet. Hierdurch konnte jedoch keine Verbesserung der Vorhersage der Mörteldruckfestigkeit erreicht werden. Der beste untersuchte Ansatz (Gleichung 2.24) lieferte $R^2 = 0,80$ (ausgehend von $R^2 = 0,76$ ohne Berücksichtigung von f).

$$k = (k_{h0} \cdot m_{pdh} + k_{a0} + k_{b0}) \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{-k_f} \quad (2.24)$$

$$k_{h0} = 1,10 \quad (2.25)$$

$$k_{a0} = \begin{cases} 0,00 & \text{für LS} \\ 0,10 & \text{für RS} \\ 0,30 & \text{für GW} \end{cases} \quad (2.26)$$

$$k_{b0} = \begin{cases} 0,15 & \text{für CEM I} \\ 0,25 & \text{für CEM I + S} \\ 0,45 & \text{für CEM I + FA} \end{cases} \quad (2.27)$$

$$k_f = 0,5 \quad (2.28)$$

f_{ref} bezeichnet dabei den Anteil der Betonzusatzstoffe am Bindemittel, für den das grundlegende Modell kalibriert wurde. Im vorliegenden Fall gilt daher $f_{ref} = 0,3$. Ursächlich für die vergleichsweise schlechte Modellanpassung sind einerseits unvollständige Daten: Für $f = 0,1$ wurden keine Versuche mit den Modellstoffen S0, S50, FA0 und FA50 durchgeführt. Für $f = 0,5$ wurde der Versuchsumfang noch einmal deutlich reduziert, wodurch der Einfluss des Bindemittelanteils in Zusammenhang mit einigen Modellstoffparametern nicht analysiert werden kann. Weiterhin unterliegen die Ergebnisse für $f = 0,1$ stark erhöhten Streuungen, die aus dem Berechnungsverfahren resultieren (vgl. Abb. 2.20 (rechts)). Abbildung 2.25 bestätigt, dass die Streubreite

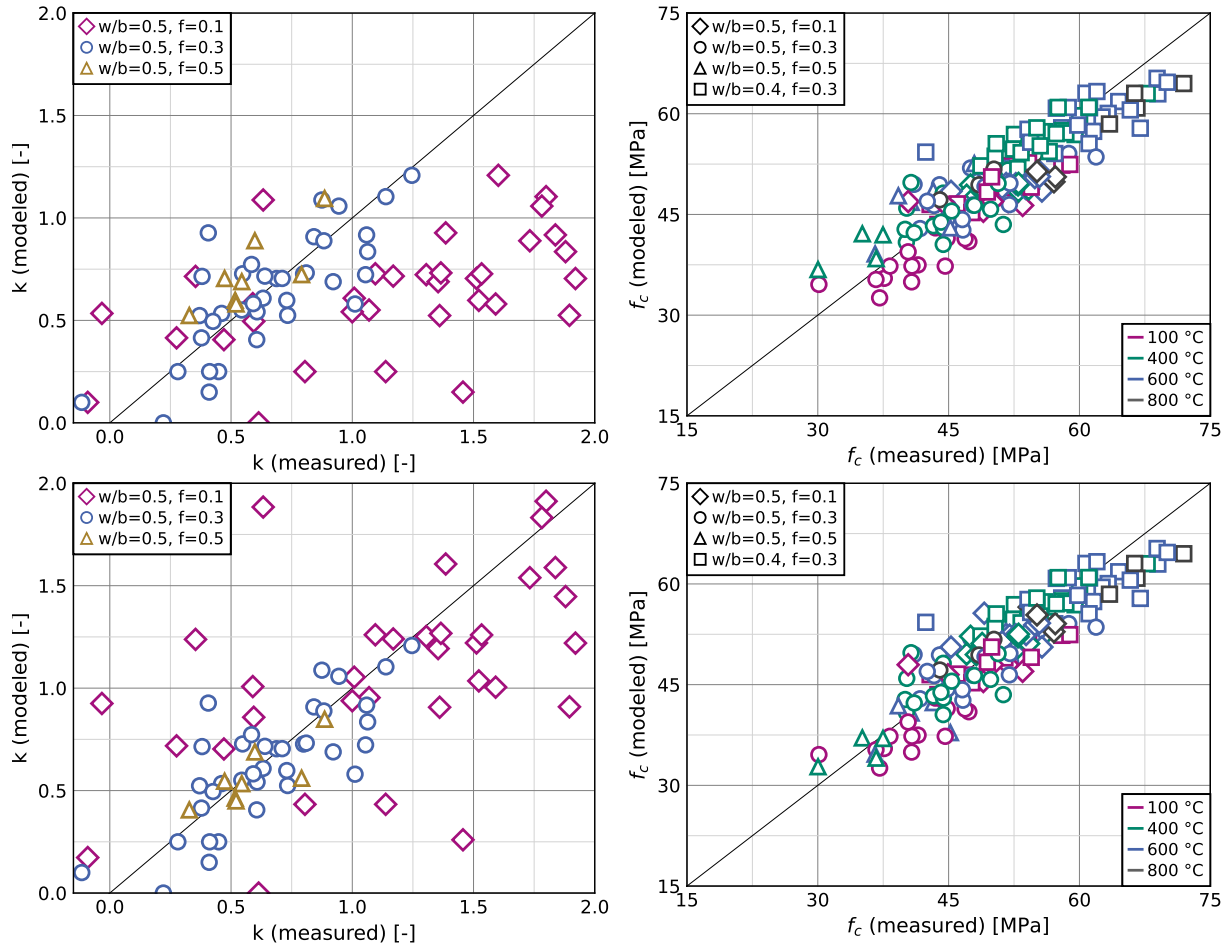


Abb. 2.25: Links: berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{modeled} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{measured} für verschiedene Austauschraten f
rechts: mit k_{measured} , Gleichung 2.8 und Gleichung 2.6 berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit für alle Mischungen
Oben: Berechnung mit Gleichung 2.13 ohne Berücksichtigung von f
Unten: Berechnung mit Gleichung 2.24 mit Berücksichtigung von f

von theoretischen k -Werten mit sinkendem Bindemittelanteil f ansteigt, da sämtliche Materialstreuungen auf einen geringer werdenden Anteil am Bindemittel projiziert werden. Dennoch wird ersichtlich, dass die Modellanpassung zu einer stark verbesserten Vorhersage des k -Werts führt, indem k -Werte für $f = 0,1$ nicht länger unter- und für $f = 0,5$ nicht länger überschätzt werden. Auf die Vorhersage der Mörteldruckfestigkeit hat jedoch lediglich letzteres einen nennenswerten Einfluss, da eine Zementsubstitution von 10 m% generell nur geringe Auswirkungen auf die Festigkeit zeigt.

2.2 Thermisch-mechanische Aufbereitung von praxisüblichen Betonbrechsanden (Realstoffe)

2.2.1 Beschaffung und Charakterisierung der Betonbrechsande

Für die experimentellen Untersuchungen an realen Betonbrechsanden wurden elf unterschiedliche Ausgangsmaterialien beschafft. Davon waren fünf nominelle Betonbrechsande mit Kornklassen 0/2, und 0/3 mm sowie drei rezyklierte Gesteinskörnungen mit Größtkorndurchmessern zwischen 16 mm und 45 mm. Letztere wurden in einem ersten Schritt durch Trockensiebungen auf die Brechsandfraktion 0/2 mm eingengt. Anschließend fand an allen acht Betonbrechsanden eine weitere Siebung statt, um eine zusätzliche Probe 0/0,25 mm zu erhalten. Für zwei Ausgangsmaterialien wurden zusätzliche Kornklassen mit weiteren Größtkorndurchmessern untersucht. Zudem standen drei Feinstfraktionen aus Nassrecyclinganlagen mit Korngrößen $< 250 \mu\text{m}$ zur Verfügung. Auf diese Weise wurden 25 Ausgangsstoffe für die anschließende thermisch-mechanische Aufbereitung erzeugt. Tabelle 2.5 zeigt die Ausgangsstoffe, inkl. der erzeugten Varianten und zugehörige Bezeichnungen, die nachfolgend verwendet werden.

Im ersten Schritt wurden Röntgenfluoreszenzmessungen (WDXRF) durchgeführt, um die chemische Zusammensetzung der Betonbrechsande zu bestimmen. Tabelle B.6 zeigt die chemische Zusammensetzung ausgewählter Proben. Abbildung 2.26 veranschaulicht die chemischen Zusammensetzungen in einem Dreistoffdiagramm. Hierbei wird ersichtlich, dass die untersuchten Ausgangsstoffe hohe Anteile an Silicium enthalten. Mit geringerer Korngröße reichern sich jedoch calciumhaltige Bestandteile an.

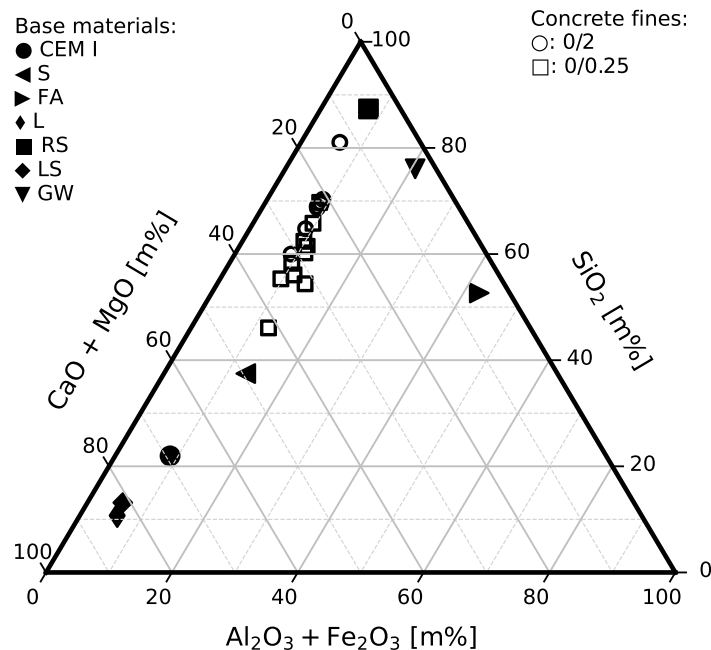


Abb. 2.26: Chemische Zusammensetzung der Realstoffe im Dreistoffsystem mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) nach DIN EN 196-2:2013-10

Tab. 2.5: Untersuchte Betonbrechsande inkl. Herkunft, Varianten und Bezeichnungen.

BBS: Betonbrechsand, RGK: Rezyklierte Gesteinskörnung, FBR: Frischbetonrecycling, F: Filterkuchen

Hersteller	Ort	Art	Körnung	Varianten	Bez.
Feess	Kirchheim/Teck	BBS	0/2 mm	A1-	0/0,125 0/0,25u 0/0,25 0/0,5 0/1 0/2
				A2-	0/0,25 0/2
					R3 R1
				B1-	0/0,25 0/0,5 0/1 0/2
					R4
Fischer+Weilheim	Stuttgart	BBS	0/2 mm	B2-	0/0,25 0/2
Fischer+Weilheim	Stuttgart	RGK	0/45 mm	C-	0/0,25 0/2
Fischer+Weilheim	Magstadt	RGK	0/45 mm	D-	0/0,25 0/2
TBN	Reinbek	RGK	0/16 mm		
		FBR	F		F
					R5
peterbeton	Karlsruhe	BBS	0/2 mm	E-	0/0,25 0/2
peterbeton	Sandweier	BBS	0/3 mm	F-	0/0,25 0/2
					R2
Scherer+Kohl	Ludwigshafen	BBS	F	G-	F
					R6
TBS	Mannheim	FBR	F	H-	F

Anschließend wurden die auf 2 mm und 0,25 mm abgesiebten Varianten der Realstoffe sowie die Filterkuchen hinsichtlich ihres thermogravimetrischen Verhaltens untersucht. Abbildung 2.27 veranschaulicht die Ergebnisse.

Hierbei wird ersichtlich, dass die feineren Materialien in der Regel größere Massenverluste als die zugehörigen Varianten mit einem Größtkorn von 2 mm aufweisen. Der Unterschied folgt dabei jedoch keiner ersichtlichen Systematik und fällt für einzelne Realstoffe unterschiedlich stark aus. Den höchsten Massenverlust bei 600 °C weist Realstoff D-F, ein Filterkuchen aus dem Frischbetonrecycling, auf. Keine der untersuchten Proben zeigt einen erhöhten Massenverlust bei ca. 500 °C, der mit der Zersetzung von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ einhergeht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu anderen Verbindungen wie CaCO_3 umgewandelt wurde. Hinsichtlich der Massenverluste zwischen 650 °C und 850 °C, die mit der Zersetzung von carbonatischen Verbindungen einhergehen, weisen die Proben ebenfalls deutliche Unterschiede untereinander auf. Die Realstoffe des Herstellers A weisen hier die höchsten Massenverluste auf, während die Realstoffe

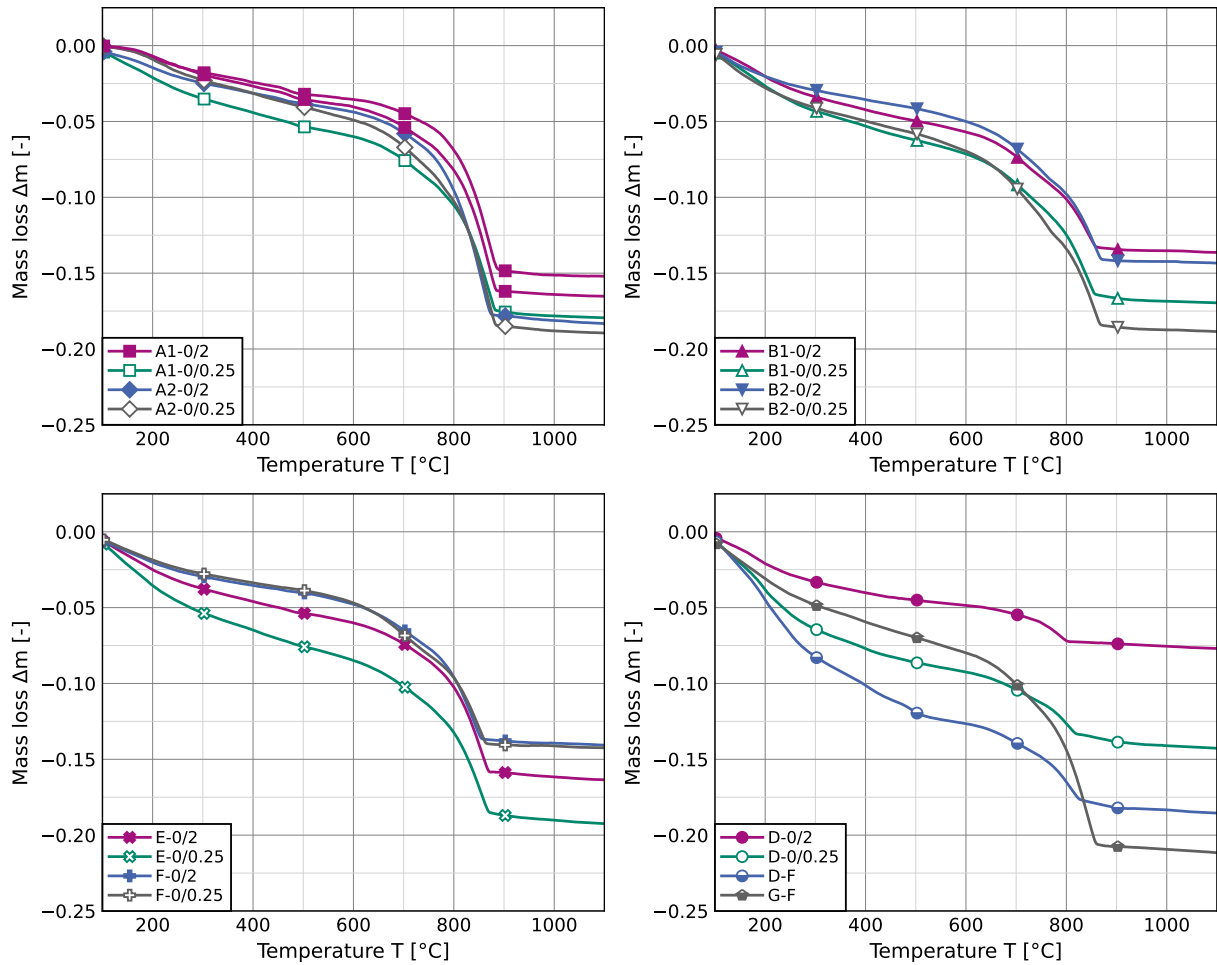


Abb. 2.27: Thermogravimetrische Charakterisierung ausgewählter Realstoffe in Tiegeln mit 160 mg Probenmenge bei einer Aufheizrate von 10 K/min

des Herstellers D nur geringe Massenverluste zeigen, die zudem bei niedrigeren Temperaturen von ca. 800 °C bereits enden. Dies spricht in Verbindung mit den XRF-Ergebnissen dafür, dass die Realstoffe unterschiedliche primäre Gesteinskörnungen mit unterschiedlichen Calciumcarbonatanteilen und -variationen aufweisen.

2.2.2 Realstoffe: Thermisch-mechanische Aufbereitung

Nach der Erzeugung der Varianten durch Siebungen wurden die Proben analog zu den Modellstoffen bei 100 °C, 400 °C und 600 °C thermisch aufbereitet. Auf eine thermische Behandlung bei 800 °C wurde aufgrund der Ergebnisse in Abschnitt 2.1 verzichtet. Anschließend wurden die Proben bis auf einen Partikeldurchmesser < 125 µm in Labormøhlen gemahlen. Das von den Modellstoffen abweichende Vorgehen wurde gewählt, da die Realstoffe ohnehin in kleineren Chargen vorhanden waren und eine Mahlung nach der thermischen Behandlung als praxisnäher eingeschätzt wurde. Abbildung 2.28 zeigt die resultierenden Korngrößenverteilungen von sechs ausgewählten Proben. Hierbei lassen sich einerseits Unterschiede zwischen den einzelnen Proben erkennen. Andererseits sind alle Korngrößenverteilungen gröber als die der Modellstoffe in Abschnitt 2.1.

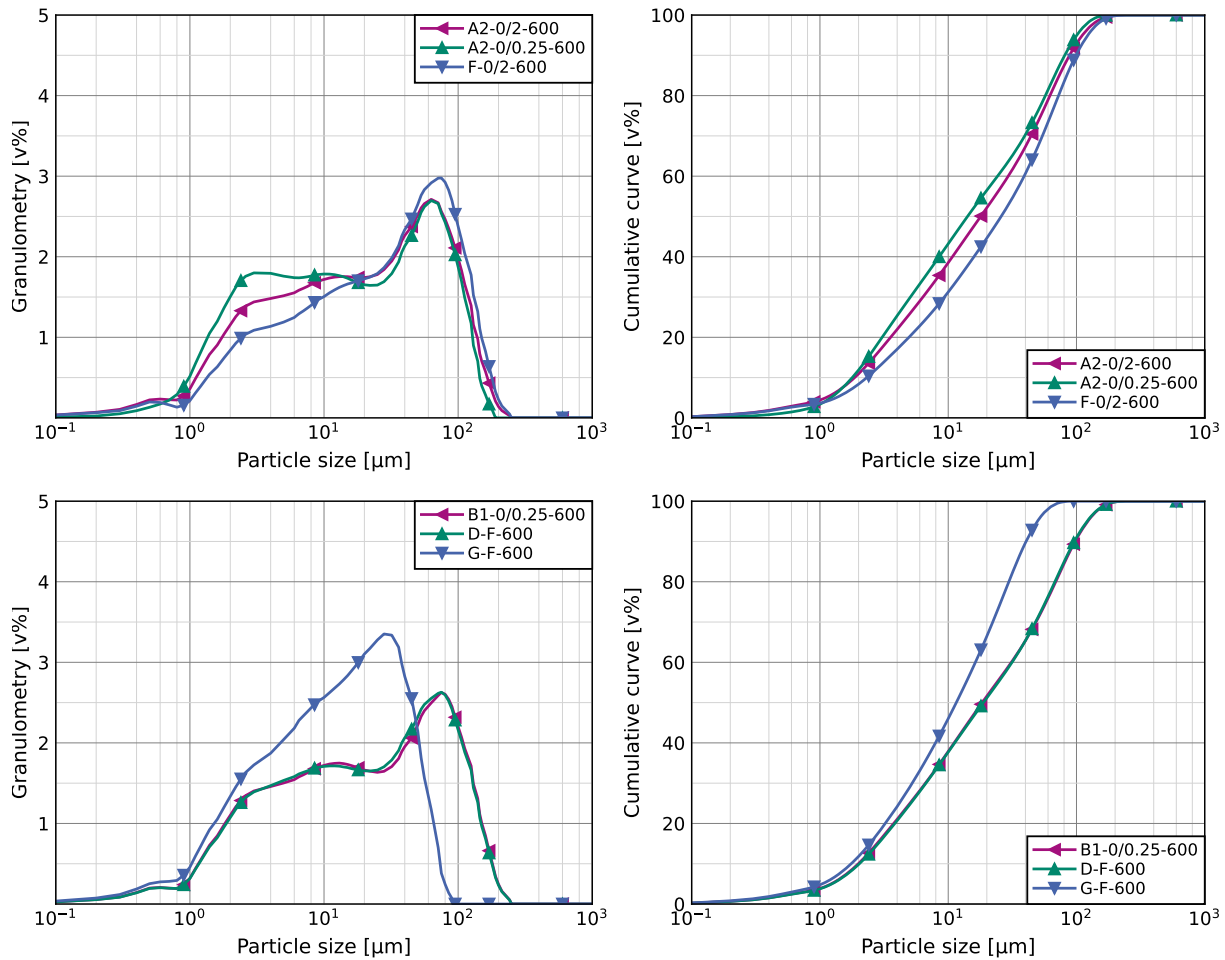


Abb. 2.28: Partikelgrößenverteilung ausgewählter Realstoffe nach der thermischen Aufbereitung bei 600 °C

2.2.3 Realstoffe: Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonzusatzstoffe

Das Hydratationsverhalten der aufbereiteten Betonbrechsande wurde analog zu den Modellstoffen anhand von Wärmeflusskalorimetriemessungen untersucht (vgl. Abschnitt 2.1.4). Die Wärmeflusskalorimetriemessungen beschränkten sich auf ausgewählte bei 600 °C aufbereitete Realstoffe. Die Ergebnisse sind in Tab. B.12 dargestellt. Zur Beurteilung der Praxistauglichkeit werden die Ergebnisse der Hydratationswärmemessungen an Mischungen aus CEM I und etablierten Betonzusatzstoffen (Abb. 2.29) gegenübergestellt.

Die abgegebenen Hydratationswärmemengen in Abb. 2.30 zeigen insgesamt eine große Ähnlichkeit zwischen den aufbereiteten Betonbrechsanden sowie eine große Ähnlichkeit zur Mischung aus CEM I mit Hüttensand und übersteigen die Werte für Steinkohlenflugasche und Kalksteinschlacke. Zudem sind die Wärmeabgaben feinerer Ausgangsstoffe (0/0,25 mm) gegenüber größeren Ausgangsstoffen (0/2 mm) geringfügig erhöht. Auffällig ist die Hydratationswärmeabgabe von D-F. Das Ausgangsmaterial war Filterkuchen aus einer Frischbetonrecyclinganlage. Hier wird eine stark erhöhte Wärmeabgabe in den ersten Minuten nach der Wasserzugabe ersichtlich. Zudem fällt das anschließende lokale Maximum des Hydratationswärmeflusses geringer aus und findet früher statt. Dabei ist jedoch das anschließende Abklingen der Wärmeabgabe reduziert,

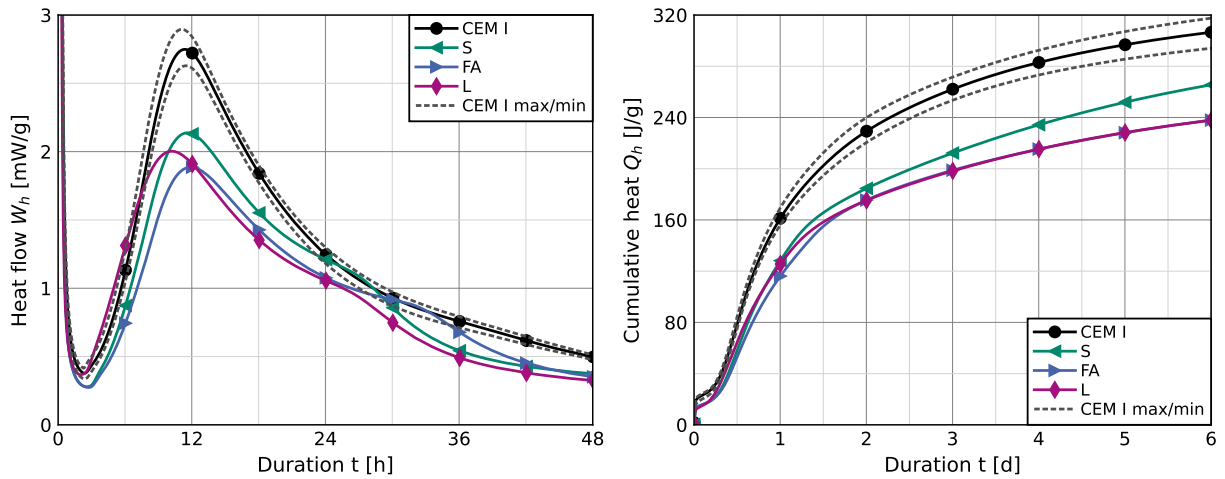


Abb. 2.29: Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus 70 m% CEM I und jeweils 30 m% Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) bzw. Kalksteinmehl (L) inkl. Hydratationswärmeffluss von CEM I mit Indikation der Standardabweichung aus einer Achtfachbestimmung

sodass diese Probe letztendlich die höchste Wärmeabgabe aller untersuchten Mischungen aus CEM I und aufbereiteten Realstoffen zeigt.

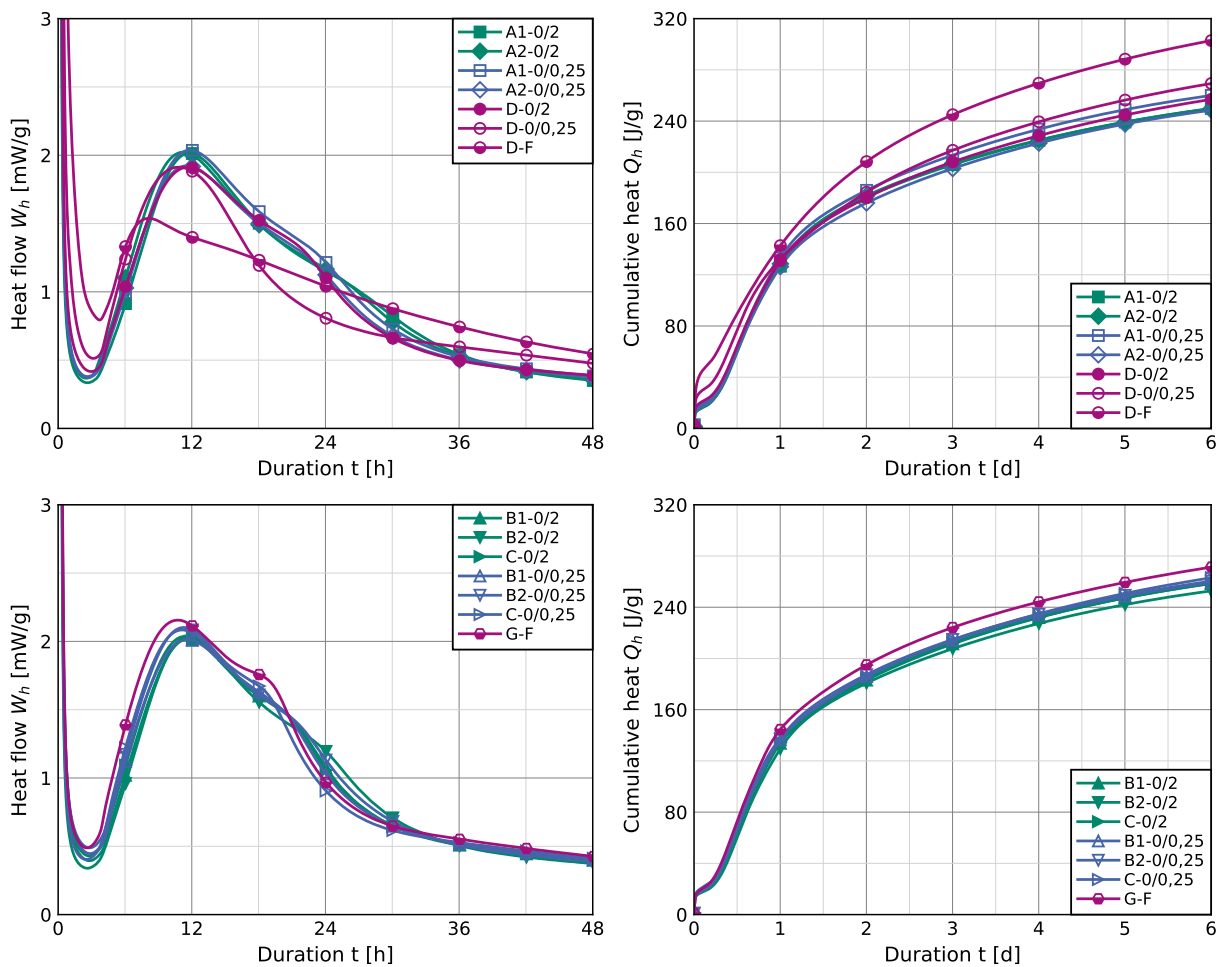


Abb. 2.30: Hydratationswärmefflüsse von ausgewählten Mischungen aus 70 m% CEM I und 30 m% bei 600 °C aufbereiteter Realstoffe

2.2.4 Realstoffe: Mörtелеigenschaften infolge der Betonzusatzstoffe

Analog zu den Mörtelversuchen an Mischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Modellstoffen wurden aktivierte Realstoffe verwendet, um den Einfluss auf die Festigkeit und Festigkeitsbildung zu untersuchen. Der Mischungsentwurf entsprach dabei der Mörtelzusammensetzung in Abschnitt 2.1.5. Für jeden aktivierten Realstoff wurden mindestens zwei Mischungen mit $\frac{w}{b} = \{0,4; 0,5\}$ bei einer CEM I-Substitution von $f = 0,3$ hergestellt. Einzelne Versuche fanden bei $\frac{w}{b} = 0,5$ und $F = 0,1$ statt. Auf $f = 0,5$ wurde verzichtet.

Parallel dazu wurden Referenzmischungen mit etablierten Betonzusatzstoffen (Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L)) hergestellt. Ein Probensatz bestand aus jeweils vier Mischungen, bei denen der Anteil der Betonzusatzstoffe am Gesamtbindemittelgehalt b zu $f = 0,1$, $f = 0,3$ und $f = 0,5$ bei einem Wasserbindemittelwert von $\frac{w}{b} = 0,50$ sowie $f = 0,3$ bei $\frac{w}{b} = 0,40$ variiert wurde. Zusätzlich wurde jeweils ein weiterer Probensatz aus jeweils zwei Mischungen mit $f = 0,3$ hergestellt, wobei bei einer Mischung $\frac{w}{b} = 0,50$ gewählt und bei der zweiten Mischung $\frac{w}{b}$ in Anbetracht der erwarteten Reaktivität variiert wurde ($\frac{w}{b} = 0,45$ für S, $\frac{w}{b} = 0,40$ für FA, $\frac{w}{b} = 0,35$ für L).

Je Mischung wurden sechs Prismen hergestellt und im Alter von 2 d und 28 d auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft. Die Probenlagerung und Prüfrandbedingungen entsprachen dem Vorgehen in Abschnitt 2.1.5. Ergebnisse enthalten Tab. B.19, Tab. B.20 und Tab. B.21.

2.2.4.1 Festigkeitsentwicklung

Abbildung 2.31 zeigt Ergebnisse für den Festigkeitsquotient R_2 für Mörtel mit CEM I bei unterschiedlichen $\frac{w}{z}$ -Werten sowie dem partiellen Austausch von CEM I durch Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) oder Kalksteinmehl (L). Insbesondere für CEM I, aber auch für Mörtel mit Betonzusatzstoffen, beschleunigt sich die Festigkeitsbildung mit höherer Druckfestigkeit im Alter von 28 d. Bei gleicher Festigkeit führt der partielle Austausch von CEM I durch latent-hydraulischen Hüttensand oder puzzolanische Steinkohlenflugasche zu einer reduzierten Festigkeit im Alter von 2 d. R_2 liegt für diese Mischungen im Bereich von 0,4 bis 0,5. Der Austausch von CEM I durch inertes Kalksteinmehl hat verglichen mit Hüttensand oder Steinkohlenflugasche den größten Einfluss auf die Mörteldruckfestigkeit. Davon abgesehen wird der Festigkeitsquotient R_2 jedoch nicht zusätzlich beeinflusst. Mischungen mit CEM I und Kalksteinmehl sowie Mischungen mit reinem CEM I weisen festigkeitsabhängig Werte von R_2 im Bereich 0,5 bis 0,7 auf. Bei gleicher Festigkeit im Alter von 28 d weisen diese Mischungen jeweils tendenziell höhere 2 d-Druckfestigkeiten auf als Mischungen gleicher Festigkeit mit Steinkohlenflugasche oder Hüttensandmehl.

Die Druckfestigkeitsentwicklung von Mischungen mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen zeigt ähnliche Werte von R_2 auf wie die reinen CEM I-Mischungen, wobei bei gleicher 28 d-Druckfestigkeit sogar tendenziell höhere Werte für R_2 erreicht werden – unabhängig von der Aufbereitungstemperatur.

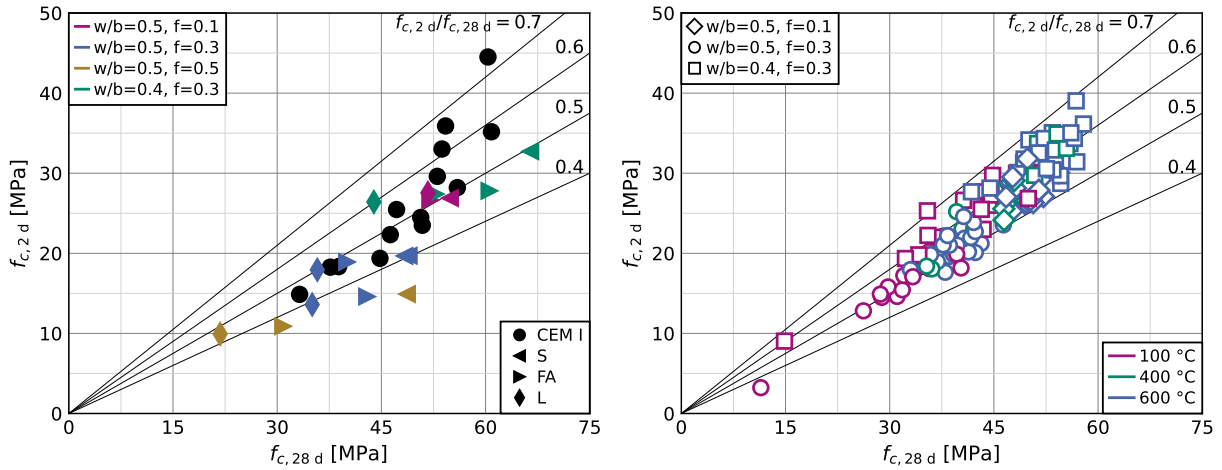


Abb. 2.31: Mörteldruckfestigkeit f_c im Alter von 2 d in Abhängigkeit der Mörteldruckfestigkeit im Alter von 28 d für unterschiedliche Mischungen, bei denen CEM I partiell durch etablierte Betonzusatzstoffe (links) und aufbereitete Realstoffe (rechts) substituiert wurde

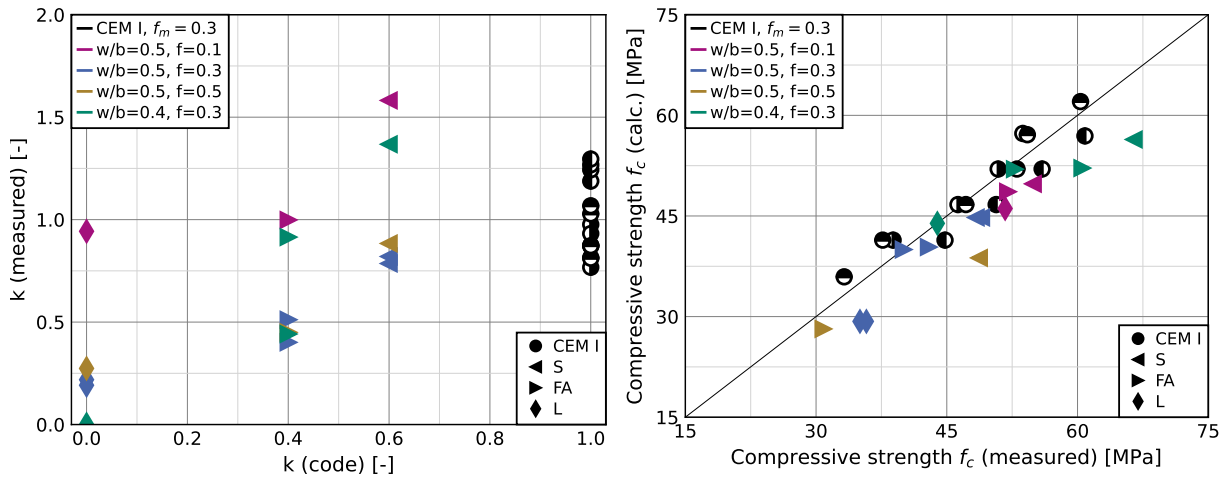


Abb. 2.32: Links: berechnete k -Werte für Kalksteinmehl, Steinkohlenflugasche, Hüttensand und CEM I (k_{ist}) über den in DIN EN 206 vorgegebenen Werten (k_{code})
Rechts: mittels $k_{measured}$ vorhergesagte Mörteldruckfestigkeit $f_{c,calc}$ über gemessener Mörteldruckfestigkeit $f_{c,28d}$

2.2.4.2 Einfluss auf die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen

Analog zum Vorgehen in Abschnitt 2.1.5 wurden zunächst k -Werte für Kalksteinmehl, Steinkohlenflugasche und Hüttensand berechnet, die in Abb. 2.32 den jeweiligen in DIN EN 206 vorgegebenen Werten gegenübergestellt werden. Hierbei zeigt sich i. A. eine normtypische Überschreitung der Bemessungswerte, die dazu führt, dass Mörteldruckfestigkeiten die Erwartungswerte übersteigen. Auffällig ist zudem, dass v. a. bei einem geringen Bindemittelanteil von $f = 0,1$ hohe k -Werte bestimmt werden. Abbildung 2.32 zeigt außerdem aus den Messwerten in Abb. 2.20 theoretisch berechnete k -Werte von CEM I, für die angenommen wurde, dass ein Betonzusatzstoff mit $k_{code} = 1,0$ mit einem Anteil von $f = 0,3$ verwendet wurde. Die berechneten Werte von $k_{measured}$ liegen zwischen 0,77 und 1,30 und veranschaulichen die in den Analysen zu erwartende Ergebnisstreuung.

55 aufbereitete Realstoffe wurden für die Herstellung von 137 Mörtelmischungen verwendet. Da drei Mischungen verworfen werden mussten, verblieben 52 Mischungspaare mit $f = 0,3$, für die Ergebnisse für beide betrachteten $\frac{w}{b}$ -Werte vorlagen. Über alle 52 Serien hinweg lag der Mittelwert für $\frac{w}{b} = 0,4$ bei $k = 0,27$, für $\frac{w}{b} = 0,5$ bei $k = 0,31$, wobei die (Nicht-)Berücksichtigung teilweise deutlicher Ausreißer zu Verzerrungen führen kann.

Abbildung 2.33 zeigt analog zu Abb. 2.21 den Zusammenhang zwischen k -Werten, die aus den Versuchsergebnissen für $f = 0,3$ berechnet wurden, und dem Massenverlust Δm bei der thermischen Aufbereitung.

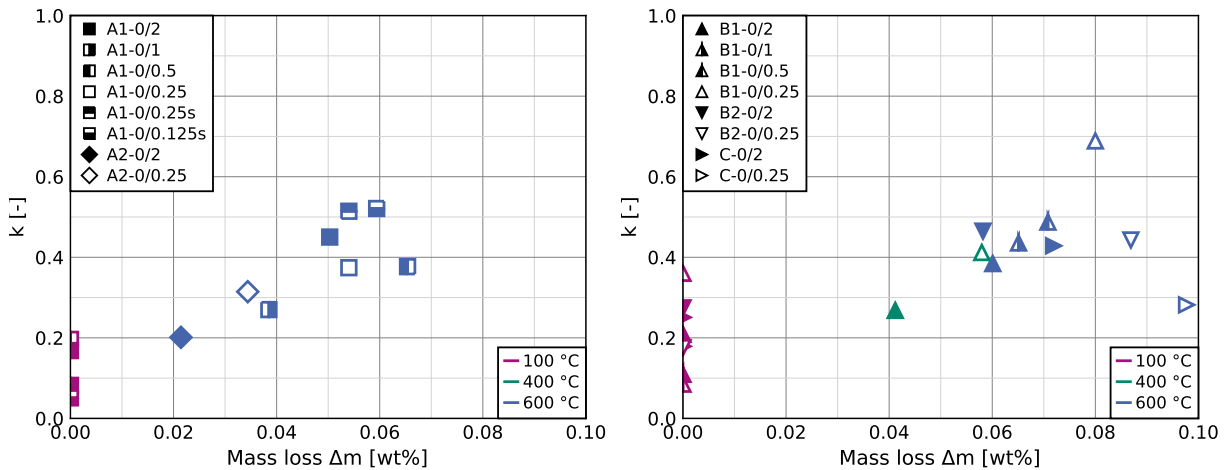


Abb. 2.33: k -Werte ausgewählter aufbereiteter Realstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung (jeweils Mittelwerte für $\frac{w}{b} = 0,40$ und $\frac{w}{b} = 0,50$)

Die Betonbrechsande in Abb. 2.33 wurden je Diagramm vom gleichen Hersteller zur Verfügung gestellt. Die Varianten A1 und A2 bzw. B1 und B2 entstammten dabei sogar den selben Werken, sodass von der selben Aufbereitungstechnik ausgegangen werden kann. Für die betrachteten Materialien kann ein linearer Zusammenhang zwischen dem Massenverlust bei der thermischen Aufbereitung und den ermittelten k -Werten beobachtet werden. Dabei unterscheiden sich die Massenverluste mit unterschiedlichen Temperaturen, unterschiedlichen Vorsiebungen und auch unterschiedlichen Chargen der Ausgangsstoffe. Die Varianten des Ausgangsstoffs C weisen vergleichsweise hohe Massenverluste auf, die sich jedoch nicht durchgängig in hohen k -Werten niederschlagen. Der Ausgangsstoff C stammt zwar vom selben Hersteller wie B1 und B2, jedoch einem anderen Werk mit einer anderen Aufbereitungstechnik.

Bei der Betrachtung der weiteren Realstoffe, die nicht in Abb. 2.33 dargestellt werden, lassen sich ebenfalls mit steigendem Massenverlust tendenziell steigende k -Werte erkennen (Abb. 2.34). Allerdings ist hier die Streuung im Vergleich zu Abb. 2.33 deutlich erhöht, wobei berücksichtigt werden muss, dass den Werten in Abb. 2.34 sechs unterschiedliche Aufbereitungsverfahren bzw. Standorte zugrunde liegen.

Gleichung 2.13 zeigt eine gute Vorhersagegüte für die k -Werte. Hierbei wurde $k_{a0} = 0,08$ verwendet, da die chemische Zusammensetzung in Tab. B.6 das Vorhandensein silikatischer Gesteinskörnung nahelegt. Abweichend zu Gleichung 2.13 wurde $k_{b0} = 0,0$ gesetzt. Die Mörteldruckfestigkeit wird durch das Modell mit einer ähnlichen Genauigkeit vorhergesagt wie bei

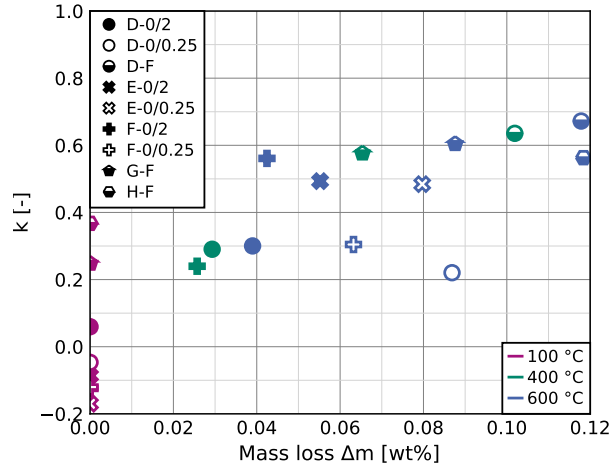


Abb. 2.34: k -Werte zusätzlicher ausgewählter aufbereiteter Realstoffe in Abhängigkeit der Massenverluste bei der thermischen Aufbereitung (jeweils Mittelwerte für $\frac{w}{b} = 0,40$ und $\frac{w}{b} = 0,50$)

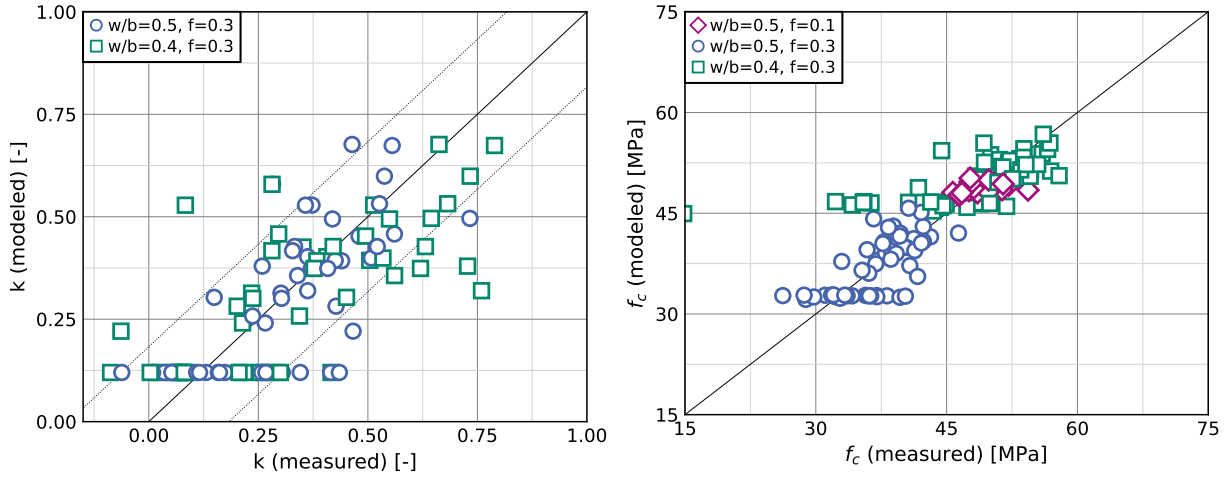


Abb. 2.35: Links: mit Gleichung 2.13 für Realstoffe berechnete Anrechenbarkeitsfaktoren k_{mod} über aus den Versuchsergebnissen bestimmte k_{ist} für $f = 0,3$
Rechts: mit k_{mod} , Gleichung 2.8 und Gleichung 2.6 berechnete Druckfestigkeit über gemessener Druckfestigkeit für alle Mischungen

der Verwendung von Modellstoffen ($R^2 = 0,607$, vgl. Abb. 2.35). Würde Gleichung 2.13 an die Ergebnisse für die Realstoffe angepasst, ergäbe sich ein geringfügig verbesserter Wert mit $R^2 = 0,611$ für $k_{h0} = 0,88$ und $k_{a0} = 0,12$.

In Abb. 2.35 sind die Ergebnisse für den aufbereiteten Realstoff „D-F-0/250-100“ aufgrund sehr niedriger Festigkeiten und eines damit verbundenen niedrigen Anrechenbarkeitsfaktors von $k = -1,03$ nicht ersichtlich. Bei der Verwendung als Betonzusatzstoff waren die Frischmörteleigenschaften nicht durch die übliche Fließmittelzugabe steuerbar; es kam u. a. zu einer erhöhten Schaumbildung. Es wird vermutet, dass dies auf Betonzusatzmittelreste zurückzuführen ist, die erst bei einer thermischen Behandlung abgebaut werden: Das gleiche Material erreichte bei einer Aufbereitungstemperatur von 400 °C $k = 0,42$ und bei 600 °C $k = 0,53$. Im Allgemeinen waren die Frischmörteleigenschaften bei Mörteln mit aufbereiteten Realstoffen schwieriger mit Fließmittel einzustellen als bei den in Abschnitt 2.1.5 beschriebenen Versuchen mit Modellstoffen. Besonders auffällig war dies bei den Varianten A1-0/0,25u und A1-0/0,125. Hier wurde die Besonderheit betrachtet, wenn keine Mahlung der Realstoffe erfolgte. A1-0/0,125 wies dabei eine

ähnliche Partikelgrößenverteilung auf wie die übrigen Varianten, während A1-0/0,25u gröber war. Jedoch war hier die Verarbeitbarkeit deutlich beeinträchtigt und musste mit vergleichsweise hohen Fließmitteldosierungen kompensiert werden. Auf die Ergebnisse für k hatte dies jedoch keinen nachteiligen Effekt (vgl. Abb. 2.33). Vermutet wird ein Einfluss der Porosität der Betonbrechsande, der sich durch die vorliegenden Versuchsergebnisse jedoch nicht belegen ließ.

2.3 Betone mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Betonzusatzstoffen

Nachdem sich die Arbeitspakete AP 1 und AP 2 auf die Untersuchung des Beitrags von Betonbrechsanden unterschiedlicher Zusammensetzung und thermisch-mechanischer Aufbereitung auf die Druckfestigkeit von Mörteln fokussierten, sollte im Arbeitspaket AP 3 die Übertragung der Ergebnisse auf Betone erfolgen, wobei neben der zeitlichen Festigkeitsentwicklung die Auswirkung der CEM I-Substitution durch thermisch-mechanisch aufbereitete Betonbrechsande auf das Verformungsverhalten sowie dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften bestimmt wurde. Zudem wurden die hergestellten Betone mit Realstoffen hinsichtlich ihrer umweltrelevanten Eigenschaften untersucht. Dies war ursprünglich im Rahmen des Arbeitspakets AP 2.5 an Mörteln vorgesehen, wurde jedoch aufgrund der größeren Praxisnähe an den selben Betonen durchgeführt, für die die zeitliche Entwicklung der Festigkeit untersucht wurde.

Die Grundlage der Bewertung der Leistungsfähigkeit der Betone bzw. thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsande als Betonzusatzstoffe erfolgte dabei anhand geltender Regelwerke: Für das Festigkeits- und Verformungsverhalten wird die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d verwendet, um weitere bemessungsrelevante Kenngrößen rechnerisch abzuleiten. Dementsprechend werden die in [3] definierten empirischen Zusammenhänge hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit untersucht. Für das Korrosionsverhalten enthält DIN 1045-2:2023-08 ein deskriptives Bemessungskonzept, bei dem Betone, die Anforderungen an ihre Zusammensetzung einhalten, einer Expositionsklasse zugeordnet werden. Der Gehalt bzw. die Abgabe umweltrelevanter Stoffe ist schließlich in der Ersatzbaustoffverordnung der Bundesrepublik Deutschland über einzuhaltende Höchstwerte legislativ geregelt.

2.3.1 Betonherstellung und Frischbetoneigenschaften

Für die Untersuchung des Langzeitverhaltens von Betonen wurden insgesamt 52 Mischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt. Der Mischungsentwurf wurde in Vorversuchen so konzipiert, dass die Basismischungen mit CEM I ohne Betonzusatzstoffe eine leicht zu verarbeitende, stabile Konsistenz aufwies. Aus verfahrenstechnischen Gründen wurde ein Größtkorndurchmesser von 8 mm gewählt. Dieser erlaubte für einige Versuche die Verwendung von prismatischen Probekörpern mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$. Dadurch konnte verglichen mit einem Beton mit einem Größtkorndurchmesser von 16 mm das Betonvolumen einer jeden Mischung auf $< 10 \text{ l}$ reduziert werden, was eine deutlich geringere Menge an aufzubereitenden Bindemitteln erforderte.

Für die Betone wurde daher der gleiche Rheinsand (0/2 mm, Kornrohichte $\rho_{rd} = 2,63 \text{ kg/m}^3$) verwendet, der bei der Herstellung der Modellstoffe und der Versuche zur Festigkeitsentwicklung in Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.2 zum Einsatz kam. Zusätzlich wurde aus der selben Gewinnungsstätte ein Feinkies (2/8 mm, Kornrohichte $\rho_{rd} = 2,56 \text{ kg/m}^3$) beschafft. Die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen ist in Abb. 2.3 abgebildet. Die Gesamtsieblinie der Betone setzte sich volumetrisch aus einem Drittel Sand und zwei Dritteln Feinkies zusammen. Der Gesteinskörnungsgehalt am Beton betrug 60 v% und wurde für alle Mischungen unverändert gelassen.

Für die Basismischung (CEM I-2) wurde ein Wasserzementwert von $\frac{w}{z} = 0,5$ angesetzt. Gemäß DIN 1045-2:2023-08 erfüllt dieser die Anforderungen der Expositionsklassen XC1 – XC4, XD1 – XD2, XF1 – XF3, XA1 – XA2 sowie XM1 und weist damit einen hohen Korrosionswiderstand auf. Zusätzlich wurde eine Referenzmischung (CEM I-1) mit einem Wasserzementwert von $\frac{w}{z} = 0,6$ hergestellt und geprüft, um den Einfluss der Betondruckfestigkeit abzubilden.

Für die Untersuchung jedes Betonzusatzstoffs wurden zwei Mischungen hergestellt. Tabelle B.22 enthält weitere Informationen zu den individuellen Zusammensetzungen.

1. Mischung mit konstantem Wasserbindemittelwert von $\frac{w}{b} = 0,5$, bei dem die Reaktivität der Betonzusatzstoffe unberücksichtigt blieb (Suffix „-1“). Dies führte i. d. R. zu einem erhöhten $\frac{w}{z_{eq}}$ -Wert und damit zu einer reduzierten Betondruckfestigkeit.
2. Mischung mit konstantem äquivalenten Wasserzementwert $\frac{w}{z_{eq}} = 0,5$. Diese Betone sollten vergleichbare Druckfestigkeiten erreichen. Die Reaktivität der Betonzusatzstoffe wurde entsprechend der vorangegangenen Untersuchungen über individuelle k -Werte berücksichtigt.

Als weitere Referenzmischungen wurden Betone mit Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L) als Betonzusatzstoffe hergestellt. Die Untersuchungen an ausgewählten aufbereiteten Betonbrechsanden unterteilten sich in sechs Realstoffe und sieben Modellstoffe. Diese wurden in der Regel bei 600 °C aktiviert und substituierten 30 m% des CEM I. Die Modellstoffe CEM und RS50 wurden zusätzlich bei 100 °C und 400 °C aufbereitet und nach der Aufbereitung bei 600 °C für die Substitution von 50 m% und 10 m% verwendet. Bei letzterer wurde lediglich ein Beton je Modellstoff hergestellt, da angenommen wurde, dass eine derart geringe Substitution keine signifikanten Auswirkungen auf die Betoneigenschaften haben würde. Stattdessen konnten die Betone CEM I-1 und -2 sowie FA-1 und -2 ein zweites Mal hergestellt werden, um einerseits die Datengrundlage zu verbessern und andererseits fehlgeschlagene Versuche zu kompensieren. Zur Eindeutigkeit wurden die Serien mit den Suffixen 3 und 4 anstatt 1 und 2 versehen, bezeichnen aber die gleichen Mischungszusammensetzungen.

Partikelgrößenverteilungen der thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsande finden sich in Abb. 2.12 und Abb. 2.28 sowie Abb. A.2.

Die Betonherstellung fand bei 20 °C statt. Während des Mischvorgangs wurde die Frischbetonkonsistenz über eine individuelle Dosierung eines PCE-Fließmittels eingestellt, sodass das Ausbreitmaß geprüft in Anlehnung DIN EN 1015-3:2007-05 unmittelbar im Anschluss an die Betonherstellung bei 16 cm – 20 cm lag. Die Variante wurde gegenüber der Konsistenzprüfung gemäß DIN EN 12390-5 bevorzugt, um den Materialbedarf möglichst gering zu halten. Teilweise fanden Überdosierungen des Fließmittels statt, sodass das Ausbreitmaß den Zielwert überschritt. In diesen Fällen wurden die betroffenen Mischungen für einige Minuten zurückgestellt, um sie zeitlich verzögert in die Schalungen einzubringen, damit eine Entmischung vermieden wurde.

Parallel zur Bestimmung der Frischbetonrohichte und des Luftgehalts wurden Stahlschalungen gefüllt und gegen Austrocknung geschützt bis zum Ausschalzeitpunkt nach 1 d gelagert. Anschließend wurden die Proben entsprechend des Prüfprogramms bis zu den jeweiligen Prüfzeitpunkten individuell nachbehandelt.

2.3.2 Zeitliche Festigkeitsentwicklung

Für die Untersuchung der zeitlichen Festigkeitsentwicklung wurden sechs Prismen mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$ hergestellt und nach dem Ausschalen bis zu den Prüfzeitpunkten bei 20°C unter Wasser gelagert. Die Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeit nach DIN EN 196-1:2016-11 fand im Betonalter von 2 d und 28 d an jeweils drei Proben statt. Für die Druckfestigkeit wurden jedoch nur jeweils drei Prismenhälften verwendet. Die übrigen drei Prismenhälften wurden zurück ins Wasserbad gelegt und im Alter von 56 d und 98 d auf ihre Druckfestigkeit geprüft.

Die zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit (Mittelwerte und Standardabweichungen) wird in den Abbildungen 2.36, 2.37, 2.38 und B.1 veranschaulicht. Die Abbildungen enthalten zudem Regressionskurven nach Gleichung 2.2, über die die Parameter s_c und $f_{cm,ref}$ im Alter von 28 d als maßgebliche Kenngrößen der Festigkeitsentwicklung der einzelnen Betone berechnet wurden. Hierbei wurde der Exponent $r = 0,5$ gem. [3] gewählt.

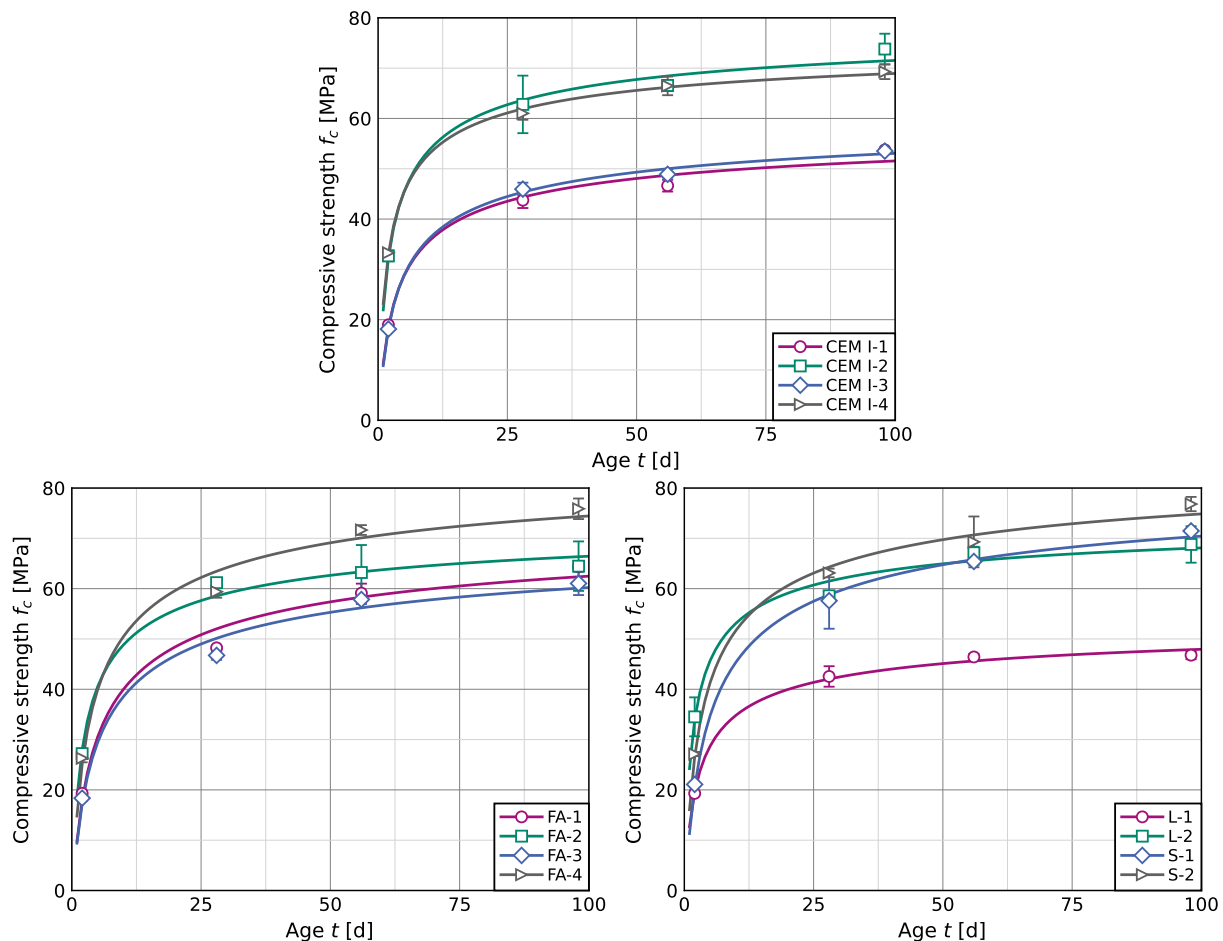


Abb. 2.36: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Referenzmischungen mit CEM I, FA, S und L im Alter von 2 d bis 28 d an jeweils drei Prismenhälften (Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Regressionskurven nach Gleichung 2.2)

Abbildung 2.36 zeigt zu einen eine gute Anpassung der Regressionskurven an die Versuchsergebnisse. Die Wiederholung der Mischungen CEM I-1/2 und FA-1/2 zeigen mit Ausnahme letzterer eine gute Wiederholungspräzision. FA-2 und FA-4 weisen zwar ähnliche Druckfestigkeiten im Alter von 2 d und 28 d auf; anschließend zeigt FA-4 jedoch nur einen deutlich geringeren

Festigkeitszuwachs als FA-2, der zudem mit einer erhöhten Streuung der Messergebnisse einhergeht. Insgesamt wird ersichtlich, dass die Referenzbetone mit FA und S eine langsamere Festigkeitsentwicklung aufweisen als die Referenzbetone mit L und reinem CEM I.

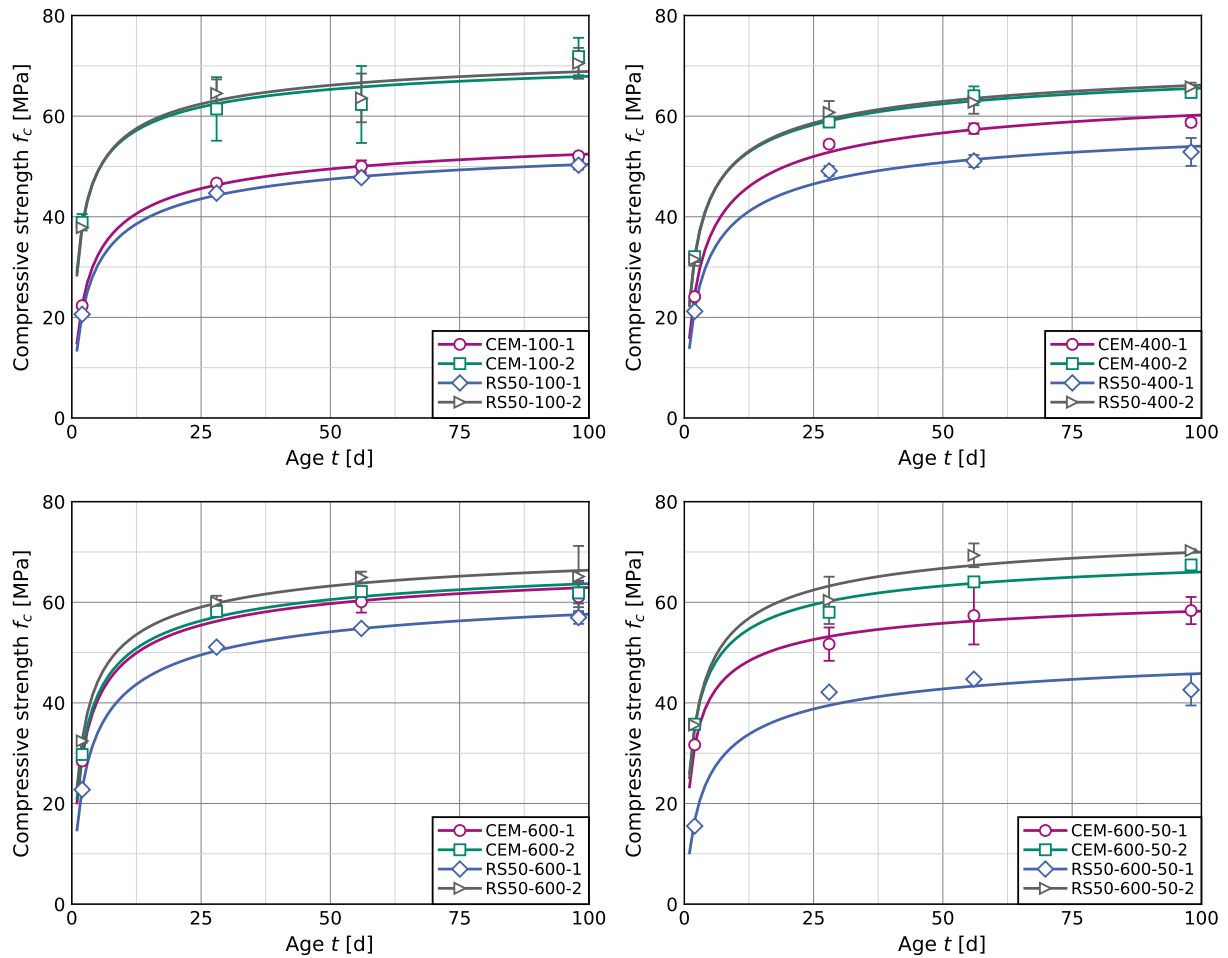


Abb. 2.37: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen mit den Modellstoffen CEM und RS50 bei unterschiedlichen Aktivierungstemperaturen und Substitutionsraten im Alter von 2 d bis 28 d an jeweils drei Prismenhälften (Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Regressionskurven nach Gleichung 2.2)

Die Betone in Abb. 2.37, bei denen CEM I anteilig durch thermisch-mechanisch aktivierte Modellstoff substituiert wurde, weisen tendenziell höhere Streuungen der Messergebnisse für die Druckfestigkeit auf als die Referenzbetone in Abb. 2.36. Gleichwohl lassen sich auch hier trotz der stark unterschiedlichen Betondruckfestigkeiten zwischen den Serien gute Regressionsergebnisse feststellen.

Die Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten realen Betonbrechsanden in Abb. 2.38 zeigen untereinander jeweils paarweise sehr ähnliche zeitliche Entwicklungen der Druckfestigkeit unter Berücksichtigung der gewählten Modellparameter für den Anrechenbarkeitsfaktor k . Lediglich die Festigkeitsentwicklung von R5 (Realstoff D-F als Filterkuchen aus dem Frischbetonrecycling) weist ein geringfügig abweichendes zeitliches Verhalten auf.

Abbildung 2.39 veranschaulicht die Ergebnisse der Untersuchungen der Festigkeitsentwicklung aller hergestellten Betone. Neben der Ergebnisse der Regressionsanalyse der Betondruckfes-

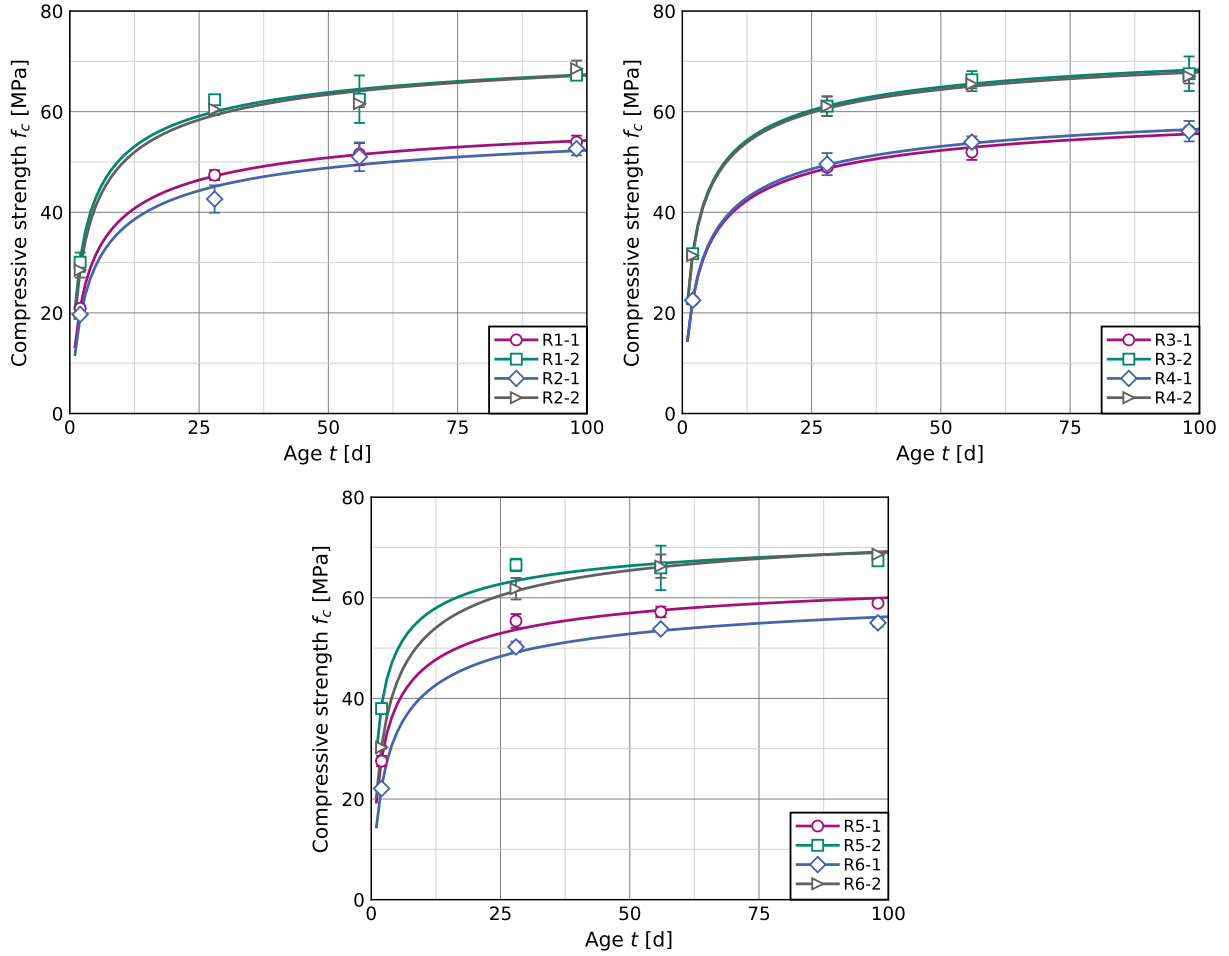


Abb. 2.38: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen mit den thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen im Alter von 2 d bis 28 d an jeweils drei Prismenhälften (Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Regressionskurven nach Gleichung 2.2)

tigkeit im Alter von 2 d, 28 d, 56 d und 98 d (Parameter s_c und Referenzdruckfestigkeit $f_{c,ref}$ im Alter von 28 d) werden die Betondruckfestigkeiten im Alter von 2 d und 28 d übereinander aufgetragen, da sich hieraus das anschauliche Festigkeitsverhältnis R_2 (vgl. Abb. 2.17 bzw Abb. 2.31) ablesen lässt (siehe Tab. B.23).

CEM I-1/3 und CEM I-2/4 entsprechen mit $s_c = 0,32$ bzw. $s_c = 0,24$ den Empfehlungen in [3] für die Bindemittelklasse CR (CEM I 42,5 R oder höher). L-1 und L-2 mit $s_c = 0,28$ bzw. $s_c = 0,22$ fallen ebenfalls in diese Kategorie, wobei [3] keine Angaben zu Kalksteinmehl als Bindemittelbestandteil macht. Die untersuchten Mischungen mit S und FA fallen in die Bindemittelklasse CN, für die [3] $s_c = 0,4 - 0,5$ angibt. Unter Vernachlässigung von FA-4 liegen die ermittelten Werte für s_c der Betone mit S und FA im Bereich $0,3 - 0,4$ und zeigen damit eine schnellere Festigkeitsentwicklung als von [3] vorhergesagt. Die Veranschaulichung durch das Festigkeitsverhältnis R_2 zeigt, dass die Betone CEM I und L im Alter von 2 d ca. 50 % ihrer 28 d-Festigkeit erreichen, während dieser Wert bei Betonen mit S und FA bei ca. 40 % liegt. Hier lässt sich beobachten, dass die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung mit steigender Druckfestigkeit zunimmt.

Sehr ähnliche Beobachtungen lassen sich für Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen machen. Die Festigkeitsentwicklung entspricht weitestgehend der von CEM I, wo-

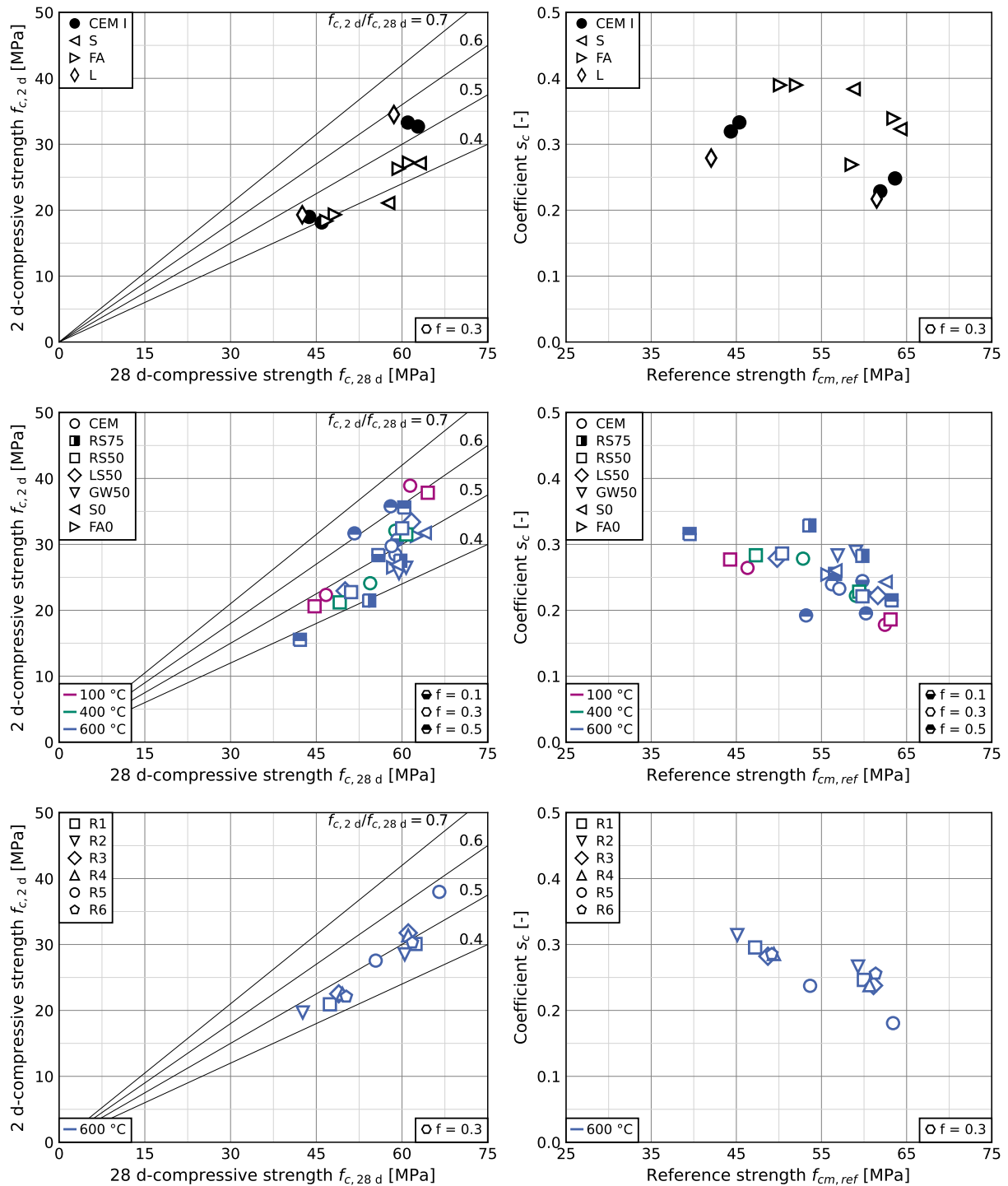


Abb. 2.39: Kenngrößen der zeitlichen Entwicklung der Druckfestigkeit der untersuchten Betone.

Oben: Referenzbetone

Mitte: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen

Unten: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

Links: Druckfestigkeit im Alter von 2 d über der Druckfestigkeit im Alter von 28 d

Rechts: Parameter s_c und $f_{cm,ref}$ aus der Regressionsanalyse

bei teilweise eine im Alter von 2 d ein größerer Anteil der 28 d-Festigkeit erreicht wird. Die Aufbereitungstemperatur hat hier – abgesehen von der Größe der Festigkeit, die über die Anwendung des k -Werts eingestellt werden kann – keinen Einfluss auf die zeitliche Entwicklung der Druckfestigkeit. Für die Modellstoffzusammensetzung gilt dies nur eingeschränkt: Während sich RS50 und CEM sich sehr ähnlich zueinander verhalten, zeigt der Modellstoff RS75, der hinsichtlich seiner Zusammensetzung zu gleichen Teilen aus CEM und RS50 verstanden werden kann, eine eher langsamere Festigkeitsentwicklung. Der Modellstoff LS50 verhält sich ähnlich wie der Modellstoff RS50. Der Modellstoff GW50, der aufgrund seiner enthaltenen Gesteinskörnung einen erhöhten k -Wert besitzt, zeigt jedoch bei gleicher Referenzdruckfestigkeit einen geringfügig erhöhten Wert für s_c . Gleiches gilt für die Modellstoffe FA0 und S0, die im Vergleich zu CEM Flugasche bzw. Hüttensand als Primärrohstoffe enthalten. Eine sinkende Substitutionsrate wirkt sich analog geringfügig reduzierend auf die Geschwindigkeit der Festigkeitsbildung aus.

Die untersuchten Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen werden durch die Modellstoffe sehr gut abgebildet. Hierbei zeigt sich, dass die Ergebnisse für die Festigkeitsentwicklung bei den betrachteten Mischungen eng beieinander liegen; lediglich R5 weist etwas höhere Festigkeiten und schnellere Festigkeitsentwicklungen auf, was für eine zu konservative Abschätzung des Anrechenbarkeitsfaktors k spricht. Insgesamt wird die Festigkeitsentwicklung aller betrachteten Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsanden sehr gut durch das in [3] enthaltene Modell abgebildet.

2.3.3 Verformungsverhalten

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens wurden sechs Prismen mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160) \text{ mm}^3$ hergestellt und nach dem Ausschalen bis zum Probenalter von 7 d bei 20°C in PE-Beuteln über Wasser gelagert, um ein Austrocknen zu verhindern. Anschließend fand eine Umlagerung in ein Prüfklima von 20°C bei 65 % rel. Luftfeuchte statt. Im Prüfalter von 28 d wurde der dynamische E-Modul an drei Prismen mittels Ultraschalllaufzeitmessungen bestimmt. Drei weitere Prismen waren mit der Betonage mit Messzapfen versehen, sodass diese in ein Messgestell gelegt werden konnten, um die Längenänderung gegen eine Referenzprobe zu messen. Die Messung der Probenlängen fand ab Beginn der Trocknung im Alter von 7 d in zeitlich gestaffelten Abständen bis zum Probenalter von 98 d statt. Eine weitere Messung wurde unmittelbar nach dem Ausschalen durchgeführt. Hierbei stellte sich jedoch heraus, dass die Messzapfen im frühen Betonalter beweglich waren, sodass die Messwerte nur eingeschränkt verwertbar sind. Nach dem Ende der jeweiligen Prüfungen im Alter von 28 d bzw. 98 d wurden die Prismen nach DIN EN 196-1:2016-11 auf ihre Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft.

Tabellarische Ergebnisse enthält Tab. B.24.

2.3.3.1 Verhältnis von Biegezug- und Druckfestigkeit

Abbildung 2.40 stellt die an denselben Prismen gemessenen Biegezug- und Druckfestigkeiten einander gegenüber. Hierin sind einerseits die nass gelagerten Prismen, die im Alter von 2 d und 28 d geprüft wurden, und die trocken gelagerten Prismen, die im Alter von 28 d und 98 d geprüft wurden, dargestellt.

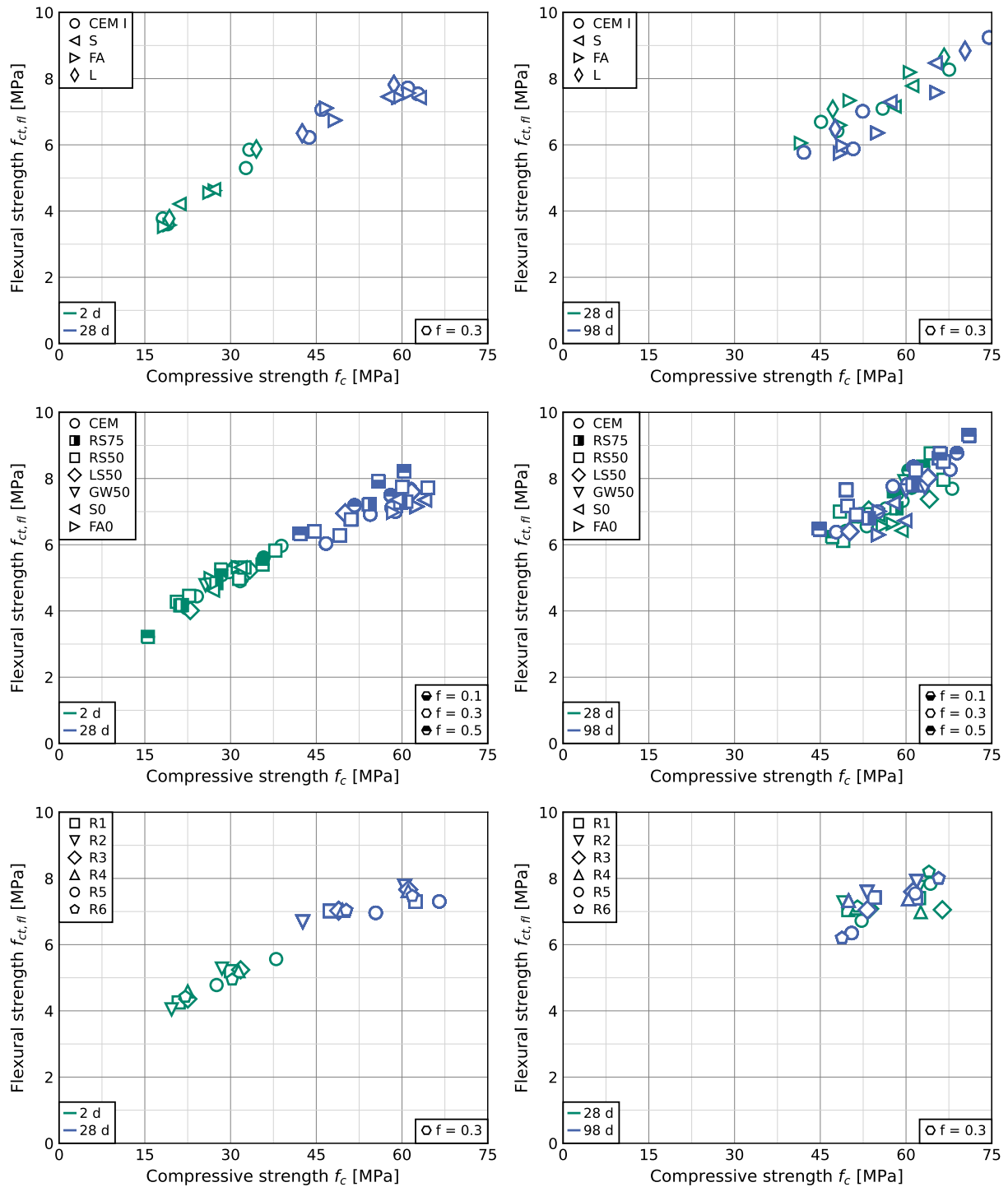


Abb. 2.40: Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone
 Oben: Referenzbetone
 Mitte: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
 Unten: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen
 Links: Ergebnisse im Alter von 2 d und 28 d an nass gelagerten Prismen
 Rechts: Ergebnisse im Alter von 28 d und 98 d an trocken gelagerten Prismen

Die Analyse der trocken gelagerten Prismen Abb. 2.40 (rechts) zeigt für die thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsande keinen erkennbaren Unterschied zwischen den im Alter von 28 d und 98 d geprüften Prismen - sowohl Biegezug- als auch Druckfestigkeit liegen für die Prüfmuster eng beieinander. Ein Festigkeitszuwachs kann für die Referenzproben festgestellt werden, wobei sich dieser auf die Druckfestigkeit beschränkt und die Biegezugfestigkeit zwischen den Prüfmustern keine Steigerung erfährt. Insgesamt liegen die Verhältnisse der Biegezug- und Druckfestigkeit für alle Mischungen im gleichen Bereich – ein Einfluss der Zementsubstitution kann weder durch etablierte Betonzusatzstoffe (Referenz) noch durch aktivierte Betonbrechsande festgestellt werden. Auch zwischen den Betonbrechsanden untereinander kann keine systematische Beeinflussung, z. B. durch den Gesteinskörnungsgehalt der Modellstoffe, festgestellt werden. Die gleichen Beobachtungen können für die im Alter von 2 d und 28 d geprüften nass gelagerten Prismen Abb. 2.40 (links) getätigt werden, wobei die beiden Prüfmuster eine große Spannweite an Festigkeiten abdecken, die sich jedoch sehr gut ergänzen.

Ein Vergleich mit [3] ist für die Biegezugfestigkeit erschwert, da sich [3] auf die Angabe von empirischen Zusammenhängen zwischen der zentrischen Zugfestigkeit mit der charakteristischen Druckfestigkeit beschränkt. Unter der Annahme, dass die Prismendruckfestigkeit der Würfeldruckfestigkeit entspricht und letztere die charakteristische Würfeldruckfestigkeit $f_{ck,cube}$ um 8 MPa übersteigt, kann die mittlere zentrische Zugfestigkeit in [3] mit Gl. 14.6-3 berechnet oder aus Tabelle 14.6-3 abgelesen werden. Die Biegezugfestigkeit lässt sich anschließend in Abhängigkeit der Prismenhöhe h_b [mm] berechnen (siehe Gleichung 2.30).

$$f_{ct,fl} = \alpha_{fl} \cdot f_{ctm} \quad (2.29)$$

$$= \alpha_{fl} \cdot (1,8 \cdot \ln(f_{ck}) - 3,1) \quad (2.30)$$

$$\alpha_{fl} = \frac{0,06 \cdot h_b^{0,7}}{1 + 0,06 \cdot h_b^{0,7}} \quad (2.31)$$

Gleichung 2.30 wurde für die in [3] definierten Betonfestigkeitsklassen ausgewertet. Die empirisch vorhergesagten Werte für die Biegezugfestigkeit entsprechen damit in guter Näherung den experimentell ermittelten Werten aller Mischungen.

2.3.3.2 Dynamischer E-Modul

Abbildung 2.41 zeigt den Zusammenhang zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und der an den selben Proben gemessenen Druckfestigkeit im Alter von 28 d.

Der dynamische Elastizitätsmodul der Referenzbetone folgt unabhängig von der Betonzusatzstoffart einem nichtlinearen Zusammenhang mit der Betondruckfestigkeit.

Die Betrachtung der Ergebnisse für Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen zeigt geringfügige systematische Unterschiede zwischen den einzelnen Modellstoffen. Die Modellstoffe CEM, RS50 (unabhängig von der Aufbereitungstemperatur), LS50 und LS75 zeigen tendenziell höhere dynamische E-Moduln als FA0, S0 und GW50, die höhere k -Werte aufweisen als ihre Entsprechungen CEM bzw. RS50 mit anderer Bindemittelkomposition bzw. Gesteins-

Tab. 2.6: Nach Gleichung 2.30 berechnete Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeitsklassen mit zugehörigen mittleren Würfeldruckfestigkeiten

f_{ck} MPa	$f_{ck,cube}$ MPa	$f_{cm,cube}$ MPa	f_{ctm} MPa	$f_{ct,fl}$ MPa
12	15	23	1,4	3,1
16	20	28	1,9	4,3
20	25	33	2,3	5,2
25	30	38	2,7	6,1
30	37	45	3,0	6,8
35	45	53	3,3	7,5
40	50	58	3,5	8,0
45	55	63	3,8	8,5
50	60	68	3,9	8,9
55	67	75	4,1	9,3

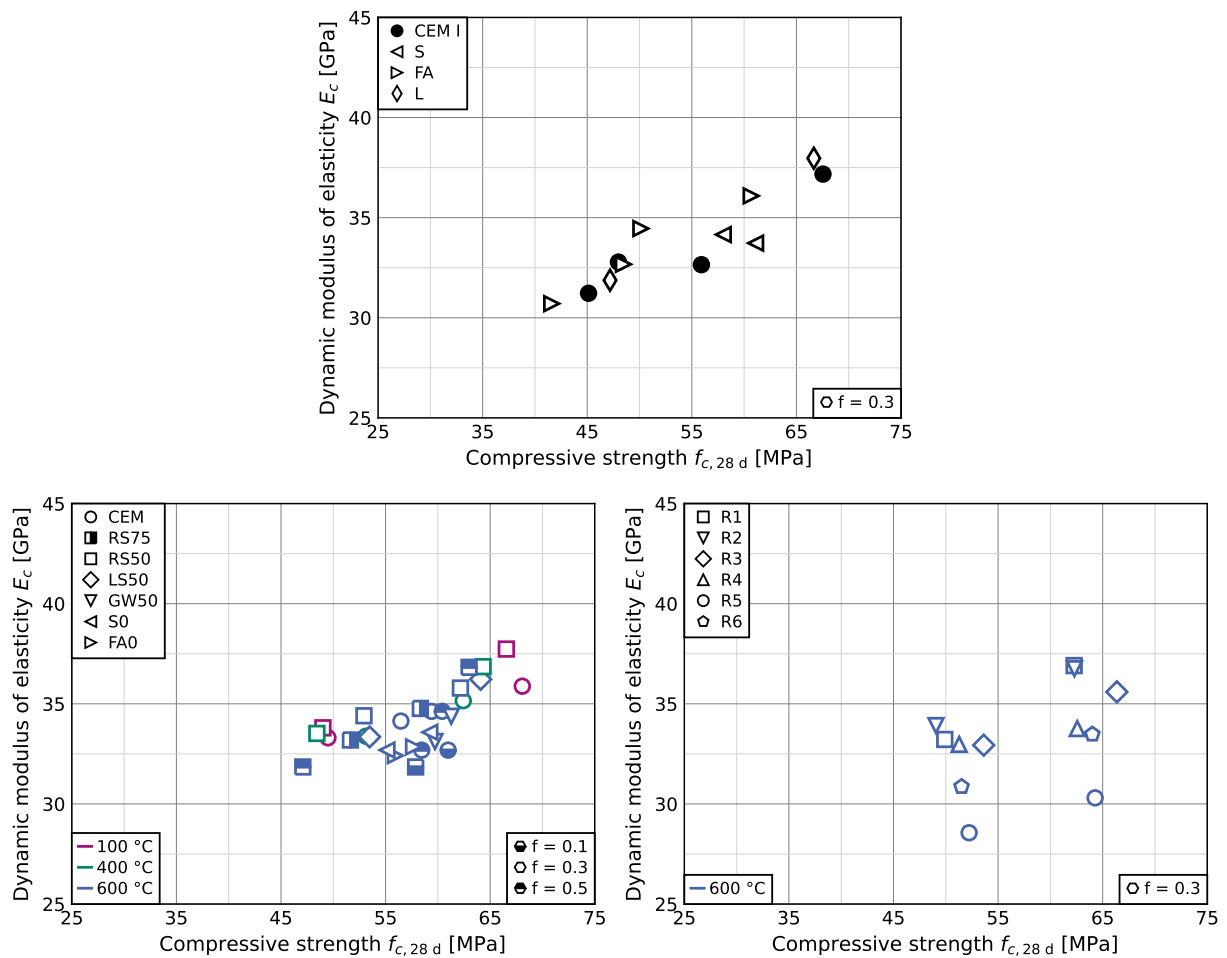


Abb. 2.41: Dynamischer E-Modul in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone
Oben: Referenzbetone
Unten links: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
Unten rechts: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

körnung. Analog wirkt sich eine sinkende Substitutionsrate leicht negativ auf den dynamischen E-Modul aus.

Die untersuchten Realstoffe zeigen ein ähnliches Verhalten: Der dynamische E-Modul folgt hier keinem ersichtlichen Zusammenhang mit der Betondruckfestigkeit, sondern nimmt (im Mittel über beide Mischungsansätze) in der Reihenfolge R2–R1–R3–R4–R6–R5 ab. Der gleichen Anordnung folgen die k -Werte der jeweiligen Serien.

2.3.3.3 Schwinden

Das Schwinden ϵ_{cs} von Beton setzt sich zusammen aus einem trocknungsunabhängigen Grundswinden ϵ_{cbs} und dem Trocknungsswinden ϵ_{cds} . Da das Grundswinden einerseits für normalfeste Betone vernachlässigbar ist und andererseits insbesondere im jungen Betonalter auftritt, was mit dem vorliegenden Versuchsaufbau jedoch nicht aufgezeichnet werden konnte, wird angenommen, dass die gemessenen Gesamtverformungen der Probekörper auf das Trocknungsswinden zurückzuführen sind.

Die Vorhersage des Trocknungsswindens von Beton erfolgt nach [3] Gl. 14.6-72 ff über einen Produktansatz, bei dem die Zeitfunktion $\beta_{ds}(t - t_s)$ für die Trocknungsdauer $(t - t_s)$ mit einer festigkeitsabhängigen Endschwindverformung ϵ_{cds0} und einer luftfeuchteabhängigen Skalierung β_{RH} multipliziert wird (Gleichung 2.32).

$$\epsilon_{cds}(t, t_s) = \epsilon_{cds0}(f_{cm}) \cdot \beta_{RH}(RH) \cdot \beta_{ds}(t - t_s) \quad (2.32)$$

$$\epsilon_{cds0}(f_{cm}) = [(220 + 110 \cdot \alpha_{ds1}) \cdot \exp(-\alpha_{ds2} \cdot f_{cm})] \cdot 10^{-6} \quad (2.33)$$

$$\beta_{RH}(RH) = -1,55 \cdot \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_{eq}} \right)^3 \right] \quad \text{für } RH = 65 \% \quad (2.34)$$

$$RH_{eq} = 99 \cdot \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0,1} \leq 99 \quad (2.35)$$

$$\beta_{ds}(t - t_s) = \left(\frac{(t - t_s)}{0,035 \cdot h^2 + (t - t_s)} \right)^{0,5} \quad (2.36)$$

$$h = 2 \cdot \frac{A_c}{U} \quad (2.37)$$

Die Zeitfunktion β_{ds} hängt dabei von der Trocknungsdauer und der wirksamen Querschnittsdicke ab, die für die verwendeten Prismen einheitlich $h = 20 \text{ mm}$ beträgt. Dementsprechend unterscheiden sich die Schwindverformungen der verschiedenen Betone in der Größe ihrer jeweiligen Endwerte für $\beta_{ds}(\infty) = 1$, aber nicht in der relativen zeitlichen Rate. Daher wurde in einem ersten Schritt der Analyse der Schwindversuche der jeweilige Endwert jedes Schwindversuchs über eine Regressionsanalyse berechnet, bei der β_{ds} an die jeweiligen Mittelwerte der Schwindverformungen angepasst wurde.

Für die Regressionsanalysen blieben einzelne Messergebnisse unberücksichtigt. Für die übrigen Versuchsergebnisse wurde eine Plausibilitätskontrolle durchgeführt, um die generelle Eignung der Zeitfunktion zu bewerten.

Während die meisten Betone in Anbetracht der hohen Streuungen der Versuchsergebnisse gut abgebildet werden können, entwickelt sich das Schwinden insbesondere bei den Betonen CEM I-3, CEM-100-1/2, RS50-100-1/2 langsamer als durch den Ansatz von β_{cs} vorhergesagt. Dement-

sprechend wird das Endschwindmaß durch die Regressionsanalyse betragsch unterschätzt. Die Ergebnisse der Analysen veranschaulichen Abb. 2.42, Abb. 2.43, Abb. 2.44 und Abb. B.2.

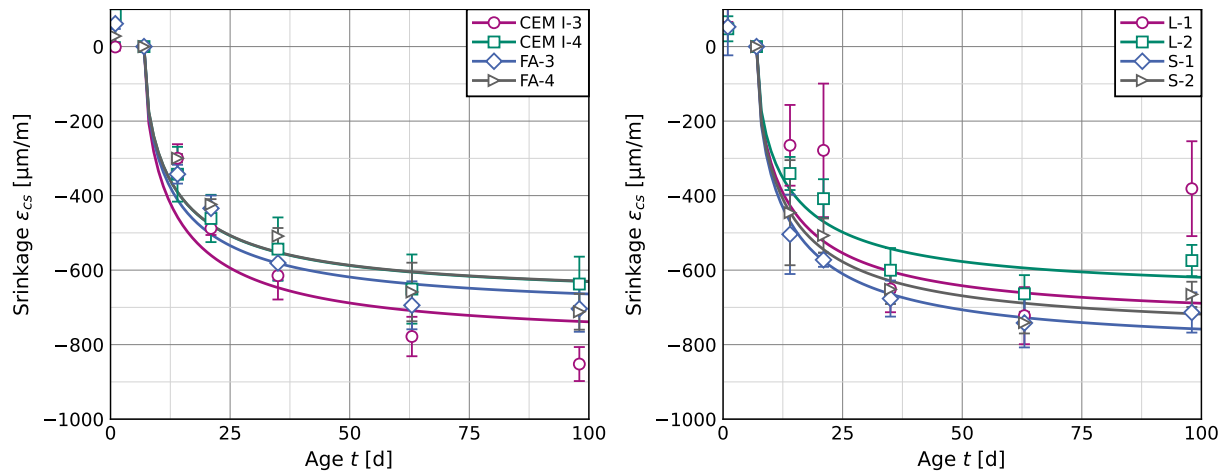


Abb. 2.42: Schwindverformungen der Referenzbetone

Mittelwerte und Standardabweichungen aus drei Proben sowie Anpassung von Gleichung 2.32 an die Versuchsergebnisse

Für LS-1 wurden die Zeitpunkte 21 d und 91 d nicht für die Berechnung verwendet

Die derart berechneten Endschwindmaße sind in Abb. 2.45 in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeiten aus Abschnitt 2.3.1 und in Abhängigkeit der dynamischen E-Moduln dargestellt. Mit der Ausnahme der beiden Betone mit Hüttensand (S) zeigt sich ein linearer Zusammenhang der Referenzbetone von der Betondruckfestigkeit. Die Auswertung von Gleichung 2.32 bei $RH = 65\%$ für die Bindemittelklasse CR (CEM I 42,5 R und höher) ergibt $\epsilon_{cds0}(f_{cm,cube} = 45 \text{ MPa}) \cdot \beta_{RH} = -614 \mu\text{m/m}$ sowie $\epsilon_{cds0}(f_{cm,cube} = 63 \text{ MPa}) \cdot \beta_{RH} = -491 \mu\text{m/m}$ und für die Bindemittelklasse CN (z. B. CEM I ersetzt durch 30 m% Flugasche) $\epsilon_{cds0}(f_{cm,cube} = 45 \text{ MPa}) \cdot \beta_{RH} = -460 \mu\text{m/m}$ sowie $\epsilon_{cds0}(f_{cm,cube} = 63 \text{ MPa}) \cdot \beta_{RH} = -368 \mu\text{m/m}$. Während der relative Einfluss der Betondruckfestigkeit näherungsweise approximiert wird, bietet das Modell in [3] nur eine schlechte Vorhersage der Schwindverformung. Allerdings weist [3] darauf hin, dass die Betondruckfestigkeit nur ein Ersatzparameter ist und das Trocknungsschwinden vom $\frac{w}{z}$ -Wert und dem Gesteinskörnungsgehalt abhängt. Insbesondere letzterer ist verglichen mit üblichen Betonen im vorliegenden Fall gering, was zu einer erhöhten Schwindverformung führen kann. Die vorliegende erhöhte betragliche Schwindverformung infolge der Zementsubstitution durch Hüttensand wird durch [3] jedoch gegenteilig vorhergesagt.

Die thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsande zeigen im Vergleich mit den Referenzserien überwiegend erhöhte Endschwindverformungen. Lediglich die Betone mit CEM-100 und RS50-100 weisen betragsch reduzierte Schwindverformungen auf, wobei hier die o. a. Unterschätzung des Endwerts beachtet werden muss. Die Betone mit den Modellstoffen FA0-600, S0-600 und GW50-600 zeigen gegenüber den anderen Modellstoffen bei gleicher Druckfestigkeit zusätzlich erhöhte Schwindverformungen. Für alle anderen Modellstoffe und Realstoffe lassen sich mit steigender Druckfestigkeit sinkende Schwindverformungen erkennen.

Ein besserer Zusammenhang als mit der Betondruckfestigkeit lässt sich für alle Betone (mit Ausnahme der Serien CEM-100-1/2 und RS50-100-1/2) zwischen der Schwindverformung und dem dynamischen E-Modul erkennen.

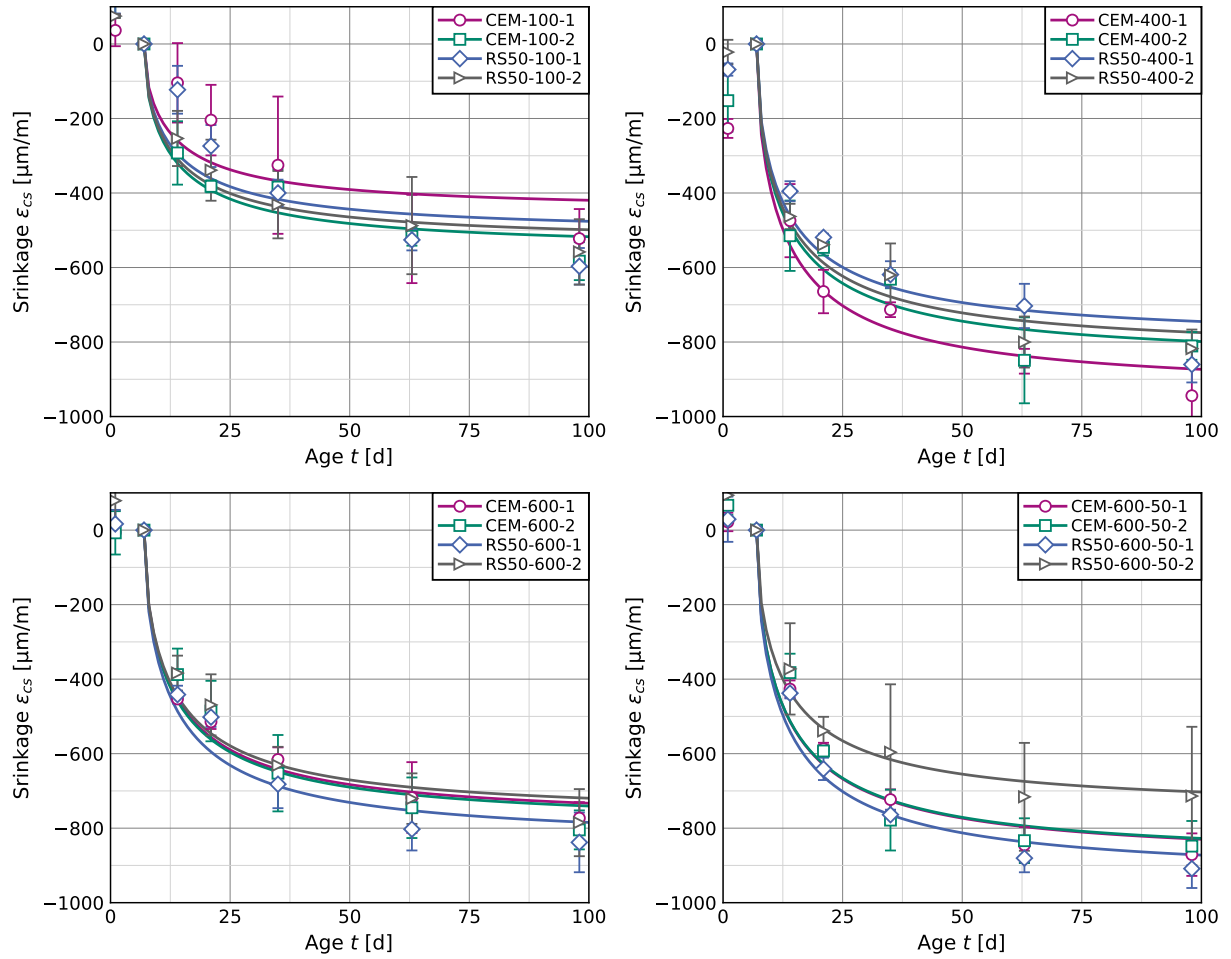


Abb. 2.43: Schwindverformungen der der Mischungen mit den Modellstoffen CEM und RS50 bei unterschiedlichen Aktivierungstemperaturen und Substitutionsraten
Mittelwerte und Standardabweichungen aus drei Proben sowie Anpassung von Gleichung 2.32 an die Versuchsergebnisse

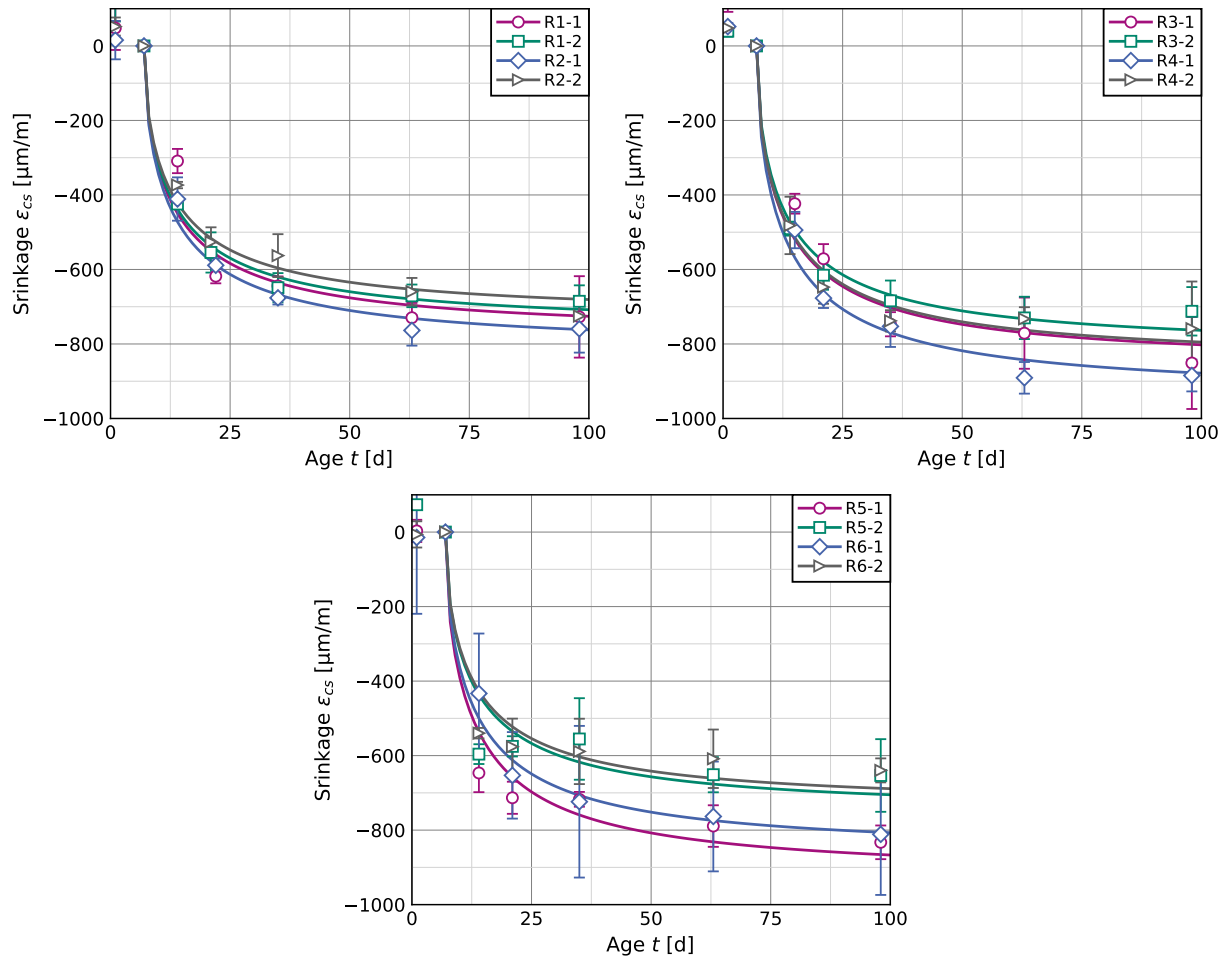


Abb. 2.44: Schwindverformungen der Mischungen mit den thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen Mittelwerte und Standardabweichungen aus drei Proben sowie Anpassung von Gleichung 2.32 an die Versuchsergebnisse

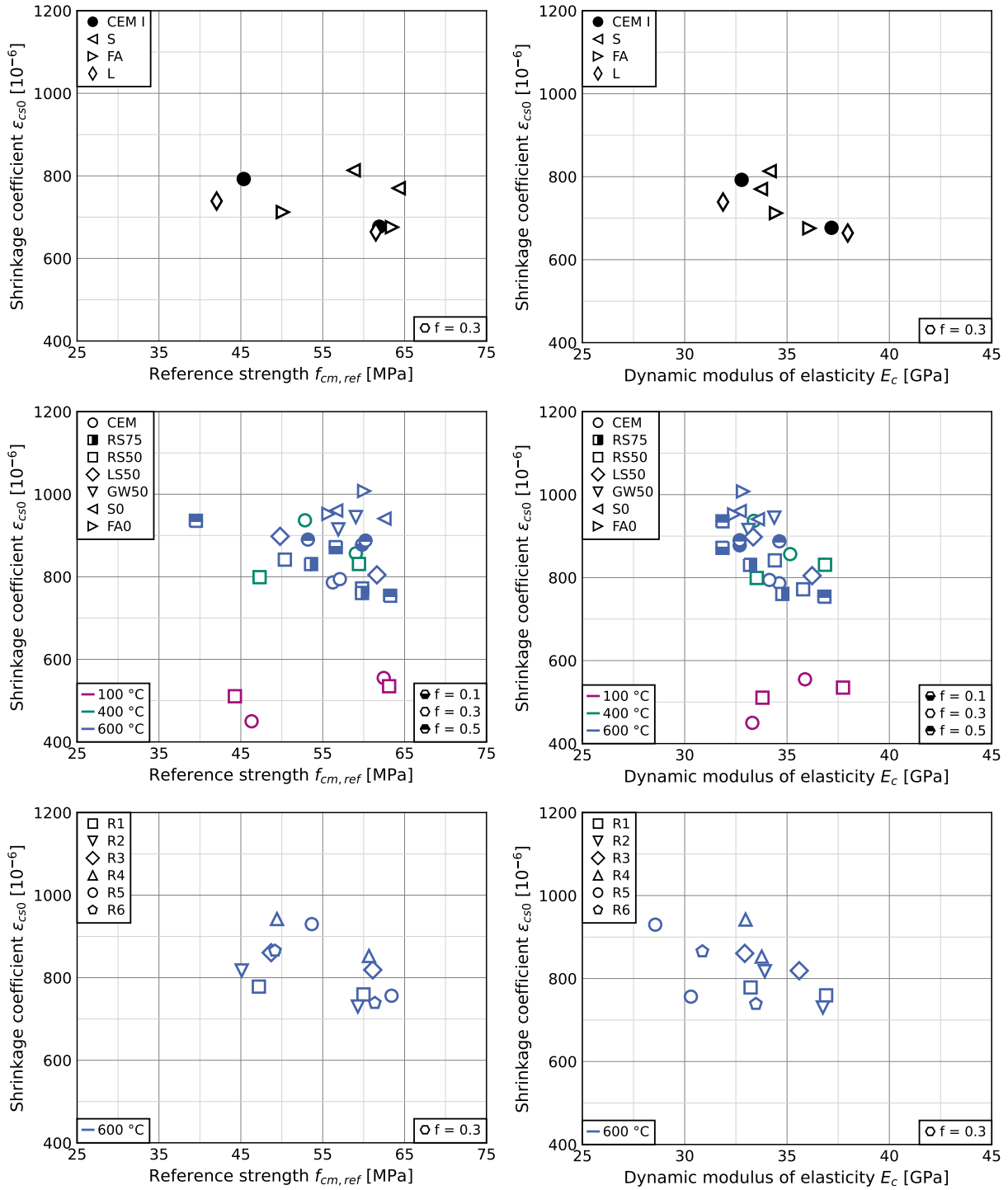


Abb. 2.45: Berechnete Endschwindmaße ϵ_{cds0} aller Betone aufgetragen über der Referenzdruckfestigkeit $f_{cm,ref}$ (links) und dem dynamischen E-Modul E_c (rechts)
 Oben: Referenzbetone
 Mitte: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
 Unten: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

2.3.4 Dauerhaftigkeitseigenschaften

2.3.4.1 Kapillare Wasseraufnahme

Für die Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme in Anlehnung an DIN EN 13057:2022-09 und DIN EN ISO 15148:2016-12 wurde für jede Betonmischung ein Zylinder (Durchmesser 100 mm, Höhe 300 mm) hergestellt und nach dem Ausschalen bei 20 °C unter Wasser gelagert. Während der Wasserlagerung wurde die zylindrische Probe in fünf Zylinderscheiben mit einer Höhe von 45 mm gesägt, wofür die Probe kurzzeitig aus der Wasserlagerung entnommen wurde. Ab dem Alter von 28 d wurden je Beton zwei Zylinderscheiben für die kapillare Wasseraufnahme bei 20 °C und 65 % r. F. gelagert. Es wurde beschlossen, in Anlehnung an DIN EN ISO 15148:2016-12 eine Prüfung der kapillaren Wasseraufnahme erst nach Erreichen der Massenkonzanz durchzuführen, wobei aus Erfahrungswerten bekannt war, dass die Probenkonditionierung vormals wassergelagerter Proben mehrere Monate in Anspruch nimmt. Daher wurden die Versuche zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme erst nach Beendigung sämtlicher anderer Versuche im Probenalter von 6 – 9 Monaten durchgeführt wurden.

Wenige Tage vor Versuchsbeginn wurden die Mantelflächen der Zylinderscheiben mit Epoxidharz ummantelt, um ein seitliches Austrocknen zu verhindern. Zu Versuchsbeginn wurden die Zylinderscheiben bei 20 °C und 65 % r. F. gewägt und auf Abstandshaltern in demineralisiertes Wasser gelegt, sodass ca. 5 mm der Probe eingetaucht war. Die Massenänderung wurde nach 0,2 h, 0,5 h, 1 h, 2 h, 4 h und 24 h bestimmt. Anhand der Wasseraufnahme in 24 h wurde der flächenbezogene Wasseraufnahmekoeffizient berechnet.

Abbildung 2.46 veranschaulicht die kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten der einzelnen Betone in Abhängigkeit ihrer Referenzdruckfestigkeit.

Die Referenzbetone weisen unabhängig von ihrer Betonzusatzstoffart einen näherungsweise linearen Zusammenhang zwischen ihren Wasseraufnahmekoeffizienten und der Referenzdruckfestigkeit auf. Lediglich die Wasseraufnahme von L-1 ist gegenüber den anderen Referenzbetonen deutlich erhöht.

Die Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsandern weisen im Vergleich mit den Referenzbetonen sehr ähnliche Wasseraufnahmekoeffizienten auf und zeigen ebenfalls einen linearen Zusammenhang, wobei bei niedrigen Referenzdruckfestigkeiten tendenziell erhöhte Wasseraufnahmekoeffizienten gemessen wurden, die jedoch den Extremwert der Serie L-1 nicht übersteigen.

2.3.4.2 Chloriddiffusion

Die Untersuchung der Chlorideindringung in Anlehnung an DIN EN 12390-11:2015-11 und DIN EN 12390-18:2021-09 fand an drei Zylinderscheiben statt, die analog zu den Probekörpern für die Prüfung der kapillare Wasseraufnahme hergestellt wurden. Ergänzend wurden die Proben nach dem Sägen oberflächlich abgetrocknet und die Mantelflächen und jeweils eine Stirnfläche mit Epoxidharz ummantelt, bevor die Proben in die Wasserlagerung zurückgegeben wurden. Auf eine Vakuumsättigung der Proben wurde aufgrund der Wasserlagerung verzichtet. Im Alter von 28 d wurden die Proben zunächst für 24 h in gesättigter $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung konditioniert, bevor sie für 35 d in der NaCl-Prüflösung (16,5 m%) gelagert wurden. Nach der Entnahme wurden die

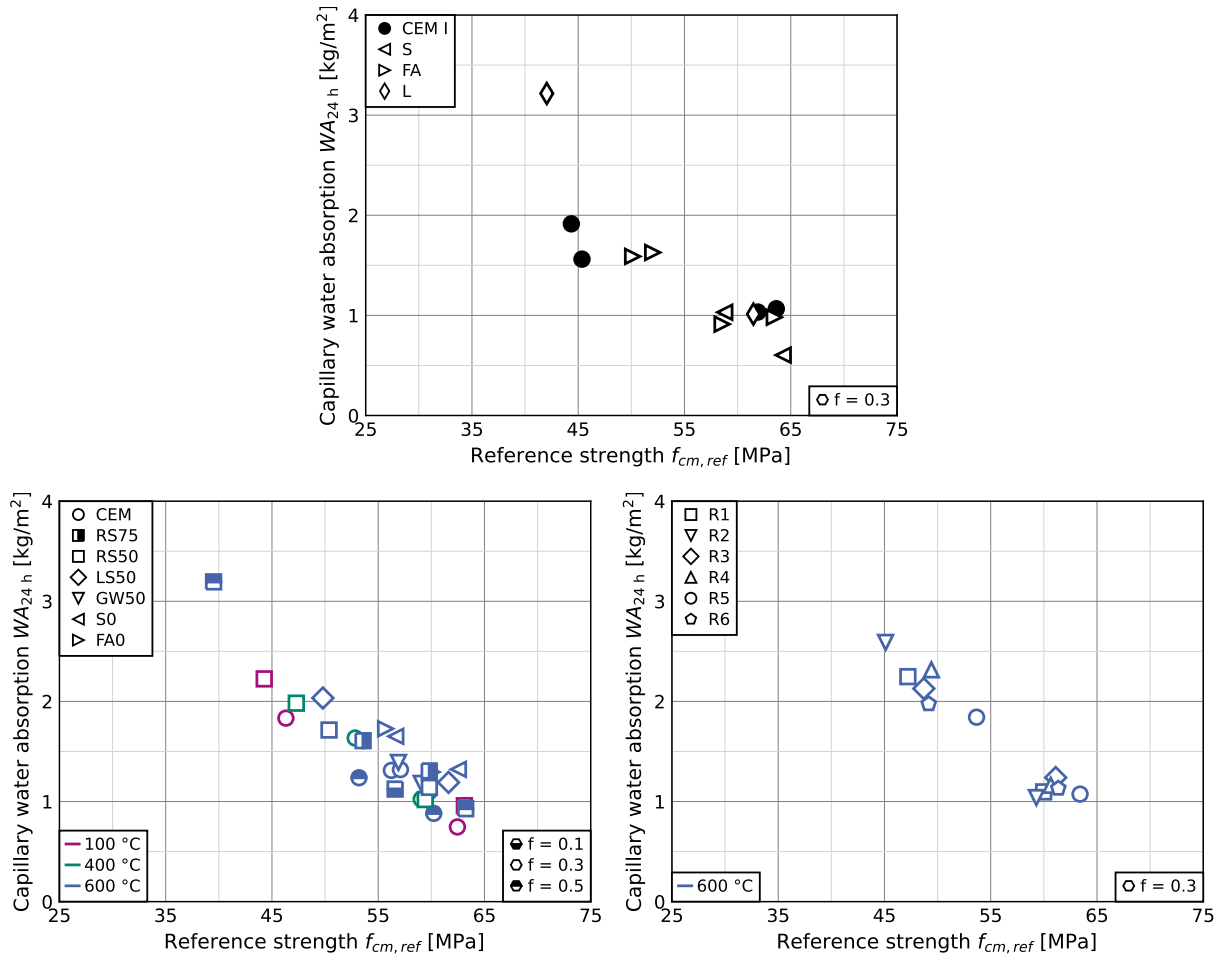


Abb. 2.46: Wasseraufnahmekoeffizienten in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone
 Oben: Referenzbetone
 Unten links: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
 Unten rechts: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

Proben radial gespalten und beide Prüfflächen mit Silbernitratlösung besprüht, um anhand des Farbumschlags eine repräsentative Chlorideindringtiefe d_c zu bestimmen. Auf eine ausführliche Bestimmung des Chloriddiffusionswiderstands durch eine tiefengestaffelte Bohrmehlentnahme musste aus Zeitgründen infolge des eng gestaffelten Versuchsprogramms verzichtet werden.

Abbildung 2.47 stellt die gemessenen Chlorideindringtiefen in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeit aller Betone dar.

In Abb. 2.47 wird zunächst anhand der Betone CEM I-1/3 bzw. -2/4 und FA I-1/3 bzw. -2/4 ersichtlich, dass die Wiederholungspräzision schlechter als bei den anderen untersuchten Betoneigenschaften ausfällt. Ursächlich könnten hier Materialstreuungen in den Ausgangsstoffen sein. Generell zeigen Betone mit FA und S unter Berücksichtigung der Festigkeit ähnliche Chlorideindringtiefen wie CEM I, während die Chlorideindringtiefe infolge der teilweisen Substitution durch L erhöht ist.

Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsanden zeigen insgesamt ähnliche Eindringtiefen wie Betone mit Kalksteinmehl. Modellstoffe und Realstoffe verhalten sich dabei sehr ähnlich. Die Betrachtung der Betone mit Modellstoffen zeigt eine Erhöhung der Eindringtiefe durch die Substitution mit den Modellstoffen LS50, GW50 und S0. Eine Erhöhung der

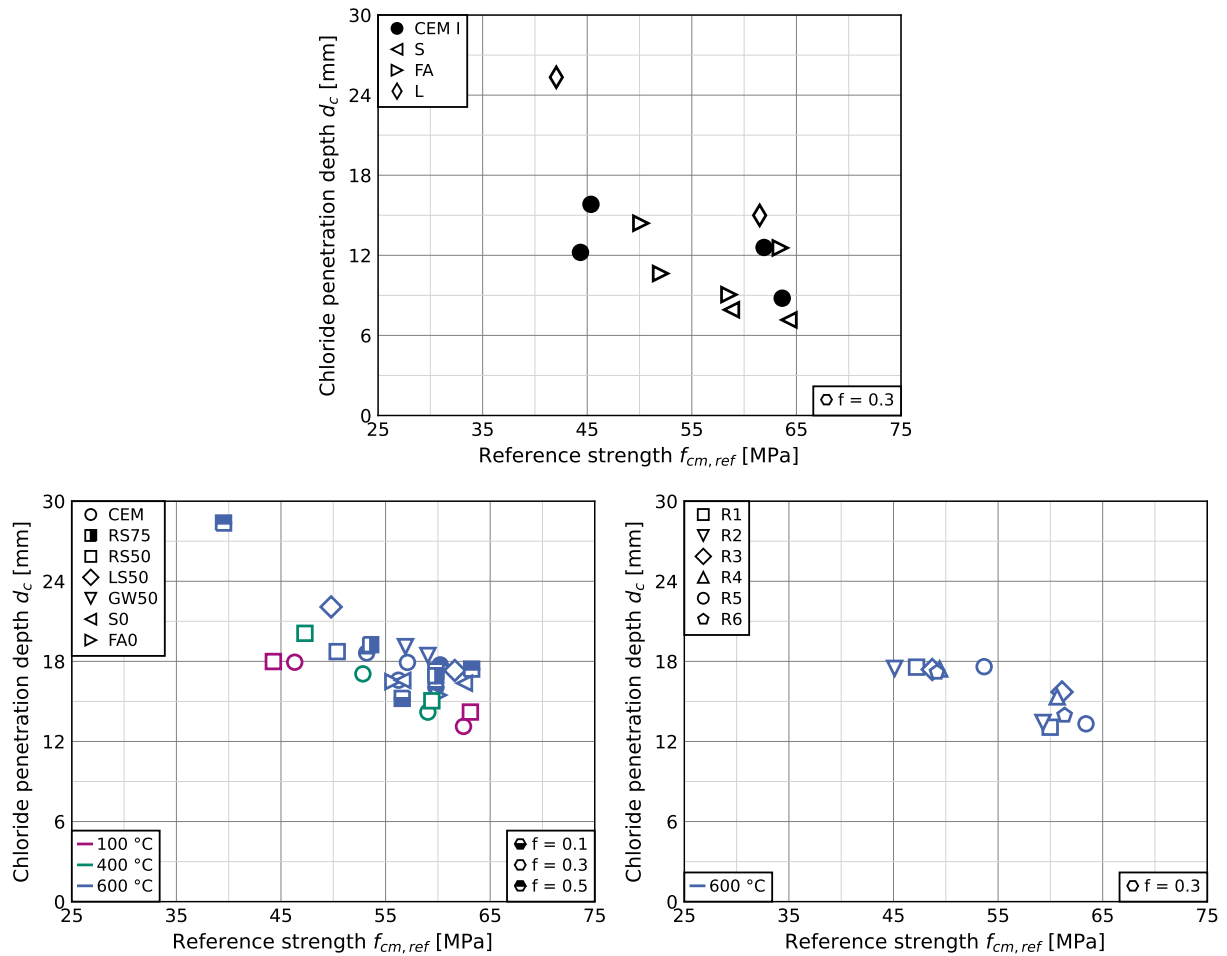


Abb. 2.47: Chlorideindringtiefe in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone

Oben: Referenzbetone

Unten links: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen

Unten rechts: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

Substitutionsrate wirkt sich ebenfalls erhöhend auf die Chlorideindringtiefe aus. Bei einer Aufbereitungstemperatur von 100 °C lassen sich geringfügig reduzierte Chlorideindringtiefen beobachten als bei 400 °C und 600 °C.

2.3.4.3 Carbonatisierung

Für die Bestimmung der Carbonatisierungsgeschwindigkeit nach DIN EN 12390-12:2020-04 wurden aus jedem Beton drei Prismen mit den Abmessungen $(40 \times 40 \times 160)$ mm³ hergestellt und nach dem Ausschalen bei 20 °C zunächst bis zum Alter von 28 d unter Wasser und anschließend für 14 d bei 65 % r. F. gelagert. Anschließend begann die CO₂-Beaufschlagung bei 20 °C, 57 % r. F. mit 3 v% CO₂. Nach einer Beaufschlagungsdauer von 7 d, 28 d und 70 d wurden jeweils eine Scheibe von den Prismen abgespalten und mit Phenolphthalein besprüht, um die Carbonatisierungsfront kenntlich zu machen und subsequent zu messen. Für die Berechnung der Carbonatisierungstiefen in jedem Prüfalter wurden abweichend von DIN EN 12390-12:2020-04 alle Einzelmesswerte verwendet. Aus dem Mittelwert von je drei Prüfkörpern je Messzeitpunkt wurde anschließend mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate die Carbonatisierungsgeschwindigkeit berechnet.

Abbildung 2.48 zeigt die gemessenen Carbonatisierungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Referenzdruckfestigkeit aller Betone.

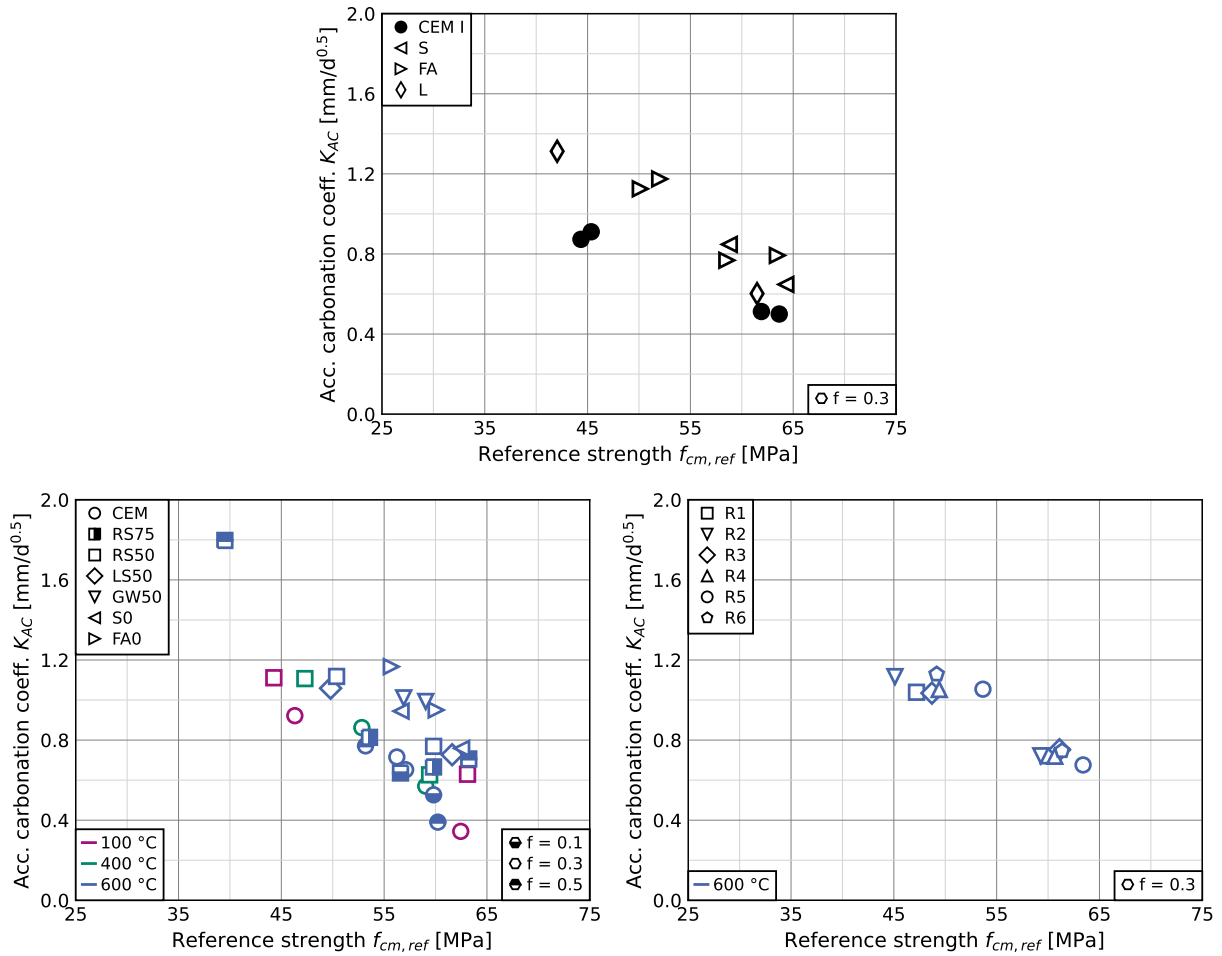


Abb. 2.48: Carbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der untersuchten Betone
 Oben: Referenzbetone
 Unten links: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
 Unten rechts: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

In Abb. 2.48 wird ersichtlich, dass sich die Substitution von CEM I durch Steinkohlenflugasche und Hüttensand und – in geringerem Maß – durch Kalksteinmehl erhöhend auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit auswirkt. Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsanden verhalten sich dabei ähnlich wie letzteres. Während sich die Betone mit aufbereiteten Realstoffe nur geringfügig voneinander unterscheiden, zeigt die Zusammensetzung der Modellstoffe einen Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit. Modellstoffe mit FA0, S0 und GW50 weisen erhöhte Carbonatisierungsgeschwindigkeiten auf, die jedoch im Bereich von Betonen mit primärer Steinkohlenflugasche bzw. Hüttensand liegen. Die Austauschrate und Aufbereitungstemperatur der Modellstoffe zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit.

2.3.4.4 Frost-Tau-Wechsel

Für die Untersuchung des Frost-Tau-Widerstands wurden je Beton zwei Würfel mit einer Kantenlänge von 100 mm hergestellt. Der Prüfumfang musste dabei aus Kapazitätsgründen stark eingeschränkt werden, sodass zusätzlich zu den Referenzbetonen mit CEM I und FA nur Betone mit Modellstoffen geprüft werden konnten. Zusätzlich beschränkten sich die Untersuchungen auf die Betone mit $\frac{w}{z_{eq}} = 0,5$ (Suffix „-2“).

Nach dem Ausschalen und einer anschließenden sechstägigen Wasserlagerung wurden die Würfel für weitere 22 d bei 20 °C und 65 % r. F. gelagert. Anschließend fand eine Befrostung gem. dem Würfelprüfverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 in demineralisiertem Wasser statt. Nach 7, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln (FTC) wurde die abgewitterte Masse durch Abbürsten der Würfel und Trocknung der Bruchstücke bestimmt. Bei ausgewählten Betonen konnte einer Verlängerung der Versuche auf 56 FTC realisiert werden. Für diese Serien zeigt Abb. 2.49 die Entwicklung der abgewitterten Massen mit zunehmender Anzahl der Frost-Tau-Wechsel.

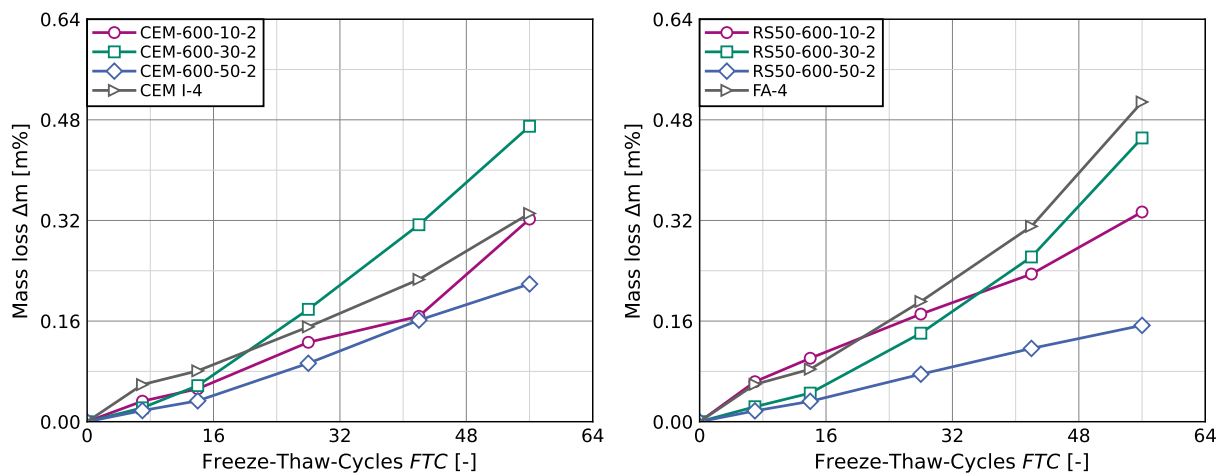


Abb. 2.49: Kumulativer Massenverlust ausgewählter Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel

Links: Basisbeton CEM I-4 und Betone, bei denen 10 m%, 30 m% und 55 m% des CEM I durch CEM-600 substituiert wurden

Rechts: Referenzbeton FA-4 und Betone, bei denen 10 m%, 30 m% und 55 m% des CEM I durch RS50-600 substituiert wurden

Dabei wird ersichtlich, dass die abgewitterten Massen für alle untersuchten Betone sehr gering sind. FA-4 weist nach 56 FTC die höchste Abwitterung ($\Delta m_{56 \text{ FTC}} = 0,51 \text{ m\%}$) auf. Bezogen auf die Prüffläche entspricht dies einer Abwitterung von $\Delta m_{A,56 \text{ FTC}} = 0,19 \text{ kg/m}^2$. Damit sind die Betone entsprechend ihrer Konzeption mit $\frac{w}{z_{eq}} = 0,5$ als frostsicher einzustufen. [4] definiert eine kritische Frostschädigung im Würfelverfahren bei einer kumulierten Abwitterung von 10 m% nach 100 FTC, wobei die Schädigung in der Regel einen linearen oder konkaven Verlauf zeigt. Eine derart lange Versuchsdauer war mit dem zeitlich eng gestaffelten Versuchsprogramm jedoch nicht vereinbar.

Die Substitution von CEM I durch thermisch-mechanisch aktivierte Modellstoffe wirkt sich nicht einheitlich auf den Frost-Tau-Widerstand aus. Eine Substitution von 10 m% zeigt nahezu keinen Effekt auf die Abwitterung nach 56 FTC, während eine Substitution von 30 m% des CEM I durch CEM-600 oder RS50-600 zu deutlich erhöhten Abwitterungen führt, die jedoch geringer

als die der Referenzserie FA-4 sind. Die Frostversuche an CEM-600 und RS50-600 konnten bis zu einer Dauer von 77 FTC verlängert werden. Hier zeigten sich maximale Massenverluste von 0,73 m% für CEM-600 und 0,76 m% für RS50-600. Eine CEM I-Substitution durch 50 m% brachte in beiden betrachteten Fällen eine Reduktion der abgewitterten Massen mit sich. Die Zusammensetzung des Modellstoffs zeigt hier nur eine untergeordnete Bedeutung.

Für die übrigen Modellstoffe und zwei Realstoffe wurden die Versuche nach 28 FTC beendet. Da alle untersuchten Betone mit $\frac{w}{z_{eq}} = 0,5$ hergestellt wurden und daher sehr ähnliche Referenzdruckfestigkeiten aufweisen, wurden in Abb. 2.50 die Abwitterungsmassen nach 28 FTC über der jeweiligen kapillaren Wasseraufnahme der einzelnen Betone aufgetragen.

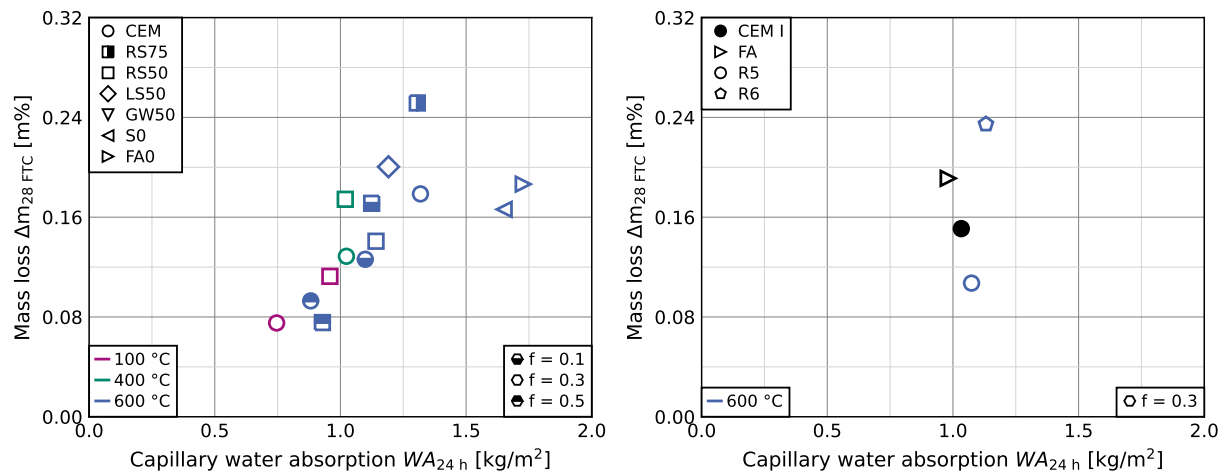


Abb. 2.50: Kumulativer Massenverlust unterschiedlicher Betone nach 28 Frost-Tau-Wechseln
Links: Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Modellstoffen
Rechts: Referenzbetone und Betone mit thermisch-mechanisch aktivierten Realstoffen

Generell zeigt sich, dass höhere Wasseraufnahmekoeffizienten höhere Abwitterungsmassen nach sich ziehen, ausgenommen für Betone mit FA0-600 und S0-600. Die niedrigsten Abwitterungsmassen zeigen die Serien mit CEM-100 und RS50-100 bei einer CEM I-Substitution von 30 m% sowie CEM-600 und RS50-600 bei einer CEM I-Substitution von 10 m% und 50 m%. Die Abwitterung von Betonen 30 m% thermisch aufbereiteten Modellstoffen ähneln denen des Referenzbetons FA-4. Gleiches gilt für Betone mit aufbereiteten Realstoffen, wobei hier nur zwei Serien geprüft werden konnten.

2.3.5 Umweltverträglichkeit

Für die Untersuchung der Umweltverträglichkeit wurden Elutionsversuche nach DIN 19528:2023-07 (Perkolation mit einem Wasser/Feststoffverhältnis $W/F = 2$) durchgeführt. Die untersuchten Stoffe beschränkten sich auf die sechs unterschiedlichen Realstoffe, die entsprechend ihrer Ausgangskörnung vor („-100 °C“) und nach („-600 °C“) der thermischen Aufbereitung untersucht wurden. Zusätzlich wurden Prismen nach der Festigkeitsprüfung (siehe Abschnitt 2.3.2) getrocknet und in einem Backenbrecher auf ein Größtkorn von 4 mm zerkleinert („-concrete“). Dabei wurden die Betone mit konstantem $\frac{w}{b} = 0,5$ und damit gleichen Bindemittelmassen verwendet. Die Ergebnisse sind in Tab. B.25, Tab. B.26 und Tab. B.27 enthalten. Zusätzliche Ergebnisse der chemischen Zusammensetzungen enthalten Tab. B.7, Tab. B.8 und Tab. B.9.

Ergänzend wurden XRF-EDX-Messungen durchgeführt, um den Feststoffgehalt unterschiedlicher Schwermetalle an den Ausgangsstoffen zu bestimmen, und der organische Kohlenstoffgehalt (TOC) vor und nach der thermischen Behandlung gemessen.

Ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abb. 2.51 dargestellt. Neben den Messergebnissen sind hier die Grenzwerte an die Eluatfraktionen und Feststoffwerte nach ErsatzbaustoffV für Flugasche, RC-Baustoffe und Bodenmaterial (BM-0*) dargestellt.

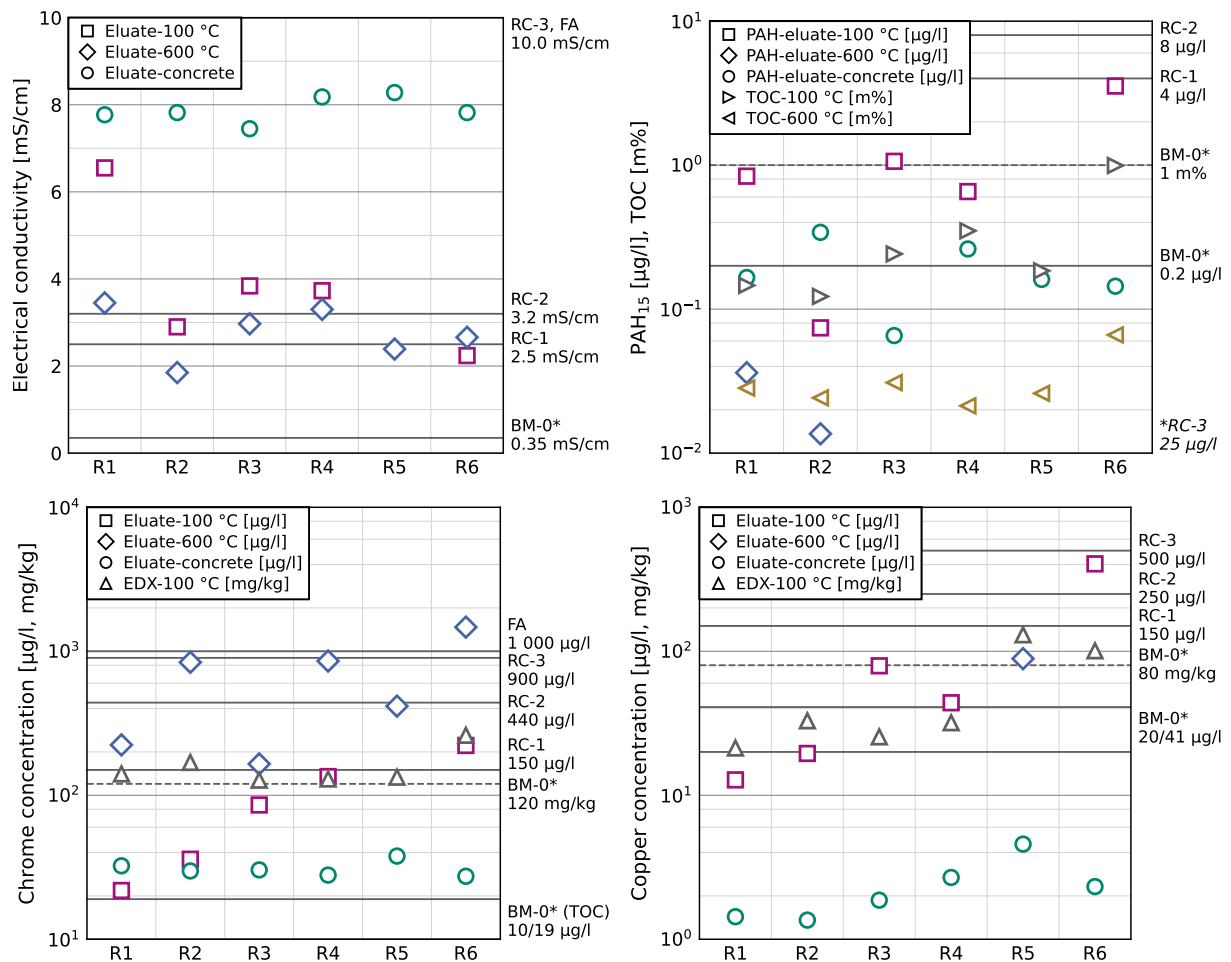


Abb. 2.51: Eluatfraktionen und Feststoffgehalte von aufbereiteten Realstoffen und damit hergestellten Betonen

Oben links: Elektrische Leitfähigkeit

Oben rechts: PAK- und TOC-Gehalt

Unten links: Chromgehalt

Unten rechts: Kupfergehalt

Die elektrische Leitfähigkeit der Eluate unterscheidet sich zwischen den sechs untersuchten Realstoffen, wobei durch die thermische Aufbereitung überwiegend eine teils deutliche Reduktion beobachtet werden kann. Auf die elektrische Leitfähigkeit der untersuchten Betonproben ist jedoch kein direkter Einfluss erkennbar. Betone weisen hier durchweg höhere Werte auf als die untersuchten Realstoffe.

Die thermische Aufbereitung bei 600 °C führt zu einer signifikanten Reduktion des Gehalts an organischem Kohlenstoff, der sich analog in einer Reduktion des PAK-Gehalts niederschlägt. Teilweise war an den aufbereiteten Realstoffen kein PAK-Gehalt messbar.

Die Untersuchung von Schwermetallen liefert unterschiedliche Ergebnisse. Im Fall von Chrom lässt sich beobachten, dass die Elution nach der thermischen Behandlung im Vergleich zu den jeweiligen unbehandelten Ausgangsstoffen deutlich erhöht ist. Bei Kupfer zeigt sich das gegen-
teilige Verhalten – teilweise ließ sich in den Eluatn kein Kupfer feststellen. In beiden Fällen lässt sich jedoch erkennen, dass der Schwermetallgehalt im Eluat der (aufbereiteten) Realstoffe keine unmittelbare Auswirkungen auf den entsprechenden Schwermetallgehalt im Beton hat.

2.4 Entwicklung Anwendungsempfehlung

Die in den vorangegangenen Abschnitten dargestellten Versuchsergebnisse erlauben eine breite Reihe von Anwendungsmöglichkeiten thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande als Betonzusatzstoff.

Hierfür wurde ein Modell entwickelt, das aufbauend auf einem bestehenden, normativ geregelten Ansatz, dem sog. Anrechenbarkeitsfaktor k in Verbindung mit dem äquivalenten Wasser-Zementwert $\frac{w}{z_{eq}}$, anhand weniger Informationen über den zu verwendenden Betonbrechsand die Betondruckfestigkeit im Alter von 28 d zuverlässig vorhersagen kann. Dementsprechend lassen sich Betone nach DIN EN 206 bzw. DIN 1045-2 herstellen, wobei zusätzliche Besonderheiten im Vergleich mit Portlandzementen oder etablierten Betonzusatzstoffen beachtet werden sollten.

Das entwickelte Modell wurde zunächst mit einer Bandbreite von im Labor hergestellten Modellstoffen, deren Zusammensetzung bekannt war, kalibriert und verwendet als Eingangsgrößen die Art der in den Betonbrechsanden enthaltenen Gesteinskörnungen (Kalksteinsand, LS, Rheinsand, RS, und Grauwacke, GW), die Art des Bindemittels (Portlandzement, CEM I, sowie Mischungen mit Hüttensand, S, oder Steinkohlenflugasche, FA) und als zentrale Eingangsgröße den Massenverlust Δm infolge der thermischen Aufbereitung. Das Modell wurde zudem für einen Anteil von $f_{ref} = 0,3$ am Gesamtbindemittelgehalt kalibriert und muss für abweichende Substitutionsraten f angepasst werden.

$$k = (k_{h0} \cdot m_{pdh} + k_{a0} + k_{b0}) \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^{-k_f} \quad (2.24)$$

$$k_{h0} = 1,10$$

$$m_{pdh} = \Delta m \cdot \left(1 + \frac{1}{m_{h0}} \right) \text{ mit } m_{h0} = 0,23$$

$$k_{a0} = \begin{cases} 0,00 & \text{für LS} \\ 0,10 & \text{für RS} \\ 0,30 & \text{für GW} \end{cases}$$

$$k_{b0} = \begin{cases} 0,15 & \text{für CEM I} \\ 0,25 & \text{für CEM I + S} \\ 0,45 & \text{für CEM I + FA} \end{cases}$$

$$k_f = 0,5$$

Die Validierung des Modells ergab, dass reale Betonbrechsande eine deutlich höhere Streuung der k -Werte hervorrufen, wobei die Zusammensetzungen dieser Realstoffe nicht ausführlich

untersucht wurden. Gleichwohl bietet das entwickelte Modell eine gute Abbildung der Versuchsergebnisse.

Die Versuchsergebnisse und das Modell zeigen, dass bei einer thermischen Aufbereitung bei 600 °C reiner Zementstein so dehydratiert wird, dass er als Betonzusatzstoff mit $k = 1,0$ den gleichen Festigkeitsbeitrag aufweist wie CEM I. Besteht die Zementsteinmatrix aus Hydratationsprodukten von Hüttensand oder Steinkohlenflugasche, sind sogar höhere Anrechenbarkeitsfaktoren möglich. Die in den Betonbrechsanden enthaltene primäre Gesteinskörnung wirkt jedoch inert und reduziert daher die Anrechenbarkeitsfaktoren, was anhand des Massenverlusts bei der thermischen Behandlung abgebildet wird. Lediglich Gesteinskörnungen, die wie Grauwacke amorphes SiO_2 beinhalten, können in nennenswertem Umfang zur Festigkeitsbildung beitragen.

Daher wird empfohlen, zukünftig die Aufbereitung von Beton hinzu rezyklierten Gesteinskörnungen anzupassen. Bislang sind Aufbereitungsunternehmen versucht, möglichst saubere grobe Gesteinskörnungen herzustellen, die wenig Zementstein enthalten. Der Zementsteinanteil in den Betonbrechsanden – indirekt ablesbar am Massenverlust während der thermischen Aufbereitung – kann dadurch jedoch in einer großen Bandbreite streuen. Durch eine Optimierung der Aufbereitungsverfahren lassen sich jedoch mit gesteigertem Aufwand Betonbrechsande weiter in sandige Anteile mit geringem Zementsteingehalt und in schluffige Anteile, wo sich der Zementstein im Mehlkorn anreichert, unterteilen. Für letztere wurde im vorliegenden Projekt eine zielführende Verwertungsmöglichkeit als Bindemittel im Beton entwickelt. Die aufbereiteten Sande lassen sich ebenfalls in der Betonherstellung als rezyklierte feine Gesteinskörnungen nutzen, wobei sich die Reduktion des Zementsteingehalts positiv auf die resultierenden Betoneigenschaften auswirken sollte. Dieses Vorgehen würde es – sofern es umgesetzt wird – erlauben, durch das Betonbrechsandrecycling nicht nur natürliche Ressourcen einzusparen, sondern gleichzeitig durch die Substitution von CEM I CO_2 -Emissionen zu reduzieren.

Die Druckfestigkeit im Alter von 28 d ist die zentrale Betoneigenschaft, die schon in einem frühen Planungsstadium bekannt ist und aus der daher weitere bemessungsrelevante Betoneigenschaften abgeleitet werden. Im Gegensatz zu etablierten reaktiven Betonzusatzstoffen, die puzzolanisch oder latent-hydraulisch reagieren und damit erst als Folge der hydraulischen Reaktion des CEM I festigkeitsbildend wirken, wurde im vorliegenden Projekt gezeigt, dass thermisch-mechanisch aktivierte Betonbrechsande hinsichtlich ihrer zeitlichen Festigkeitsbildung mit CEM I vergleichbar sind. Das macht sie insbesondere interessant für die Betonfertigteillin-dustrie, für die hohe Anfangs- und Frühfestigkeiten aufgrund reduzierter Ausschulfristen ein wirtschaftlicher Vorteil sein können. Gleichzeitig bietet sich der Einsatz in Betonfertigteilen an, da sich hier im Vergleich zu Transportbetonen in der Erprobung neuartiger Produkte Einsatz-pfade und -probleme leichter identifizieren lassen.

Mit der hohen Frühfestigkeit von Betonen mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsanden als Betonzusatzstoff einher geht eine reduzierte Nacherhärtung ab einem Betonalter von 28 d. Dies ist jedoch kein Nachteil dieser Betone, da dieser Festigkeitszuwachs in der Regel nicht in der Bauteilbemessung nutzbar ist, sondern gegenteilig z. B. durch die Erfordernis höherer Mindestbewehrungsmengen nachteilig wirken kann.

Am Beispiel ausgewählter Betone konnte im vorliegenden Projekt gezeigt werden, dass die etablierten Bemessungsgleichungen für das mechanische Verhalten gültig bleiben. Die Dauerhaftigkeit von Betonen mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsanden ähnelte der von Betonen mit Steinkohlenflugasche oder Hüttensand als Betonzusatzstoff. Der Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden war jedoch geringfügig reduziert. Anhand der Modellstoffe wurde deutlich, dass insbesondere jene mit hohen Werten für k_{a0} und k_{b0} bei gleicher Festigkeit ein verschlechtertes Langzeitverhalten aufweisen. Daher wird nahegelegt, bei der Anwendung des deskriptiven Bemessungskonzepts nach DIN 1045-2:2023-08 bei der Einhaltung der höchstzulässigen $\frac{w}{z}$ -Werte $k_{a0} = k_{b0} = 0$ anzuwenden. Alternativ wird die Verwendung eines probabilistischen Bemessungskonzepts für die Dauerhaftigkeit empfohlen.

3 Ausblick und Anschlussmöglichkeiten

Die in den vorangegangenen Abschnitten ausführlich beschriebenen im Forschungsprojekt *THEMA Betonbrechsand* erzielten Versuchsergebnisse zeigen, dass thermisch-mechanisch aktivierte Betonbrechsande ein hohes Potential haben, Portlandzement anteilig als reaktiver Betonzusatzstoff zu ersetzen. Damit können sie ähnlich wie Steinkohlenflugasche oder Hütten-sand verwendet werden und sowohl zur Reduktion des Primärressourcenverbrauchs als auch zur Minderung der mit der Portlandzementklinkerherstellung verbundenen CO₂-Emissionen beitragen.

Im vorliegenden Projekt wurde die Möglichkeit des Einsatzes von Betonbrechsanden nach einer thermisch-mechanischen Aktivierung als Betonzusatzstoff untersucht und für diesen Einsatzzweck ein Modell entwickelt und validiert. Eine ähnliche Verwertungsmöglichkeit besteht in der Verwendung als Hauptbestandteil in Kompositzementen. Der zentrale Unterschied ist hier, dass bei der Verwendung als Betonzusatzstoff die geringere Reaktivität des Betonbrechsands in den $\frac{w}{z}$ -Wert einfließt, um einen Beton gleicher Eigenschaften herzustellen, während bei der Verwendung von Kompositzementen ein hochfester Portlandzement(klinker), z. B. der Festigkeitsklasse 52,5, mit einem weniger reaktiven Material gemischt wird, sodass der entstehende Kompositzement die Anforderungen einer niedrigeren Festigkeitsklasse, z. B. 42,5, erfüllt.

Das im Rahmen des Projekts entwickelte Modell zur Vorhersage des Beitrags thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande zur Betondruckfestigkeit (und damit indirekt wie gezeigt zu weiteren bemessungsrelevanten Betoneigenschaften) verwendet den Massenverlust bei der thermischen Aufbereitung als zentralen Eingangsparameter. Es konnte gezeigt werden, dass die Aufbereitungstemperatur nur einen indirekten Einfluss besitzt. Daher fand im Rahmen des abgeschlossenen Projekts auch keine Optimierung der Aufbereitungstemperatur ab, zumal diese von unterschiedlichen Faktoren einschließlich der Wirtschaftlichkeit abhängt.

Aufbauend auf den Projektergebnissen wurde daher ein BMWK-gefördertes Verbundforschungsprojekt *InnoBeton* bewilligt, im Rahmen dessen das KIT-<sup>IMB
MPA
CNM</sup> zusammen mit Industriepartnern die wirtschaftliche Umsetzung thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande als Zementhauptbestandteil und Betonzusatzstoff untersucht.

Während im Projekt *THEMA Betonbrechsand* die generelle Machbarkeit der Betonbrechsandverwertung als reaktives Bindemittel im Vordergrund stand, wurde im Rahmen des

Versuchsprogramms festgestellt, dass sich das Hydratationsverhalten thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande von primärem Zement unterscheidet. Diese Erkenntnisse lieferten die Grundlage für die erfolgreich beantragte Förderung der weiteren Untersuchung des Hydratationsverhaltens und der Festigkeitsbildung aktivierten Zementsteins im Rahmen des DFG-SPP 2436 „Net-Zero Concrete“.

Im Rahmen des Versuchsprogramms konnte gezeigt werden, dass sich der Festigkeitsbeitrag (thermisch) aktivierter Betonbrechsande signifikant erhöht, wenn eine verbesserte Aufbereitung erfolgt, die auch im Feinkornbereich eine Trennung von primärer Gesteinskörnung und hydratisiertem Zement ermöglicht. Dies zieht zwei mögliche Anknüpfungspunkte nach sich: Erstens ermöglicht die in Abschnitt 2.4 angesprochene Fokussierung auf eine optimierte Sandfraktion parallel eine erleichterte Verwertung als feine Gesteinskörnung. Dies wird jedoch bislang normativ eingeschränkt. In einem durch die DBU geförderten Verbundforschungsprojekt untersucht das KIT-^{IMB}_{MPA}_{CMM} daher, welche Eigenschaften aufbereitete Betonbrechsande mit sich bringen müssen, um uneingeschränkt als rezyklierte feine Gesteinskörnungen eingesetzt werden zu können. Zweitens sollen perspektivisch in einem anschließenden zu beantragenden Projekt praxistaugliche Trennverfahren untersucht werden.

Die Projektergebnisse zeigen, dass mit thermisch-mechanisch aktivierten Betonbrechsand als Betonzusatzstoff leistungsfähige und dauerhafte Betone hergestellt werden können. Der Einfluss der Betonbrechsande auf die Mechanismen, die der Dauerhaftigkeit von Beton zugrunde liegen, konnte jedoch im Rahmen des vorliegenden Projekts nicht umgesetzt werden. Allerdings wurden sämtliche verwendeten Modellstoffe in einem großen Umfang hergestellt, sodass mit Abschluss von *THEMA Betonbrechsand* erhebliche Mengen an Reserveproben vorhanden sind, die verwendet werden können, um in einem darauf aufbauenden Forschungsprojekt ein probabilistisches, performancebasiertes Dauerhaftigkeitsmodell zu entwickeln.

Mit Abschluss des Projekts wird die Veröffentlichung der zentralen Projektergebnisse in mehreren einschlägigen Fachpublikationen vorbereitet. Ein Teil der Versuchsergebnisse, die im Zusammenhang mit dem vorliegenden Projekt stehen, wurden bereits publiziert [2]. Zudem wurden mehrere Ergebnisse im Rahmen der 68. BetonTage in Ulm dem Fachpublikum im Rahmen eines Vortrags vorgestellt.

Literaturverzeichnis

- [1] BOGAS, J. A. ; CARRIÇO, A. ; TENZA-ABRIL, A. J.: Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes. In: *Cement and Concrete Research* 138 (2020), S. 106226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>. – DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106226. – ISSN 00088846
- [2] HÖFFGEN, J. P. ; VOGEL, M. ; BLASK, O. ; DEHN, F. : Entwicklung thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande als Betonzusatzstoff – Projektvorstellung und erste Ergebnisse. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2023). <http://dx.doi.org/10.1002/best.202200127>. – DOI 10.1002/best.202200127. – ISSN 00059900
- [3] INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE (Hrsg.): *fib model code for concrete structures (2020)*. Version 1. Lausanne : International Federation for Structural Concrete (fib), 2023. – ISBN 978-2-88394-175-5
- [4] SIEBEL, E. : Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Beurteilung mittels Würfelverfahren. In: *beton* 9 (1992), S. 496–501
- [5] WIEDMANN, A. : *Schadensrisiko und Schadensentwicklung in Betonfahrbahndecken als Folge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion*. Karlsruhe : KIT-Bibliothek, 2020. <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000125632>. <http://dx.doi.org/10.5445/IR/1000125632>

A Abbildungen

Korngrößenverteilungen

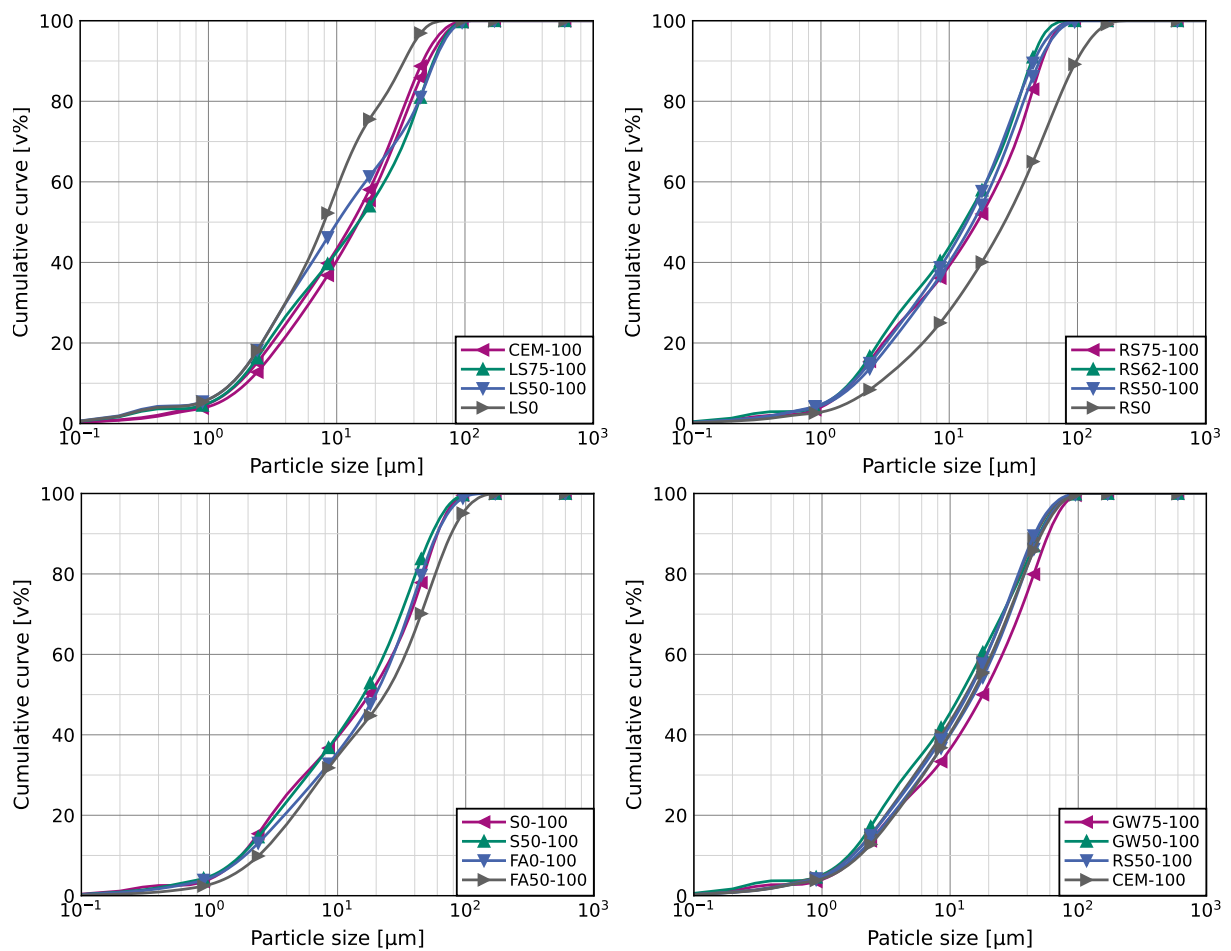


Abb. A.1: Kumulative Partikelgrößenverteilung der Modellstoffe nach der Mahlung

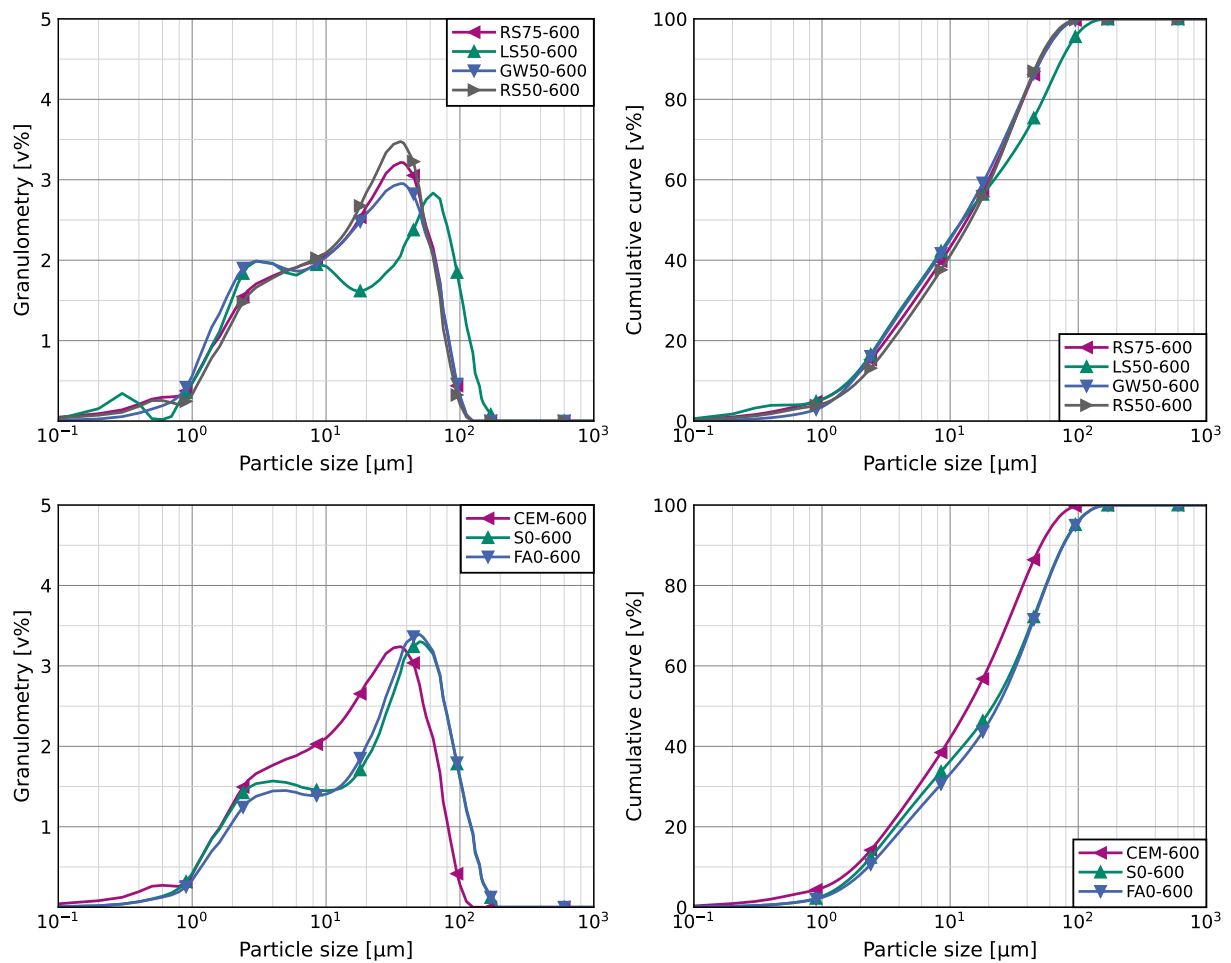


Abb. A.2: Partikelgrößenverteilung ausgewählter Modellstoffe nach der thermischen Aufbereitung bei 600 °C

B Tabellen

Charakterisierung der Ausgangsbindemittel

Tab. B.1: Scheinbare Rohdichte (ρ_a), Rohdichte auf ofentrockener Basis (ρ_{rd}), Rohdichte auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis (ρ_{ssd}) und Wasseraufnahme nach dem Eintauchen für 24 h (WA_{24}) der für die Herstellung der Modellstoffe verwendeten Gesteinskörnungen Rheinsand (RS) Kalksteinsand (LS) und Grauwacke (GW) nach DIN EN 1097-7:2008-06

		RS	LS	GW
ρ_a	g/cm ³	2,66	2,73	2,75
ρ_{rd}	g/cm ³	2,63	2,68	2,71
ρ_{ssd}	g/cm ³	2,64	2,69	2,72
WA_{24}	m%	0,38	0,67	0,48

Tab. B.2: Rohdichten (ρ_f) nach DIN EN 1097-7:2008-06 und spezifische Oberflächen (S_{BET} und S_{Blaine}) nach BET bzw. Blaine der verwendeten Bindemittel CEM I 42,5 R (CEM I), Hüttensand (S), Steinkohlenflugasche (FA) und Kalksteinmehl (L)

		CEM I	S	FA	L
ρ_f	g/cm ³	3,13	2,92	2,24	2,70
S_{BET}	m ² /g	1,282	0,926	7,683	5,998
S_{Blaine}	cm ² /g	4336	3406	4664	4276

Tab. B.3: Hydratationswärmeentwicklung ($Q_{h,7d}$), Wasseranspruch (w_n), Erstarrungsbeginn (t_{si}) und Erstarrungsende (t_{se}) von Leimmischungen aus CEM I 42,5 R sowie Leimmischungen, bei denen 30 m% des CEM I durch Hüttensand (CEM I-S) bzw. Steinkohlenflugasche (CEM I-FA) ausgetauscht wurde, nach nach DIN EN 196-11:2019-03 bzw. DIN EN 196-6:2019-03

		CEM I	CEM I-S	CEM I-FA
$Q_{h,7d}$	J/g	312,8	269,3	241,7
w_n	m%	29,2	29,5	30,0
t_{si}	min	240	235	265
t_{se}	min	320	295	320

Chemische Zusammensetzung

Tab. B.4: Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) in m% nach DIN EN 196-2:2013-10

	Na ₂ O m%	MgO m%	Al ₂ O ₃ m%	SiO ₂ m%	P ₂ O ₅ m%	K ₂ O m%	CaO m%	TiO ₂ m%	MnO m%	Fe ₂ O ₃ m%	LOI m%	Sonst. m%
CEM I	0,06	1,85	4,65	19,82	0,22	0,79	60,67	0,21	0,22	3,22	2,4	5,9
S	0,20	5,54	10,97	35,50	0,05	0,68	41,36	0,98	0,60	1,34	-0,3	3,1
FA	0,43	1,27	29,66	48,09	0,31	1,27	3,14	3,40	0,07	9,16	1,8	1,4
L	0,01	1,07	2,45	6,20	0,05	0,60	47,11	0,11	0,02	0,99	39,0	2,4
GW	0,78	1,89	13,29	68,77	0,12	3,15	1,11	0,89	0,07	5,36	3,8	0,7
LS	0,02	2,99	2,33	7,65	0,10	0,79	44,26	0,09	0,02	0,94	38,5	2,3
RS	1,16	0,58	5,84	80,61	0,06	1,96	4,12	0,15	0,02	1,15	3,8	0,6

Tab. B.5: Chemische Zusammensetzung der Modellstoffe vor der Mahlung („-R“) und ausgewählter Modellstoffe nach der Mahlung („-100“) mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) in m% nach DIN EN 196-2:2013-10

Variante	Na ₂ O m%	MgO m%	Al ₂ O ₃ m%	SiO ₂ m%	P ₂ O ₅ m%	K ₂ O m%	CaO m%	TiO ₂ m%	MnO m%	Fe ₂ O ₃ m%	LOI m%	Sonst. m%
CEM-R	<NWG	1,52	3,84	16,8	0,18	0,62	50,7	0,19	0,19	2,76	18,2	5,1
FA0-R	0,12	1,46	10,64	25,0	0,21	0,80	38,2	1,01	0,16	4,39	14,5	3,5
FA50-R	0,75	0,82	7,14	61,7	0,10	1,56	14,7	0,42	0,07	2,19	7,6	3,0
GW50-R	0,49	1,73	9,91	51,3	0,13	2,24	17,2	0,66	0,11	4,47	9,2	2,5
GW75-R	0,26	1,65	7,13	35,7	0,15	1,46	32,4	0,45	0,14	3,64	14,3	2,7
LS50-R	<NWG	2,39	2,91	11,1	0,13	0,77	46,9	0,14	0,09	1,62	31,2	2,8
LS75-R	<NWG	2,03	3,16	13,6	0,15	0,68	47,7	0,15	0,12	1,95	26,6	3,8
RS50-R	0,74	0,93	5,21	58,0	0,10	1,53	20,7	0,17	0,08	1,77	9,0	1,8
RS62-R	0,61	1,07	4,94	50,0	0,11	1,36	26,5	0,17	0,10	1,95	10,8	2,4
RS75-R	0,41	1,17	4,55	41,1	0,13	1,14	33,3	0,18	0,13	2,12	12,8	3,1
S0-R	0,03	2,43	5,38	20,5	0,14	0,61	45,2	0,38	0,27	2,20	18,8	4,1
S50-R	0,74	1,21	5,60	58,6	0,08	1,51	18,5	0,24	0,11	1,56	9,7	2,1
LS50-100	<NWG	2,42	2,82	11,3	0,12	0,72	46,8	0,13	0,08	1,54	31,0	3,0
RS50-100	0,71	0,92	5,06	57,7	0,09	1,51	20,8	0,17	0,08	1,80	8,8	2,4

Tab. B.6: Chemische Zusammensetzung ausgewählter Realstoffe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) in m% nach DIN EN 196-2:2013-10

Variante	Na ₂ O m%	MgO m%	Al ₂ O ₃ m%	SiO ₂ m%	P ₂ O ₅ m%	K ₂ O m%	CaO m%	TiO ₂ m%	MnO m%	Fe ₂ O ₃ m%	LOI m%	Sonst. m%
A1-0/2	0,45	1,48	5,02	47,1	0,11	1,31	22,9	0,22	0,04	2,00	16,9	2,4
A1-0/0,25	0,48	1,64	5,48	45,2	0,12	1,33	23,1	0,25	0,04	2,22	17,4	2,7
A2-0/2	0,42	1,36	4,41	51,27	0,08	1,18	21,54	0,17	0,04	1,72	15,3	2,6
A2-0/0,25	0,41	1,72	5,10	43,10	0,10	1,19	23,36	0,22	0,05	2,10	21,2	1,4
B1-0/2	0,52	1,28	5,15	56,5	0,08	1,48	17,3	0,19	0,05	2,07	13,1	2,3
B1-0/0,25	0,51	1,49	5,48	49,0	0,10	1,44	20,4	0,22	0,05	2,19	16,2	2,9
B2-0/2	0,50	1,38	5,22	56,8	0,09	1,60	16,2	0,19	0,04	2,11	14,0	1,8
B2-0/0,25	0,52	1,86	5,99	47,7	0,10	1,63	19,7	0,25	0,05	2,37	17,3	2,5
C-0/2	0,50	1,73	5,34	56,8	0,09	1,44	15,1	0,19	0,07	1,80	14,3	2,6
C-0/0,25	0,51	2,51	6,23	45,5	0,11	1,45	19,2	0,25	0,10	2,10	19,1	3,0
D-0/2	0,61	0,76	4,36	71,7	0,05	1,11	10,5	0,18	0,03	1,08	7,3	2,3
D-0/0,25	0,73	1,41	6,04	54,1	0,09	1,22	18,9	0,34	0,05	1,79	13,2	2,2
D-F	0,43	1,86	5,84	42,7	0,09	0,76	25,1	0,27	0,06	1,60	17,6	3,7
E-0/2	0,51	1,22	5,21	51,5	0,10	1,44	19,7	0,20	0,04	1,82	15,4	2,9
E-0/0,25	0,50	1,63	6,37	42,9	0,14	1,40	23,3	0,28	0,05	2,33	18,4	2,8
F-0/2	0,63	0,94	5,27	56,3	0,10	1,61	17,4	0,21	0,04	1,75	13,7	2,2
F-0/0,25	0,70	0,91	5,23	56,7	0,10	1,58	16,7	0,22	0,05	1,78	13,9	2,1
G-F	0,70	2,02	7,23	41,1	0,15	1,46	21,9	0,31	0,10	3,31	19,8	2,0
H-F	0,34	1,65	6,00	32,7	0,22	1,07	27,8	0,26	0,04	2,72	23,3	3,9

Tab. B.7: Chemische Zusammensetzung der in der Betonherstellung verwendeten Realstoffe und etablierten Bindemittel mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (WDXRF) in m% nach DIN EN 196-2:2013-10

Variante	Na ₂ O m%	MgO m%	Al ₂ O ₃ m%	SiO ₂ m%	P ₂ O ₅ m%	K ₂ O m%	CaO m%	TiO ₂ m%	MnO m%	Fe ₂ O ₃ m%	LOI m%	Sonst. m%
CEM I	0,03	1,89	4,79	20,01	0,22	0,78	61,70	0,22	0,23	3,10	2,7	4,3
S	0,17	5,53	11,02	34,93	0,05	0,68	41,60	1,00	0,58	1,16	-0,9	4,2
FA	0,40	1,25	29,23	47,61	0,29	1,27	3,07	3,35	0,08	9,04	1,7	2,7
L	< NWG	1,08	2,48	6,12	0,04	0,69	47,25	0,11	0,02	0,95	39,3	1,9
R1	0,42	1,36	4,41	51,27	0,08	1,18	21,54	0,17	0,04	1,72	15,3	2,6
R2	0,61	0,78	4,78	66,80	0,08	1,46	12,64	0,17	0,04	1,64	8,9	2,1
R3	0,41	1,72	5,10	43,10	0,10	1,19	23,36	0,22	0,05	2,10	21,2	1,4
R4	0,55	1,61	5,81	49,71	0,10	1,49	21,64	0,23	0,06	2,41	15,0	1,4
R5	0,43	2,02	6,02	39,99	0,09	0,65	27,57	0,29	0,06	1,66	18,8	2,4
R6	1,00	2,44	8,54	44,38	0,17	1,79	18,63	0,39	0,11	4,17	17,1	1,3

Tab. B.8: Chemische Zusammensetzung der in der Betonherstellung verwendeten Realstoffe und etablierten Bindemittel mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (EDXRF) nach DIN EN 196-2:2013-10

		CEM I	S	FA	L	R1	R2	R3	R4	R4	R5
SiO ₂	m%	15	25	36	8,9	37	49	31	36	35	28
Al ₂ O ₃	m%	3,8	9,0	21	3,2	5,1	5,3	5,3	6,0	7,7	6,0
Fe ₂ O ₃	m%	3,1	0,85	8,3	1,3	1,9	1,6	2,4	2,3	4,6	1,8
MnO	m%	0,23	0,62	0,05	0,01	0,04	0,04	0,05	0,06	0,12	0,07
MgO	m%	1,3	5,3	0,52	0,54	1,4	0,85	1,7	2,0	2,4	2,4
CaO	m%	58	39	3,0	64	28	17	29	26	21	34
Na ₂ O	m%		0,30	0,05	0,15	0,76	0,17	0,54		0,32	
K ₂ O	m%		0,28	1,2		0,79	1,2	0,74	1,0	1,3	0,32
TiO ₂	m%	0,11	0,62	3,3	0,09	0,14	0,16	0,18	0,19	0,35	0,23
P ₂ O ₅	m%	0,46	0,27	0,13	0,27	0,28	0,21	0,28	0,27	0,29	0,31
As	mg/kg	30		101	3,0	5,6	10	6,7	9,1	28	2,4
Ba	mg/kg	520	1823	1097	99	310	289	530	322	377	347
Cr	mg/kg	29	14	258		141	169	127	130	261	134
Cs	mg/kg	13	7,0	32	9,0	9,0		3,0	5,0		
Cu	mg/kg	116	14	235	7,9	21	33	25	32	101	130
Ga	mg/kg	11	8,1	47	10	11	11	11	11	14	10
Mo	mg/kg	4,1		8,6	1,4	3,1	4,8	3,6	4,1	6,9	3,1
Nb	mg/kg	6,0	4,3	126	4,1	6,6	6,0	6,9	6,6	13	7,3
Ni	mg/kg	41	7,5	134	20	16	18	19	20	46	20
Pb	mg/kg	22	11	71	15	25	23	30	30	88	30
Rb	mg/kg	35	23	117	26	49	63	47	56	93	25
S	mg/kg	216	3840	3001	216	2786	2728	3576	4460	3918	3837
Sb	mg/kg	21	12	5,7	4,0						
Sn	mg/kg	49	40	32	22	2,5	8,6	5,4	5,9	4,6	5,4
Sr	mg/kg	703	664	571	986	341	307	355	342	526	371
V	mg/kg	60	62	393	49	45	41	45	50	66	57
Y	mg/kg	20	51	52	3,5	10	10	13	17	22	19
Zn	mg/kg	278	33	283	18	53	69	78	117	315	156
Zr	mg/kg	67	200	411	45	68	70	94	99	136	109
Th	mg/kg		10	27						2,9	3,3
U	mg/kg	1,2	9,6	11	5,0	0,43	0,83	0,83	0,92	1,4	1,6
Cd	mg/kg	0,30	0,30	1,2	0,07	0,88	0,63		1,3		

Tab. B.9: Ergänzende chemische Untersuchungen an CEM I und ausgewählten aufbereiteten Betonbrech-sanden

	C _{ges} ¹ m%	TOC ¹ m%	S ¹ m%	SO ₃ ² m%	CaO _f ³ m%	Cl ⁻⁴ m%
CEM I	0,54	0,01	1,22	3,04		0,07
CEM-100	1,01	0,01	0,88	2,53	12,77	
CEM-400	1,23	0,01	1,05	2,68	11,73	
CEM-600	1,28	0,01	1,11	2,83	7,13	
FA0-600	0,95	0,01	0,89	2,24	0,11	
GW50-600	0,60	0,01	0,35	0,89	0,05	
LS50-600	7,64	0,01	0,44	1,17	0,06	
RS50-100	1,04	0,03	0,36	0,88	3,48	
RS50-400	1,11	0,02	0,37	0,93	2,94	
RS50-600	1,09	0,01	0,38	0,99	0,03	
RS75-600	1,04	0,01	0,77	1,94	1,78	
S0-600	0,84	0,01	1,05	2,59	0,76	
R1-100	3,53	0,15	0,27			0,04
R1-600	3,25	0,03	0,28	0,68	0,04	
R2-100	1,71	0,12	0,19			0,01
R2-600	1,46	0,02	0,17	0,41	0,04	
R3-100	3,71	0,24	0,39			0,04
R3-600	3,21	0,03	0,35	0,87	0,06	
R4-100	3,05	0,35	0,45			0,01
R4-600	2,53	0,02	0,45	1,07	0,10	
R5-100	2,14	0,18	0,50			0,04
R5-600	1,50	0,03	0,44	1,02	0,17	
R6-100	4,11	0,99	0,37			0,04
R6-600	2,99	0,07	0,37	0,90	0,05	

¹ Kohlenstoff C_{ges}, organischer Kohlenstoff TOC und Gesamtschwefel S mittels Kohlenstoff-Schwefel-Analysator (CSA) nach DIN EN 196-2:2013-10

² Gravimetrischer Sulfatgehalt SO₃ nach DIN EN 196-2:2013-10

³ Freies Calciumoxid CaO_f nach DIN EN 451-1:2107-08

⁴ Chloridanteil Cl⁻ nach DIN EN 196-2:2013-10

Hydratationswärmeentwicklung

Tab. B.10: Ergebnisse von Wärmeflusskalorimetriemessungen an aufbereiteten Modellstoffen unterschiedlichen Substitutionsraten (vgl. Tab. 2.4)

	$Q_{0,5\text{ h}}$ J/g	t_b h	W_{t_b} mW/g	Q_{t_b} J/g	t_p h	W_{t_p} mW/g	Q_{t_p} J/g	$Q_{5\text{ d}}$ J/g
CEM-400-100	13,2	9,7	0,7	38,2	14,7	0,7	50,6	164,2
CEM-400-50	15,4	2,5	0,7	22,3	11,0	1,9	68,2	251,2
CEM-400-30	14,6	2,2	0,6	19,4	11,5	2,0	66,9	273,6
CEM-600-100	88,7	2,8	0,9	100,4	10,3	1,3	131,2	249,8
CEM-600-50	54,7	2,3	0,7	62,9	9,1	1,9	97,6	270,5
CEM-600-30	33,0	2,6	0,6	41,1	10,7	2,1	84,5	270,0
CEM-600-10	18,4	2,2	0,5	23,8	10,3	2,6	70,9	285,3
S0-600-100	18,1	2,8	0,8	28,4	15,2	2,3	97,8	289,4
S0-600-50	17,0	2,9	1,2	31,3	7,4	2,5	60,2	283,4
S0-600-30	15,2	2,8	0,8	24,8	10,2	2,7	74,4	282,1
FA0-600-100	15,1	30,3	0,0	23,6	136,1	0,4	87,6	65,7
FA0-600-50	17,8	3,2	0,5	26,3	9,7	2,0	55,9	272,6
FA0-600-30	14,9	3,0	0,4	20,7	12,6	2,2	68,4	275,6

Tab. B.11: Ergebnisse von Wärmeflusskalorimetriemessungen an aufbereiteten Modellstoffen (vgl. Tab. 2.4)

	$Q_{0,5h}$ J/g	t_b h	W_{t_b} mW/g	Q_{t_b} J/g	t_p h	W_{t_p} mW/g	Q_{t_p} J/g	Q_{5d} J/g
CEM I	18,8	2,4	0,4	23,2	11,4	2,8	72,5	296,8
CEM-100	18,4	2,3	0,7	24,7	12,1	1,8	72,5	260,7
CEM-400	19,2	2,0	0,7	23,8	10,9	2,0	72,0	274,2
CEM-600	27,1	2,6	0,6	35,4	11,0	2,2	80,9	269,4
CEM-600	37,3	2,5	0,6	45,0	11,0	2,2	90,2	285,9
CEM-800	73,7	2,4	0,7	84,9	9,0	1,4	111,6	270,2
FA0-100	17,6	2,7	0,6	24,0	12,3	1,9	70,0	255,0
FA0-400	17,4	2,8	0,5	22,9	12,8	2,1	73,0	276,2
FA0-600	16,7	2,9	0,4	22,6	12,8	2,2	74,6	287,2
FA50-100	13,7	2,4	0,4	17,2	12,0	2,0	59,7	243,6
FA50-400	14,4	2,2	0,3	17,6	11,7	2,0	60,6	250,1
FA50-600	14,5	2,5	0,3	18,1	12,0	2,0	59,4	244,9
GW50-400	15,0	2,6	0,4	19,1	11,6	2,0	59,9	250,4
GW50-600	15,0	2,7	0,4	19,1	12,1	2,0	60,7	247,4
GW75-400	12,8	2,5	0,4	16,7	12,1	2,2	63,7	268,1
GW75-600	14,2	2,6	0,4	18,6	12,1	2,2	64,5	271,8
GW75-600	14,6	2,7	0,4	19,1	12,7	2,1	64,6	257,1
LS50-100	15,1	2,8	0,4	20,9	13,5	1,8	65,7	245,8
LS50-400	15,5	2,3	0,4	19,7	12,1	2,0	65,8	256,4
LS50-600	15,3	2,6	0,5	20,2	12,2	2,2	67,3	257,2
LS75-100	13,4	4,0	0,4	21,5	18,5	1,7	74,6	254,4
LS75-400	16,2	3,1	0,4	21,8	15,9	1,9	77,5	269,2
LS75-600	20,0	3,0	0,5	28,2	11,7	2,1	73,0	262,0
RS50-100	15,8	2,6	0,4	20,3	12,8	1,9	65,2	250,0
RS50-400	15,6	2,2	0,4	19,1	11,4	2,0	62,8	248,9
RS50-600	14,0	2,7	0,4	18,7	12,1	2,2	63,7	253,0
RS50-800	12,9	2,6	0,3	16,5	11,5	2,0	54,4	232,4
RS62-100	15,9	2,5	0,4	20,6	12,2	2,0	65,8	255,7
RS62-400	15,4	2,8	0,5	21,1	13,1	2,1	71,6	265,2
RS62-600	15,1	3,1	0,5	22,1	12,3	2,3	69,1	261,2
RS62-800	13,7	3,3	0,4	21,0	11,7	2,0	60,0	238,6
RS75-100	15,9	2,3	0,5	20,8	12,1	1,9	65,6	254,4
RS75-400	15,7	2,5	0,5	21,4	12,4	2,1	71,2	266,7
RS75-600	19,7	3,1	0,5	27,7	11,7	2,1	69,8	250,6
RS75-800	14,8	3,7	0,5	26,8	11,2	2,0	64,7	240,6
S0-100	16,5	2,5	0,5	21,4	12,2	2,0	68,6	265,5
S0-400	17,4	2,3	0,6	22,3	11,1	2,2	70,1	273,2
S0-600	16,8	2,8	0,8	26,9	10,0	2,9	76,5	288,6
S50-100	14,6	2,4	0,4	18,7	11,8	2,0	61,5	245,6
S50-400	14,8	2,2	0,4	17,8	11,6	2,1	60,9	248,2
S50-600	14,2	2,6	0,3	17,9	11,9	2,1	59,2	248,2

Tab. B.12: Ergebnisse von Wärmeflusskalorimetriemessungen an aufbereiteten Realstoffen und etablierten Betonbindemitteln. Jeweils Ergebnisse von Doppelbestimmungen, ausgenommen CEM I (Achtfachbestimmung inkl. Angabe der Standardabweichung)

	$Q_{0,5\text{ h}}$ J/g	t_b h	W_{t_b} mW/g	Q_{t_b} J/g	t_p h	W_{t_p} mW/g	Q_{t_p} J/g	$Q_{5\text{ d}}$ J/g
CEM I	18,8 $\pm 1,4$	2,4 $\pm 0,1$	0,4 $\pm 0,0$	23,2 $\pm 1,2$	11,4 $\pm 0,2$	2,8 $\pm 0,1$	72,5 $\pm 1,8$	296,8 $\pm 8,3$
S	12,5	2,6	0,3	15,9	11,6	2,1	55,4	251,9
FA	12,7	2,8	0,3	16,3	11,9	1,9	52,4	228,1
L	11,6	2,0	0,4	14,5	10,2	2,0	51,7	228,2
A1-0/0,25-600	15,5	2,7	0,4	19,8	11,8	2,0	61,5	248,9
A1-0/2-600	14,4	2,7	0,3	18,3	11,8	2,0	57,9	239,3
A2-0/0,25-600	13,1	2,6	0,4	17,5	11,5	1,9	56,7	237,7
A2-0/2-600	12,3	2,5	0,4	16,3	11,2	2,0	56,1	239,1
B1-0/0,25-600	16,3	2,9	0,4	22,1	11,6	2,0	63,8	248,6
B1-0/2-600	16,2	2,8	0,4	21,0	11,7	2,0	62,1	247,3
B2-0/0,25-600	14,5	2,6	0,4	18,8	11,3	2,1	61,1	249,3
B2-0/2-600	14,1	2,6	0,3	17,9	11,7	2,0	58,1	242,0
C-0/0,25-600	15,4	2,8	0,5	21,2	11,2	2,1	63,0	250,8
C-0/2-600	14,8	2,7	0,4	20,0	11,3	2,0	60,2	247,2
D-F-0/0,25-600	30,3	3,7	0,8	49,4	8,2	1,5	69,2	288,3
D-K-0/0,25-600	22,4	3,2	0,5	31,4	10,8	1,9	68,9	256,4
D-K-0/2-600	16,4	3,0	0,4	22,1	11,7	1,9	61,8	244,7
G-F-0/0,25-600	15,3	2,6	0,5	20,6	10,8	2,2	63,5	259,4

Mörteldruckfestigkeit

Tab. B.13: Mörteldruckfestigkeiten ausgewählter Mörtelmischungen im Alter von 1 d, 2 d, 7 d und 28 d

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$f_{c,1\text{ d}}$ MPa	$f_{c,2\text{ d}}$ MPa	$f_{c,7\text{ d}}$ MPa	$f_{c,28\text{ d}}$ MPa
CEM I			0,45	24,5(5)	35,2(8)	54,7(12)	60,9(16)
CEM I			0,50	17,7(6)	28,2(13)	46,9(18)	55,9(15)
CEM I			0,55	14,4(7)	24,5(11)	42,4(14)	50,7(16)
CEM I			0,60	10,0(2)	19,4(5)	34,0(12)	44,8(13)
RS50	400	0,3	0,50	9,7(3)	18,6(5)	32,2(7)	40,0(20)
RS62	400	0,3	0,50	19,1(12)	33,4(15)	43,6(15)	51,3(24)
RS75	400	0,3	0,50	10,2(4)	21,7(4)	40,0(9)	49,8(19)
CEM	400	0,3	0,50	10,4(3)	22,2(7)	39,4(12)	45,8(19)
RS50	600	0,3	0,50	12,5(3)	22,8(12)	40,0(20)	46,6(16)
RS62	600	0,3	0,50	10,9(4)	24,4(8)	42,3(9)	52,0(18)
RS75	600	0,3	0,50	9,6(1)	20,6(4)	40,2(14)	49,2(56)
CEM	600	0,3	0,50	17,8(3)	30,2(4)	45,4(26)	51,1(11)
RS75	800	0,3	0,50	11,9(2)	22,9(7)	38,2(17)	50,2(18)
CEM	800	0,3	0,50	9,6(4)	25,2(8)	43,5(11)	54,9(31)

Tab. B.14: Mörteldruckfestigkeiten der Referenzmörtelmischungen

	f —	$\frac{w}{b}$ —	$\frac{w+FM}{b}$ —	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
CEM I		0,45	0,45	33,0(9)	53,7(16)
CEM I		0,50	0,50	23,5(20)	50,9(9)
CEM I		0,55	0,55	22,3(5)	46,3(12)
CEM I		0,60	0,60	18,3(4)	38,8(18)
CEM I		0,45	0,45	35,2(8)	60,9(16)
CEM I		0,50	0,50	28,2(13)	55,9(15)
CEM I		0,55	0,55	24,5(11)	50,7(16)
CEM I		0,60	0,60	19,4(5)	44,8(13)
CEM I		0,40	0,41	44,5(8)	60,3(32)
CEM I		0,45	0,45	35,9(6)	54,2(30)
CEM I		0,50	0,50	29,6(7)	53,1(14)
CEM I		0,55	0,55	25,5(2)	47,2(11)
CEM I		0,60	0,60	18,3(5)	37,7(8)
CEM I		0,65	0,65	14,9(7)	33,2(11)
FA	0,1	0,50	0,50	26,7(9)	52,0(11)
FA	0,3	0,40	0,41	27,8(4)	60,5(20)
FA	0,3	0,40	0,41	27,4(7)	52,8(10)
FA	0,3	0,50	0,50	14,6(18)	42,9(6)
FA	0,3	0,50	0,50	18,9(6)	40,0(7)
FA	0,5	0,50	0,51	10,9(2)	30,8(10)
S	0,1	0,50	0,50	26,9(8)	54,9(26)
S	0,3	0,40	0,40	32,7(9)	66,5(28)
S	0,3	0,45	0,45	27,1(3)	63,2(22)
S	0,3	0,50	0,50	19,7(5)	49,0(32)
S	0,3	0,50	0,50	19,7(6)	48,4(17)
S	0,5	0,50	0,50	14,9(3)	48,7(15)
L	0,1	0,50	0,50	27,5(7)	51,7(34)
L	0,3	0,35	0,36	36,2(5)	56,3(14)
L	0,3	0,40	0,40	26,4(7)	43,9(28)
L	0,3	0,50	0,50	13,6(9)	35,0(8)
L	0,3	0,50	0,50	17,9(5)	35,8(19)
L	0,5	0,50	0,50	9,9(3)	21,8(6)

Tab. B.15: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Modellstoffen (Teil 1)

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$\frac{w+FM}{b}$ –	Δm –	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
CEM	100	0,1	0,5	0,50	0,000	27,2(5)	53,5(13)
CEM	100	0,3	0,5	0,51	0,000	22,0(4)	40,8(9)
CEM	100	0,3	0,4	0,41	0,000	30,5(8)	46,9(16)
CEM	400	0,1	0,5	0,50	0,094	30,2(9)	55,8(11)
CEM	400	0,1	0,5	0,50	0,094	29,4(10)	53,8(13)
CEM	400	0,3	0,5	0,50	0,094	22,2(7)	45,8(19)
CEM	400	0,3	0,5	0,50	0,094	23,3(8)	46,2(16)
CEM	400	0,5	0,5	0,50	0,094	14,3(4)	35,1(4)
CEM	400	0,3	0,4	0,41	0,094	34,3(8)	59,5(17)
CEM	400	0,3	0,4	0,41	0,094	35,0(2)	52,5(16)
CEM	600	0,1	0,5	0,50	0,161	17,2(9)	41,4(12)
CEM	600	0,1	0,5	0,50	0,162	31,0(15)	55,2(17)
CEM	600	0,3	0,5	0,51	0,161	43,2(12)	66,1(21)
CEM	600	0,3	0,5	0,51	0,162	34,0(3)	53,3(42)
CEM	600	0,3	0,5	0,51	0,162	30,2(4)	51,1(11)
CEM	600	0,3	0,5	0,51	0,157	28,9(6)	49,9(7)
CEM	600	0,3	0,5	0,50	0,131	25,4(5)	44,0(26)
CEM	600	0,3	0,5	0,51	0,139	28,0(7)	48,3(12)
CEM	600	0,5	0,5	0,51	0,161	29,6(5)	47,9(17)
CEM	600	0,5	0,5	0,52	0,131	21,8(8)	40,7(10)
CEM	600	0,5	0,5	0,52	0,139	25,7(5)	43,2(15)
CEM	600	0,3	0,4	0,41	0,161	49,6(17)	69,0(16)
CEM	600	0,3	0,4	0,41	0,162	41,5(13)	60,7(37)
CEM	600	0,3	0,4	0,42	0,157	40,0(26)	64,5(22)
CEM	600	0,3	0,4	0,41	0,131	39,2(10)	63,3(13)
CEM	600	0,3	0,4	0,41	0,139	38,9(6)	57,3(18)
CEM	800	0,1	0,5	0,50	0,180	26,1(8)	54,2(7)
CEM	800	0,3	0,5	0,50	0,180	25,2(8)	54,9(31)
CEM	800	0,3	0,4	0,41	0,180	35,2(8)	72,0(20)
FA0	100	0,3	0,5	0,51	0,000	28,6(5)	47,3(35)
FA0	100	0,3	0,4	0,41	0,000	37,8(8)	58,0(23)
FA0	400	0,3	0,5	0,50	0,103	23,7(7)	51,8(10)
FA0	400	0,3	0,4	0,41	0,103	36,7(6)	67,8(24)
FA0	600	0,3	0,5	0,50	0,131	30,1(9)	58,8(11)
FA0	600	0,3	0,4	0,41	0,131	44,1(11)	68,9(10)
S0	100	0,3	0,5	0,50	0,000	24,8(10)	44,6(11)
S0	100	0,3	0,4	0,41	0,000	31,4(8)	49,4(33)
S0	400	0,3	0,5	0,50	0,115	23,5(5)	50,7(12)
S0	400	0,3	0,4	0,41	0,115	36,7(7)	61,1(18)
S0	600	0,3	0,5	0,50	0,158	34,6(9)	61,9(27)
S0	600	0,3	0,4	0,41	0,158	49,3(9)	70,1(12)

Tab. B.16: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Modellstoffen (Teil 2)

	Temp. °C	f —	$\frac{w}{b}$ —	$\frac{w+FM}{b}$ —	Δm —	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
LS0		0,1	0,5	0,50	0,000	25,5(10)	49,0(24)
LS0		0,3	0,5	0,50	0,000	17,7(14)	37,1(26)
LS0		0,3	0,4	0,40	0,000	25,6(7)	43,8(18)
LS50	100	0,3	0,5	0,50	0,000	19,6(4)	37,6(7)
LS50	100	0,3	0,4	0,41	0,000	27,7(6)	42,9(23)
LS50	400	0,1	0,5	0,50	0,045	24,4(5)	47,1(11)
LS50	400	0,1	0,5	0,50	0,044	25,9(10)	48,2(24)
LS50	400	0,3	0,5	0,50	0,045	19,3(6)	40,2(14)
LS50	400	0,3	0,5	0,50	0,044	21,4(6)	44,4(9)
LS50	400	0,3	0,4	0,40	0,045	28,9(4)	48,7(27)
LS50	400	0,3	0,4	0,41	0,044	32,3(6)	52,9(21)
LS50	600	0,1	0,5	0,50	0,065	24,0(9)	45,3(11)
LS50	600	0,1	0,5	0,50	0,064	30,3(7)	55,7(15)
LS50	600	0,3	0,5	0,50	0,065	20,7(4)	41,7(16)
LS50	600	0,3	0,5	0,50	0,064	24,0(9)	46,6(15)
LS50	600	0,3	0,4	0,41	0,065	31,3(8)	42,4(55)
LS50	600	0,3	0,4	0,41	0,064	35,9(10)	57,2(28)
LS75	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,0(10)	36,7(13)
LS75	100	0,3	0,4	0,41	0,000	28,5(11)	46,0(25)
LS75	400	0,1	0,5	0,50	0,068	24,8(16)	51,5(12)
LS75	400	0,1	0,5	0,50	0,067	26,8(5)	51,1(17)
LS75	400	0,3	0,5	0,50	0,068	19,4(6)	43,3(12)
LS75	400	0,3	0,5	0,50	0,067	21,4(5)	44,4(12)
LS75	400	0,3	0,4	0,40	0,068	30,3(6)	52,4(8)
LS75	400	0,3	0,4	0,41	0,067	32,8(8)	56,5(17)
LS75	600	0,1	0,5	0,50	0,098	27,2(5)	51,6(14)
LS75	600	0,1	0,5	0,50	0,096	27,5(11)	52,0(6)
LS75	600	0,3	0,5	0,50	0,098	22,5(3)	43,3(10)
LS75	600	0,3	0,5	0,50	0,096	24,0(3)	45,0(14)
LS75	600	0,3	0,4	0,41	0,098	34,4(7)	54,1(26)
LS75	600	0,3	0,4	0,41	0,096	37,6(5)	61,6(18)
GW50	100	0,3	0,5	0,50	0,000	21,8(5)	44,8(6)
GW50	100	0,3	0,4	0,41	0,000	31,2(32)	54,2(64)
GW50	400	0,1	0,5	0,50	0,045	25,8(8)	47,5(44)
GW50	400	0,3	0,5	0,50	0,045	19,6(3)	40,2(13)
GW50	400	0,3	0,4	0,41	0,045	30,9(5)	56,8(31)
GW50	600	0,1	0,5	0,50	0,066	29,3(7)	55,6(12)
GW50	600	0,3	0,5	0,50	0,066	24,2(8)	52,1(4)
GW50	600	0,3	0,4	0,41	0,066	33,7(15)	62,6(17)
GW75	100	0,3	0,5	0,50	0,000	24,1(7)	46,9(19)
GW75	100	0,3	0,4	0,41	0,000	36,3(8)	58,9(17)
GW75	400	0,1	0,5	0,50	0,081	26,3(7)	53,1(10)
GW75	400	0,3	0,5	0,50	0,081	20,5(8)	40,7(21)
GW75	400	0,3	0,4	0,41	0,081	31,9(16)	57,6(33)
GW75	600	0,1	0,5	0,50	0,108	26,9(4)	49,1(7)
GW75	600	0,3	0,5	0,50	0,108	25,8(7)	49,0(15)
GW75	600	0,3	0,4	0,41	0,108	39,0(10)	62,0(31)

Tab. B.17: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Modellstoffen (Teil 3)

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$\frac{w+FM}{b}$ –	Δm –	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
RS62	100	0,1	0,5	0,50	0,000	17,3(4)	40,4(12)
RS62	100	0,3	0,5	0,50	0,000	21,1(6)	41,5(8)
RS62	100	0,3	0,4	0,40	0,000	31,5(4)	49,8(14)
RS62	400	0,1	0,5	0,50	0,056	31,1(6)	54,2(24)
RS62	400	0,1	0,5	0,50	0,056	26,5(9)	48,8(18)
RS62	400	0,3	0,5	0,50	0,056	33,4(15)	51,3(24)
RS62	400	0,3	0,5	0,50	0,056	20,8(6)	44,1(10)
RS62	400	0,5	0,5	0,50	0,056	18,0(6)	36,7(13)
RS62	400	0,3	0,4	0,40	0,056	31,4(12)	50,5(19)
RS62	400	0,3	0,4	0,40	0,056	34,2(5)	55,5(21)
RS62	600	0,1	0,5	0,50	0,080	26,6(11)	52,7(26)
RS62	600	0,1	0,5	0,50	0,081	28,1(7)	53,9(14)
RS62	600	0,3	0,5	0,50	0,080	24,4(8)	52,0(18)
RS62	600	0,3	0,5	0,50	0,081	24,4(6)	47,8(13)
RS62	600	0,5	0,5	0,50	0,080	20,5(7)	45,2(19)
RS62	600	0,3	0,4	0,40	0,080	38,8(6)	67,0(22)
RS62	600	0,3	0,4	0,40	0,081	37,3(10)	58,0(25)
RS62	800	0,1	0,5	0,50	0,112	28,2(7)	57,2(20)
RS62	800	0,3	0,5	0,50	0,112	21,3(4)	48,5(12)
RS62	800	0,3	0,4	0,41	0,112	34,3(9)	66,6(19)
RS75	100	0,1	0,5	0,50	0,000	26,4(7)	50,0(18)
RS75	100	0,3	0,5	0,50	0,000	22,5(4)	40,8(8)
RS75	100	0,3	0,4	0,40	0,000	34,5(12)	54,5(25)
RS75	400	0,1	0,5	0,50	0,075	26,5(4)	53,0(9)
RS75	400	0,1	0,5	0,50	0,082	28,9(14)	53,0(27)
RS75	400	0,3	0,5	0,50	0,075	21,7(4)	49,8(19)
RS75	400	0,3	0,5	0,50	0,082	28,4(9)	48,0(24)
RS75	400	0,5	0,5	0,50	0,075	16,1(3)	37,5(11)
RS75	400	0,3	0,4	0,40	0,074	37,0(14)	58,0(29)
RS75	400	0,3	0,4	0,40	0,075	33,8(14)	58,4(26)
RS75	400	0,3	0,4	0,40	0,082	34,0(11)	55,1(19)
RS75	600	0,1	0,5	0,50	0,109	26,6(6)	54,9(26)
RS75	600	0,1	0,5	0,50	0,113	29,3(10)	55,4(15)
RS75	600	0,3	0,5	0,50	0,109	20,6(4)	49,2(56)
RS75	600	0,3	0,5	0,50	0,113	25,4(6)	52,0(19)
RS75	600	0,5	0,5	0,50	0,109	15,7(3)	39,2(15)
RS75	600	0,3	0,4	0,40	0,109	38,2(28)	65,8(15)
RS75	600	0,3	0,4	0,41	0,113	38,9(6)	61,2(19)
RS75	800	0,1	0,5	0,50	0,137	27,9(6)	55,1(16)
RS75	800	0,3	0,5	0,50	0,137	22,9(7)	50,2(18)
RS75	800	0,3	0,4	0,41	0,137	35,8(6)	66,3(22)

Tab. B.18: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Modellstoffen (Teil 4)

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$\frac{w+FM}{b}$ –	Δm –	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
RS0		0,1	0,5	0,50	0,000	25,0(6)	44,9(10)
RS0		0,3	0,5	0,50	0,000	14,1(5)	30,1(10)
RS0		0,3	0,4	0,41	0,000	26,0(5)	47,7(12)
RS50	100	0,1	0,5	0,50	0,000	24,9(4)	51,8(14)
RS50	100	0,3	0,5	0,50	0,000	19,7(5)	38,3(9)
RS50	100	0,3	0,4	0,40	0,000	29,3(10)	51,5(13)
RS50	400	0,1	0,5	0,50	0,046	27,0(8)	53,0(17)
RS50	400	0,1	0,5	0,50	0,042	26,2(8)	48,9(24)
RS50	400	0,3	0,5	0,50	0,046	18,6(5)	40,0(20)
RS50	400	0,3	0,5	0,50	0,042	19,7(7)	41,1(37)
RS50	400	0,5	0,5	0,50	0,046	10,3(3)	30,0(6)
RS50	400	0,3	0,4	0,40	0,046	29,2(4)	53,3(28)
RS50	400	0,3	0,4	0,40	0,042	29,9(9)	50,3(26)
RS50	600	0,1	0,5	0,50	0,059	27,9(34)	53,8(8)
RS50	600	0,1	0,5	0,50	0,061	28,8(10)	51,1(25)
RS50	600	0,3	0,5	0,50	0,059	22,8(12)	46,6(16)
RS50	600	0,3	0,5	0,50	0,061	24,0(6)	44,9(31)
RS50	600	0,5	0,5	0,50	0,059	16,2(3)	36,6(11)
RS50	600	0,3	0,4	0,40	0,059	34,3(6)	61,1(23)
RS50	600	0,3	0,4	0,40	0,061	36,5(8)	54,4(33)
RS50	800	0,1	0,5	0,50	0,089	28,5(7)	57,1(13)
RS50	800	0,3	0,5	0,50	0,089	19,7(6)	44,0(13)
RS50	800	0,3	0,4	0,41	0,089	32,4(8)	63,4(19)
FA50	100	0,3	0,5	0,50	0,000	24,2(5)	43,5(5)
FA50	100	0,3	0,4	0,41	0,000	32,2(5)	51,9(19)
FA50	400	0,3	0,5	0,50	0,048	20,8(6)	44,4(11)
FA50	400	0,3	0,4	0,40	0,048	33,2(10)	60,0(15)
FA50	600	0,3	0,5	0,50	0,062	19,4(5)	41,0(13)
FA50	600	0,3	0,4	0,41	0,062	32,2(6)	58,7(13)
S50	100	0,3	0,5	0,50	0,000	22,1(8)	40,4(15)
S50	100	0,3	0,4	0,41	0,000	29,1(12)	49,9(13)
S50	400	0,3	0,5	0,50	0,056	20,9(6)	45,3(8)
S50	400	0,3	0,4	0,40	0,056	33,7(4)	57,3(11)
S50	600	0,3	0,5	0,50	0,070	21,6(6)	42,6(9)
S50	600	0,3	0,4	0,41	0,070	35,6(9)	59,8(18)

Tab. B.19: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Realstoffen (Teil 1)

	Temp. °C	f —	$\frac{w}{b}$ —	$\frac{w+FM}{b}$ —	Δm —	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
A1-0/0,125	100	0,3	0,5	0,50	0,000	14,5(5)	28,9(6)
A1-0/0,125	100	0,3	0,4	0,51	0,000	23,0(5)	43,4(13)
A1-0/0,125	600	0,1	0,5	0,41	0,059	27,4(6)	48,5(12)
A1-0/0,125	600	0,3	0,5	0,50	0,059	20,2(5)	41,3(18)
A1-0/0,125	600	0,3	0,4	0,50	0,059	30,4(8)	53,5(10)
A1-0/0,25u	600	0,1	0,5	0,50	0,054	27,0(9)	47,6(10)
A1-0/0,25u	600	0,3	0,5	0,50	0,054	19,8(4)	39,2(7)
A1-0/0,25u	600	0,3	0,4	0,50	0,054	29,7(5)	54,6(7)
A1-0/0,25	100	0,3	0,5	0,41	0,000	18,6(3)	32,8(12)
A1-0/0,25	600	0,1	0,5	0,41	0,054	30,1(10)	54,3(32)
A1-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,054	21,9(4)	38,7(7)
A1-0/0,25	600	0,3	0,4	0,50	0,054	32,5(4)	51,5(11)
A1-0/0,5	100	0,3	0,5	0,51	0,000	17,9(12)	33,6(5)
A1-0/0,5	100	0,3	0,4	0,51	0,000	30,0(13)	48,3(20)
A1-0/0,5	600	0,1	0,5	0,51	0,065	28,9(9)	47,5(23)
A1-0/0,5	600	0,3	0,5	0,51	0,065	22,2(7)	37,8(16)
A1-0/0,5	600	0,3	0,4	0,50	0,065	34,3(7)	52,2(23)
A1-0/1	100	0,3	0,5	0,51	0,000	14,6(5)	31,1(15)
A1-0/1	100	0,3	0,4	0,51	0,000	26,0(6)	44,3(18)
A1-0/1	600	0,1	0,5	0,52	0,038	26,6(9)	49,9(9)
A1-0/1	600	0,3	0,5	0,52	0,038	19,0(6)	36,9(14)
A1-0/1	600	0,3	0,4	0,41	0,038	29,6(2)	48,5(9)
A1-0/2	100	0,3	0,5	0,41	0,000	17,1(3)	32,2(18)
A1-0/2	100	0,3	0,4	0,42	0,000	27,1(9)	47,3(10)
A1-0/2	600	0,1	0,5	0,41	0,050	26,3(7)	50,6(6)
A1-0/2	600	0,3	0,5	0,41	0,050	17,6(7)	38,0(8)
A1-0/2	600	0,3	0,4	0,50	0,050	28,7(8)	54,6(20)
A2-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,034	21,9(5)	40,8(12)
A2-0/0,25	600	0,3	0,4	0,41	0,034	30,1(6)	48,4(17)
A2-0/2	600	0,3	0,5	0,51	0,021	22,0(4)	41,7(14)
A2-0/2	600	0,3	0,4	0,41	0,021	27,7(4)	41,8(21)
G-F	100	0,3	0,5	0,50	0,000	19,9(12)	39,7(11)
G-F	100	0,3	0,4	0,50	0,000	27,3(3)	44,6(12)
G-F	400	0,1	0,5	0,40	0,065	27,6(15)	48,0(10)
G-F	400	0,3	0,5	0,41	0,065	23,1(3)	42,1(7)
G-F	400	0,3	0,4	0,50	0,065	33,1(6)	55,4(17)
G-F	600	0,1	0,5	0,50	0,088	28,3(7)	50,5(22)
G-F	600	0,3	0,5	0,41	0,088	22,7(9)	42,3(10)
G-F	600	0,3	0,4	0,50	0,088	34,4(13)	56,6(21)
H-F	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,2(5)	40,3(18)
H-F	100	0,3	0,4	0,41	0,000	26,8(4)	50,0(15)
H-F	600	0,1	0,5	0,50	0,118	29,5(13)	47,7(8)
H-F	600	0,3	0,5	0,50	0,118	24,6(4)	40,6(7)
H-F	600	0,3	0,4	0,40	0,118	35,0(4)	56,1(30)

Tab. B.20: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Realstoffen (Teil 2)

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$\frac{w+FM}{b}$ –	Δm –	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
B1-0/0,25	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,3(7)	37,0(12)
B1-0/0,25	100	0,3	0,4	0,41	0,000	30,0(9)	51,9(6)
B1-0/0,25	400	0,1	0,5	0,50	0,058	27,8(11)	48,2(23)
B1-0/0,25	400	0,3	0,5	0,41	0,058	23,1(5)	40,4(10)
B1-0/0,25	400	0,3	0,4	0,50	0,058	33,7(8)	51,3(29)
B1-0/0,25	600	0,1	0,5	0,41	0,080	27,1(5)	52,1(20)
B1-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,080	23,6(7)	46,4(8)
B1-0/0,25	600	0,3	0,4	0,41	0,080	33,7(16)	56,0(18)
B1-0/0,5	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,6(6)	35,9(10)
B1-0/0,5	100	0,3	0,4	0,41	0,000	26,6(6)	40,6(37)
B1-0/0,5	600	0,1	0,5	0,50	0,071	27,9(6)	49,4(15)
B1-0/0,5	600	0,3	0,5	0,50	0,071	21,6(4)	41,2(9)
B1-0/0,5	600	0,3	0,4	0,40	0,071	35,1(4)	53,4(15)
B1-0/1	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,6(9)	34,2(15)
B1-0/1	100	0,3	0,4	0,41	0,000	27,7(18)	43,7(12)
B1-0/1	600	0,1	0,5	0,50	0,065	26,2(10)	49,5(19)
B1-0/1	600	0,3	0,5	0,50	0,065	20,1(9)	42,3(10)
B1-0/1	600	0,3	0,4	0,50	0,065	30,1(8)	51,1(12)
B1-0/2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	21,6(9)	38,2(19)
B1-0/2	100	0,3	0,4	0,40	0,000	29,7(8)	44,8(7)
B1-0/2	400	0,1	0,5	0,41	0,041	27,4(9)	45,7(19)
B1-0/2	400	0,3	0,5	0,50	0,041	20,2(3)	37,0(10)
B1-0/2	400	0,3	0,4	0,50	0,041	29,8(3)	48,3(6)
B1-0/2	600	0,1	0,5	0,50	0,060	26,4(9)	49,6(15)
B1-0/2	600	0,3	0,5	0,50	0,060	19,6(4)	38,6(11)
B1-0/2	600	0,3	0,4	0,41	0,060	32,7(6)	52,1(27)
B2-0/0,25	100	0,3	0,5	0,41	0,000	19,0(4)	36,1(6)
B2-0/0,25	100	0,3	0,4	0,50	0,000	26,6(8)	44,9(5)
B2-0/0,25	600	0,1	0,5	0,41	0,087	29,2(9)	51,7(23)
B2-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,087	20,3(12)	38,9(12)
B2-0/0,25	600	0,3	0,4	0,50	0,087	31,9(10)	53,9(6)
B2-0/2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	19,1(5)	36,3(17)
B2-0/2	100	0,3	0,4	0,50	0,000	28,8(18)	49,5(21)
B2-0/2	600	0,1	0,5	0,40	0,058	27,7(6)	49,4(16)
B2-0/2	600	0,3	0,5	0,41	0,058	20,0(4)	40,1(7)
B2-0/2	600	0,3	0,4	0,50	0,058	33,4(6)	54,0(32)
C-0/0,2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	19,1(3)	37,0(10)
C-0/0,2	100	0,3	0,4	0,50	0,000	26,8(6)	44,5(16)
C-0/0,2	600	0,1	0,5	0,50	0,098	25,4(5)	47,7(16)
C-0/0,2	600	0,3	0,5	0,41	0,098	19,3(8)	36,6(10)
C-0/0,2	600	0,3	0,4	0,41	0,098	31,3(4)	49,3(33)
C-0/2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	18,1(3)	35,7(9)
C-0/2	100	0,3	0,4	0,41	0,000	28,9(5)	48,9(15)
C-0/2	600	0,1	0,5	0,50	0,072	26,6(6)	50,9(6)
C-0/2	600	0,3	0,5	0,50	0,072	21,2(6)	43,2(20)
C-0/2	600	0,3	0,4	0,41	0,072	34,2(6)	50,0(43)

Tab. B.21: Mörteldruckfestigkeiten der Mörtelmischungen mit thermisch-mechanisch aufbereiteten Realstoffen (Teil 3)

	Temp. °C	f –	$\frac{w}{b}$ –	$\frac{w+FM}{b}$ –	Δm –	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa
D-0/0,25	100	0,3	0,5	0,50	0,000	17,1(3)	33,3(13)
D-0/0,25	100	0,3	0,4	0,50	0,000	25,3(15)	35,4(44)
D-0/0,25	600	0,1	0,5	0,41	0,087	27,9(5)	51,5(22)
D-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,087	22,2(10)	38,3(9)
D-0/0,25	600	0,3	0,4	0,41	0,087	28,1(7)	44,4(18)
D-0/2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	17,2(4)	32,0(6)
D-0/2	100	0,3	0,4	0,50	0,000	25,5(16)	43,2(11)
D-0/2	400	0,1	0,5	0,41	0,029	24,1(11)	46,5(12)
D-0/2	400	0,3	0,5	0,50	0,029	18,4(5)	35,3(7)
D-0/2	400	0,3	0,4	0,50	0,029	29,7(3)	50,9(18)
D-0/2	600	0,1	0,5	0,41	0,039	27,0(7)	46,7(13)
D-0/2	600	0,3	0,5	0,50	0,039	18,0(6)	33,0(15)
D-0/2	600	0,3	0,4	0,50	0,039	30,6(9)	52,6(5)
D-F	100	0,3	0,5	0,40	0,000	3,2(35)	11,4(5)
D-F	100	0,3	0,4	0,50	0,000	9,0(7)	14,8(18)
D-F	400	0,1	0,5	0,50	0,102	29,1(7)	47,9(24)
D-F	400	0,3	0,5	0,50	0,102	25,2(7)	39,6(11)
D-F	400	0,3	0,4	0,50	0,102	34,9(11)	54,1(15)
D-F	600	0,1	0,5	0,50	0,118	31,8(5)	49,8(15)
D-F	600	0,3	0,5	0,40	0,118	23,8(3)	42,1(13)
D-F	600	0,3	0,4	0,40	0,118	39,0(10)	56,8(9)
E-0/0,25	100	0,3	0,5	0,50	0,000	12,8(8)	26,2(14)
E-0/0,25	100	0,3	0,4	0,50	0,000	19,8(11)	34,2(16)
E-0/0,25	600	0,1	0,5	0,50	0,080	26,7(13)	50,3(13)
E-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,080	21,0(4)	39,7(9)
E-0/0,25	600	0,3	0,4	0,50	0,080	32,9(7)	53,8(9)
E-0/2	100	0,3	0,5	0,40	0,000	15,8(3)	29,8(3)
E-0/2	100	0,3	0,4	0,40	0,000	22,0(3)	36,3(35)
E-0/2	400	0,1	0,5	0,50	0,040	27,5(8)	48,5(30)
E-0/2	600	0,1	0,5	0,50	0,055	27,8(10)	51,3(12)
E-0/2	600	0,3	0,5	0,41	0,055	19,8(3)	35,9(41)
E-0/2	600	0,3	0,4	0,50	0,055	31,4(21)	56,9(13)
F-0/0,25	100	0,3	0,5	0,50	0,000	15,4(3)	31,8(10)
F-0/0,25	100	0,3	0,4	0,40	0,000	19,4(23)	32,3(19)
F-0/0,25	600	0,1	0,5	0,50	0,063	28,1(10)	48,1(16)
F-0/0,25	600	0,3	0,5	0,50	0,063	21,1(12)	37,7(11)
F-0/0,25	600	0,3	0,4	0,50	0,063	31,8(26)	49,3(14)
F-0/2	100	0,3	0,5	0,50	0,000	14,9(4)	28,7(19)
F-0/2	100	0,3	0,4	0,50	0,000	22,2(15)	35,5(12)
F-0/2	400	0,1	0,5	0,40	0,026	25,6(2)	46,4(13)
F-0/2	400	0,3	0,5	0,40	0,026	18,1(6)	36,1(13)
F-0/2	400	0,3	0,4	0,40	0,026	28,1(6)	47,9(24)
F-0/2	600	0,1	0,5	0,50	0,042	28,9(11)	49,8(10)
F-0/2	600	0,3	0,5	0,50	0,042	21,0(12)	38,6(34)
F-0/2	600	0,3	0,4	0,50	0,042	36,1(11)	57,9(39)

Untersuchungen an Betonen

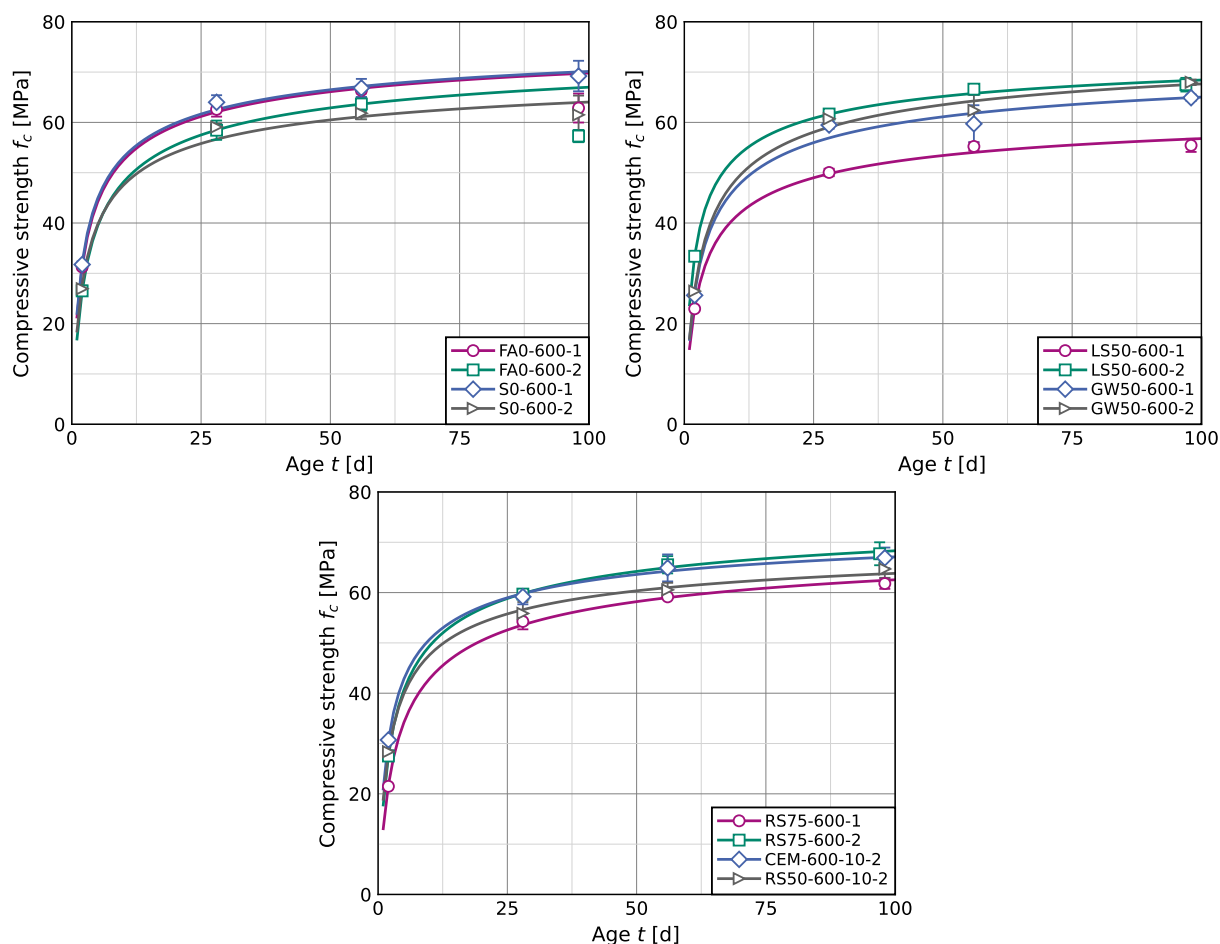


Abb. B.1: Zeitliche Entwicklung der Betondruckfestigkeit der Mischungen mit den Modellstoffen FA0-600, S0-600, LS50-600, GW50-600 und RS75-600 bei 30 m% CEM I-Substitution sowie CEM-600 und RS50-600 bei 10 m% CEM I-Substitution im Alter von 2 d bis 28 d an jeweils drei Prismenhälften (Mittelwerte und Standardabweichungen sowie Regressionskurven nach Gleichung 2.2) Die Ergebnisse von FA0 im Alter 98 d wurden nicht für die Bestimmung der Regressionsparameter verwendet

Tab. B.23: Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen an nass gelagerten Betonprismen

	$f_{ct,fl,2d}$ MPa	$f_{ct,fl,28d}$ MPa	$f_{c,2d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa	$f_{c,56d}$ MPa	$f_{c,98d}$ MPa	$f_{cm,ref}$ MPa	s_c -
CEM I-1	3,6(3)	6,2(6)	19,0(5)	43,8(16)	46,6(12)	53,8(3)	44,4	0,32
CEM I-2	5,3(2)	7,5(1)	32,7(11)	62,8(57)	66,6(11)	73,8(31)	63,6	0,25
CEM I-3	3,8(4)	7,1(2)	18,1(2)	45,9(13)	48,9(10)	53,5(4)	45,4	0,33
CEM I-4	5,9(4)	7,7(8)	33,3(4)	61,0(13)	66,5(19)	69,3(15)	61,9	0,23
FA-1	3,6(2)	6,7(6)	19,3(3)	48,2(4)	59,1(19)	64,3(6)	52,0	0,39
FA-2	4,6(4)	7,6(3)	27,2(2)	61,2(5)	63,2(55)	64,5(49)	58,5	0,27
FA-3	3,5(2)	7,1(2)	18,4(6)	46,7(9)	57,8(9)	61,0(23)	50,1	0,39
FA-4	4,6(4)	7,4(5)	26,3(8)	59,4(12)	71,7(10)	75,9(20)	63,5	0,34
S-1	4,2(2)	7,5(4)	21,1(6)	57,6(56)	65,4(7)	71,5(2)	58,8	0,38
S-2	4,7(5)	7,4(8)	27,1(4)	63,1(9)	69,3(51)	76,8(14)	64,3	0,32
L-1	3,8(2)	6,4(3)	19,3(5)	42,5(20)	46,4(6)	46,8(8)	42,0	0,28
L-2	5,9(1)	7,8(3)	34,5(39)	58,6(9)	67,1(12)	68,8(36)	61,5	0,22
R1-1	4,3(2)	7,0(2)	20,9(1)	47,4(10)	51,6(22)	53,9(13)	47,2	0,30
R1-2	5,2(1)	7,3(2)	30,1(19)	62,4(7)	62,5(47)	67,3(5)	60,0	0,25
R2-1	4,0(3)	6,7(2)	19,7(2)	42,6(27)	51,0(29)	52,6(13)	45,1	0,31
R2-2	5,3(5)	7,8(6)	28,5(15)	60,5(11)	61,6(7)	68,5(16)	59,3	0,27
R3-1	4,4(4)	7,0(2)	22,5(7)	48,9(6)	52,0(15)	56,2(6)	48,7	0,28
R3-2	5,2(5)	7,7(2)	31,8(6)	61,1(19)	66,3(17)	67,5(34)	61,1	0,24
R4-1	4,6(1)	7,0(5)	22,5(4)	49,6(22)	53,9(11)	56,1(20)	49,4	0,29
R4-2	5,2(4)	7,6(4)	31,4(1)	61,1(20)	65,5(14)	67,0(14)	60,7	0,24
R5-1	4,8(1)	7,0(2)	27,6(10)	55,4(14)	57,2(11)	58,9(4)	53,7	0,24
R5-2	5,6(3)	7,3(1)	38,0(3)	66,5(12)	65,9(44)	67,4(4)	63,4	0,18
R6-1	4,4(2)	7,0(5)	22,1(3)	50,2(10)	53,8(4)	55,0(8)	49,2	0,29
R6-2	4,9(6)	7,5(6)	30,3(3)	61,8(21)	66,3(23)	68,6(1)	61,4	0,26
CEM-100-1	4,1(1)	6,0(1)	22,3(4)	46,7(5)	50,0(12)	52,1(4)	46,3	0,26
CEM-100-2	6,0(6)	7,7(2)	38,9(16)	61,4(63)	62,3(76)	71,8(37)	62,5	0,18
RS50-100-1	4,3(2)	6,4(7)	20,6(2)	44,7(6)	47,8(6)	50,3(9)	44,3	0,28
RS50-100-2	5,8(1)	7,7(4)	37,8(2)	64,5(28)	63,6(48)	70,5(31)	63,1	0,19
CEM-400-1	4,4(0)	6,9(0)	24,1(4)	54,4(6)	57,5(10)	58,8(7)	52,8	0,28
CEM-400-2	5,0(2)	7,4(4)	32,1(2)	58,8(5)	64,0(19)	64,7(3)	59,0	0,22
RS50-400-1	4,2(2)	6,3(4)	21,2(1)	49,1(10)	51,1(12)	52,9(28)	47,3	0,28
RS50-400-2	5,0(2)	7,3(1)	31,5(12)	60,7(23)	62,7(23)	65,8(8)	59,4	0,23
CEM-600-1	5,1(3)	7,0(4)	28,5(7)	58,8(16)	60,1(21)	61,1(32)	56,2	0,24
CEM-600-2	5,2(3)	7,1(4)	29,7(1)	58,2(1)	62,1(10)	61,9(21)	57,1	0,23
RS50-600-1	4,5(3)	6,8(3)	22,8(3)	51,1(5)	54,8(3)	57,0(13)	50,4	0,29
RS50-600-2	5,3(5)	7,7(3)	32,4(4)	60,0(13)	64,9(11)	65,1(61)	59,8	0,22
GW50-600-1	4,8(1)	7,3(4)	25,6(2)	59,5(7)	59,7(37)	64,9(6)	56,9	0,28
GW50-600-2	4,8(3)	7,6(4)	26,5(3)	60,7(10)	62,4(30)	68,0(5)	59,0	0,29
LS50-600-1	4,0(3)	7,0(2)	23,0(4)	50,0(7)	55,2(8)	55,4(13)	49,8	0,28
LS50-600-2	5,2(3)	7,6(2)	33,4	61,7(4)	66,6	67,5(14)	61,6	0,22
RS75-600-1	4,2(2)	7,2(4)	21,5(4)	54,3(16)	59,2(3)	61,8(11)	53,6	0,33
RS75-600-2	4,8(1)	7,3(3)	27,5(5)	59,7(10)	65,5(17)	67,7(23)	59,8	0,28
FA0-600-1	5,3(2)	7,2(6)	31,3(5)	62,6(14)	66,4(6)	62,9(29)	60,1	0,23
FA0-600-2	5,0(4)	7,0(4)	26,5(6)	58,4(19)	63,7(14)	57,3(12)	55,7	0,25
S0-600-1	5,3(2)	7,4(5)	31,7(6)	64,0(14)	66,8(18)	69,2(30)	62,5	0,24
S0-600-2	4,6(3)	7,4(1)	26,9(6)	59,1(6)	61,8(12)	61,5(38)	56,7	0,26
CEM-600-10-2	5,3(1)	7,2(3)	30,7(5)	59,2(15)	64,9(27)	66,9(20)	59,8	0,24
CEM-600-50-1	4,9(0)	7,2(6)	31,7(3)	51,7(33)	57,4(57)	58,4(27)	53,2	0,19
CEM-600-50-2	5,6(4)	7,5(1)	35,8(2)	58,0(7)	64,1(3)	67,4(7)	60,2	0,20
RS50-600-10-2	5,3(3)	7,9(1)	28,4(3)	55,9(23)	60,5(14)	64,7(18)	56,6	0,26
RS50-600-50-1	3,2(3)	6,3(4)	15,5(2)	42,1(3)	44,7(5)	42,6(31)	39,5	0,32
RS50-600-50-2	5,4(3)	8,2(2)	35,6(7)	60,4(47)	69,3(24)	70,3(3)	63,2	0,22

Tab. B.24: Ergebnisse der Verformungs- und Dauerhaftigkeitsversuche an Beton

	$f_{ct,fl,28d}$ MPa	$f_{ct,fl,98d}$ MPa	$f_{c,28d}$ MPa	$f_{c,98d}$ MPa	$E_{c,dyn,28d}$ GPa	ϵ_{cds0} $\mu\text{m}/\text{m}$	K_{AC} $\text{mm}/\text{d}^{0,5}$	d_c mm	Δm_{28} m%
CEM I-1	6,7(5)	5,8(2)	45,1(14)	42,1(5)	31,2(5)	447	0,87	12,2	
CEM I-2	7,1(7)	5,9(5)	55,9(15)	50,8(21)	32,7(7)	422	0,50	8,8	
CEM I-3	6,4(3)	7,0(4)	48,0(3)	52,4(18)	32,8(3)	792	0,91	15,8	
CEM I-4	8,3(2)	9,2(8)	67,5(23)	74,5(15)	37,2(3)	677	0,51	12,6	0,15
FA-1	6,1(4)	5,7(5)	41,6(31)	48,5(14)	30,7(11)	306	1,17	10,6	
FA-2	6,6(6)	6,0(1)	48,5(13)	48,9(16)	32,7(2)	417	0,77	9,1	
FA-3	7,3(1)	6,4(2)	50,1(10)	55,0(10)	34,5(2)	712	1,13	14,4	
FA-4	8,2(4)	7,6(6)	60,7(12)	65,4(22)	36,1(4)	676	0,79	12,6	0,19
S-1	7,2(3)	7,3(5)	58,0(3)	57,3(5)	34,2(7)	813	0,85	7,9	
S-2	7,8(3)	8,5(8)	61,1(7)	65,2(6)	33,7(5)	770	0,65	7,2	
L-1	7,1(10)	6,5(6)	47,2(4)	47,6(10)	31,9(4)	739	1,31	25,3	
L-2	8,6(1)	8,8(2)	66,7(31)	70,3(14)	38,0(1)	664	0,60	15,0	
R1-1	7,0(3)	7,4(2)	49,9(10)	54,5(4)	33,2(4)	778	1,04	17,6	
R1-2	7,4(4)	7,4(6)	62,3(17)	61,7(17)	36,9(4)	760	0,72	13,1	
R2-1	7,3(2)	7,6(0)	49,1(7)	53,2(3)	33,9(1)	818	1,12	17,5	
R2-2	7,7(4)	7,9(8)	62,3(2)	61,9(7)	36,8(6)	730	0,72	13,4	
R3-1	7,1(4)	7,0(11)	53,6(7)	53,2(8)	32,9(5)	861	1,03	17,4	
R3-2	7,1(13)	7,6(8)	66,4(17)	61,3(15)	35,6(8)	819	0,75	15,7	
R4-1	7,1(2)	7,3(6)	51,3(28)	50,0(9)	33,0(2)	942	1,05	17,4	
R4-2	7,0(4)	7,4(8)	62,6(23)	60,4(9)	33,8(5)	853	0,72	15,3	
R5-1	6,7(2)	6,3(5)	52,2(12)	50,5(2)	28,6(1)	930	1,05	17,6	
R5-2	7,8(2)	7,5(3)	64,3(7)	61,6(21)	30,3(2)	756	0,68	13,3	0,11
R6-1	7,1(0)	6,2(7)	51,5(15)	48,8(10)	30,9(2)	866	1,13	17,2	
R6-2	8,2(9)	8,0(5)	64,0(18)	65,7(7)	33,5(6)	739	0,75	14,0	0,23
CEM-100-1	6,4(4)	6,4(1)	49,5(10)	47,8(9)	33,3(10)	450	0,92	17,9	
CEM-100-2	7,7(4)	8,3(5)	68,1(5)	67,7(16)	35,9(3)	555	0,34	13,1	0,08
RS50-100-1	6,1(10)	7,2(2)	49,0(4)	49,8(10)	33,8(2)	511	1,11	18,0	
RS50-100-2	8,0(4)	8,6(3)	66,5(2)	65,8(9)	37,7(3)	535	0,63	14,2	0,11
CEM-400-1	6,6(6)	7,0(6)	53,1(12)	55,1(7)	33,4(2)	937	0,86	17,1	
CEM-400-2	8,0(4)	7,8(3)	62,4(6)	60,2(24)	35,2(6)	857	0,57	14,2	0,13
RS50-400-1	7,0(5)	6,9(7)	48,4(6)	51,3(2)	33,5(4)	799	1,11	20,1	
RS50-400-2	8,8(4)	8,5(3)	64,3(29)	66,6(6)	36,9(4)	831	0,63	15,0	0,17
CEM-600-1	7,3(2)	7,8(7)	59,4(13)	57,7(17)	34,6(2)	786	0,72	16,6	
CEM-600-2	7,1(4)	8,0(2)	56,5(11)	63,5(16)	34,1(3)	794	0,65	17,9	0,18
RS50-600-1	6,9(5)	7,7(1)	52,9(6)	49,5(39)	34,4(1)	842	1,12	18,7	
RS50-600-2	8,2(11)	8,2(3)	62,2(21)	61,7(34)	35,8(4)	772	0,77	17,3	0,14
GW50-600-1	7,9(3)	7,6(6)	59,7(2)	60,0(16)	33,1(4)	915	1,01	19,1	
GW50-600-2	7,9(5)	7,7(8)	61,3(5)	63,3(21)	34,4(3)	945	0,99	18,4	
LS50-600-1	7,0(6)	6,4(3)	53,5(4)	50,1(3)	33,3(3)	898	1,06	22,1	
LS50-600-2	7,4(3)	8,0(2)	64,1(6)	63,8(19)	36,2(5)	805	0,73	17,3	0,20
RS75-600-1	6,9(3)	6,8(3)	51,6(21)	53,5(15)	33,2(3)	831	0,81	19,3	
RS75-600-2	7,1(10)	7,8(8)	58,3(10)	61,1(8)	34,8(4)	761	0,67	16,9	0,25
FA0-600-1	6,6(9)	7,0(4)	57,7(9)	55,3(13)	32,8(4)	1008	0,95	15,5	
FA0-600-2	6,6(2)	6,3(6)	55,9(6)	55,1(16)	32,4(2)	952	1,17	16,5	0,19
S0-600-1	6,4(4)	6,7(2)	59,2(3)	59,9(16)	33,6(2)	941	0,76	16,4	
S0-600-2	6,9(3)	7,3(7)	55,1(4)	57,8(16)	32,7(0)	960	0,94	16,6	0,17
CEM-600-10-2	7,7(8)	7,8(8)	61,0(3)	62,9(12)	34,6(4)	878	0,53	16,0	0,13
CEM-600-50-1	7,5(4)	8,4(6)	58,5(29)	61,3(12)	32,7(2)	890	0,77	18,6	
CEM-600-50-2	8,2(7)	8,8(10)	60,4(31)	68,9(7)	34,6(2)	888	0,39	17,7	0,09
RS50-600-10-2	7,6(3)	8,8(4)	57,9(7)	66,0(15)	35,2(2)	872	0,64	15,2	0,17
RS50-600-50-1	6,2(3)	6,5(4)	47,1(3)	44,8(2)	31,8(5)	936	1,80	28,4	
RS50-600-50-2	8,4(6)	9,3(7)	63,0(28)	71,0(11)	36,8(4)	754	0,71	17,4	0,08

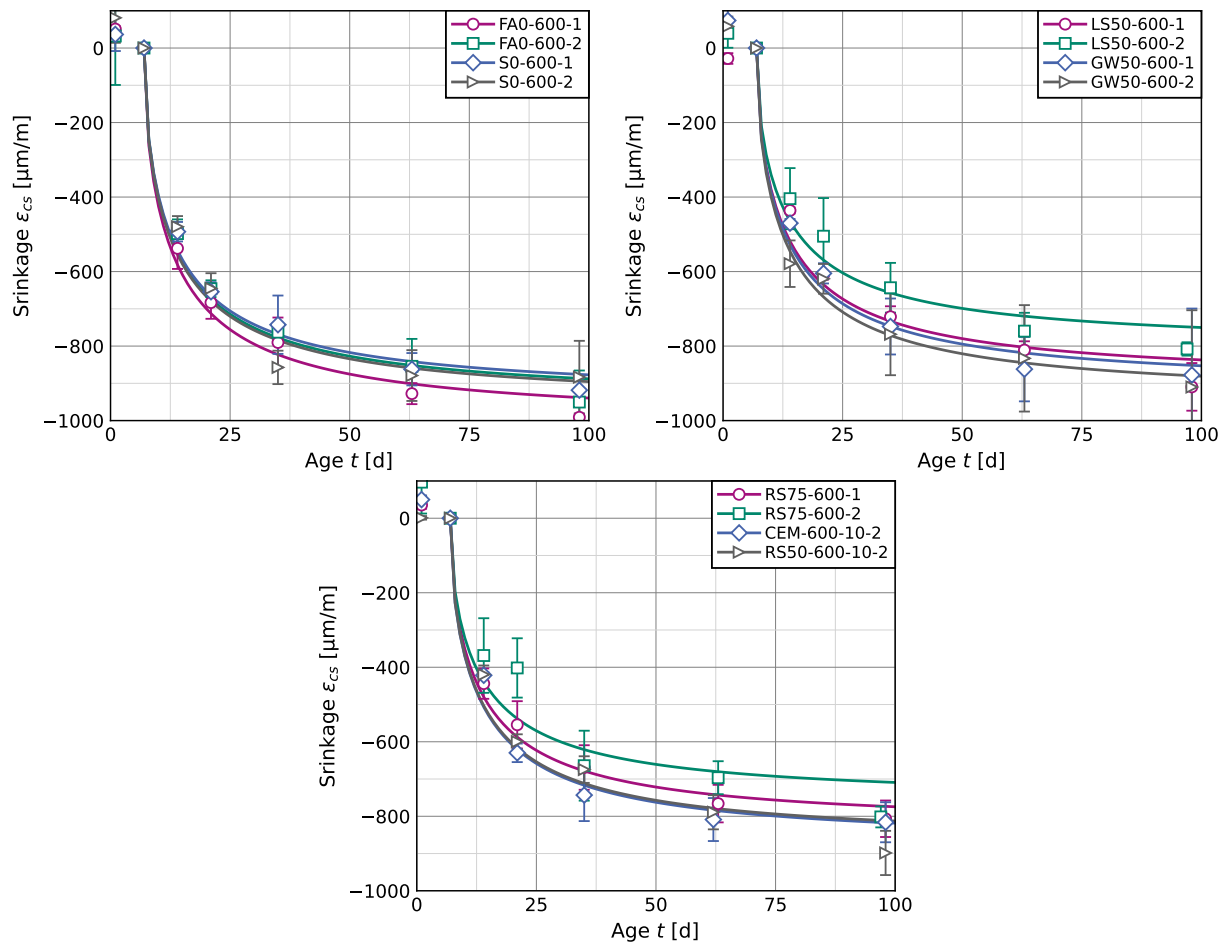


Abb. B.2: Schwindverformungen der Mischungen mit den Modellstoffen FA0-600, S0-600, LS50-600, GW50-600 und RS75-600 bei 30 m% CEM I-Substitution sowie CEM-600 und RS50-600 bei 10 m%

Mittelwerte und Standardabweichungen aus drei Proben sowie Anpassung von Gleichung 2.32 an die Versuchsergebnisse

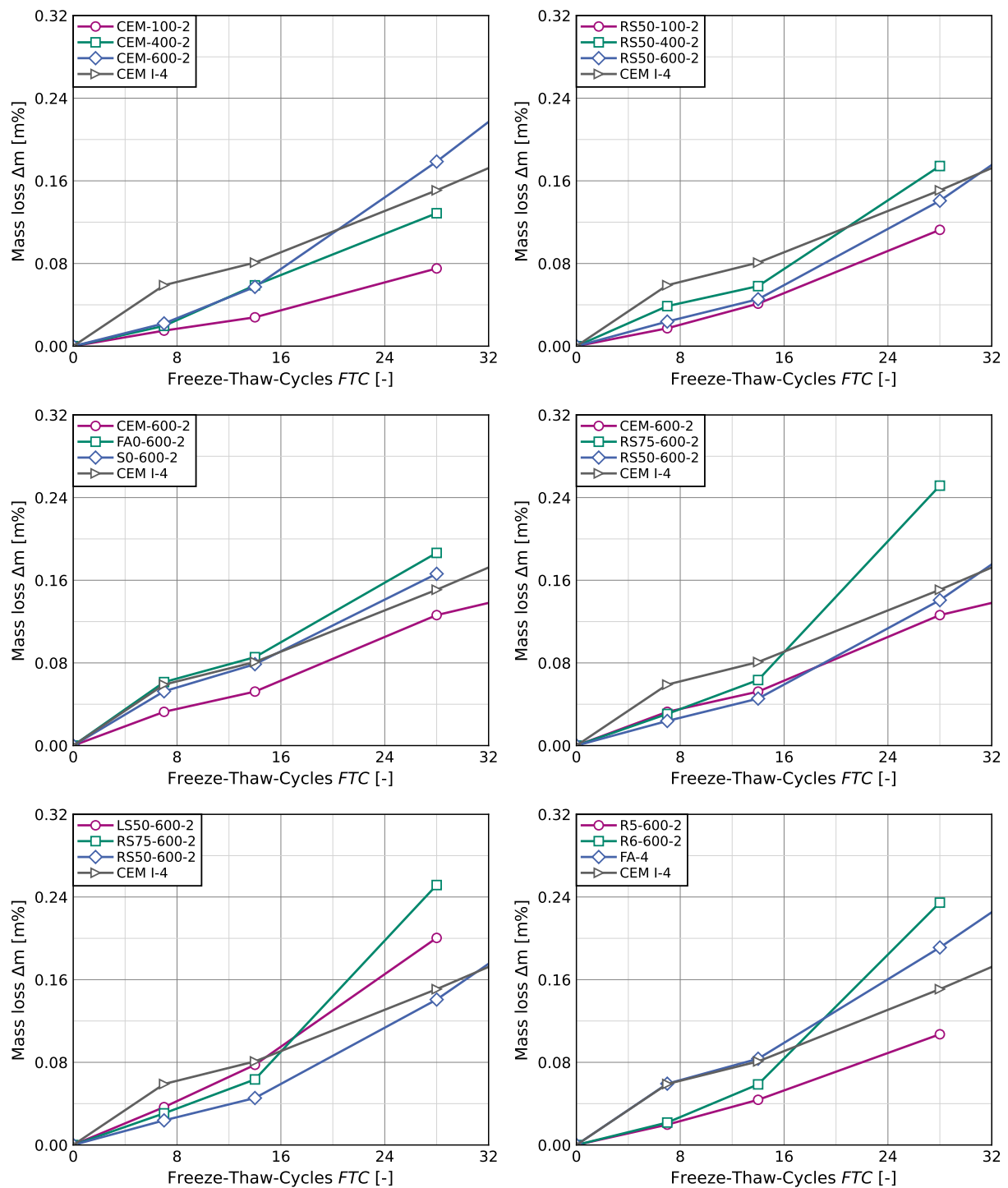


Abb. B.3: Kumulativer Massenverlust ausgewählter Betone mit unterschiedlichen thermisch-mechanisch aufbereiteten Modell- und Realstoffen in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel

Säulenversuche

Tab. B.25: Eluatfraktionen nach W/F-2-Schnelltest an ausgewählten nicht aufbereiteten Betonbrechsanden

		R1-100	R2-100	R3-100	R4-100	R5-100	R6-100
pH-Wert	-	12,5	12,15	12,25	12,15		10,03
El. Leitfähigkeit	mS/cm	6,55	2,9	3,84	3,73		2,24
Fluorid	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.		n.b.
Chlorid	mg/l	83	10	118	27		118
Nitrit	mg/l	1,4	0,41	2,3	2,2		2,9
Bromid	mg/l	0,18	0,20	0,23	0,23		0,82
Nitrat	mg/l	11	1,7	9,4	9,6		23
Phosphat	mg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2		< 0,2
Sulfat	mg/l	34	16	27	391		1234
Arsen	µg/l	0,43	0,12	0,50	1,07		6,97
Cadmium	µg/l	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07		< 0,07
Chrom	µg/l	22	36	86	135		222
Cobalt	µg/l	0,43	5,5	11	1,9		19
Kupfer	µg/l	13	20	79	44		405
Nickel	µg/l	4,3	0,65	17	9,1		23
Blei	µg/l	5,0	2,1	2,7	2,3		< 0,04
Thallium	µg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002		< 0,002
Zink	µg/l	2,7	2,5	2,1	2,6		2,8
Naphthalin ⁺	µg/l	0,026	0,012	0,020	0,286		0,156
PAK15	µg/l	0,838	0,074	1,063	0,655		3,543

⁺ Naphtalin und Methylnaphtalin

Tab. B.26: Eluatfraktionen nach W/F-2-Schnelltest an ausgewählten bei 600 °C thermisch aufbereiteten Betonbrechsanden

		R1-600	R2-600	R3-600	R4-600	R5-600	R6-600
pH-Wert	-	12,26	12,16	12,15	12,23	12,09	10,57
El. Leitfähigkeit	mS/cm	3,45	1,85	2,97	3,3	2,39	2,66
Fluorid	mg/l	0,88	0,65	0,94	1,28	0,67	
Chlorid	mg/l	73	14	116	26	23	
Nitrit	mg/l	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	
Bromid	mg/l	0,24	0,24	0,31	0,30	0,15	
Nitrat	mg/l	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	
Phosphat	mg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	
Sulfat	mg/l	8	22	9	25	26	
Arsen	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,23	< 0,01	2,5
Cadmium	µg/l	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07
Chrom	µg/l	224	839	165	856	416	1472
Cobalt	µg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kupfer	µg/l	< 0,03	0,13	< 0,03	0,52	89	0,60
Nickel	µg/l	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,3	< 0,1
Blei	µg/l	1,4	< 0,04	0,6	1,3	0,4	< 0,04
Thallium	µg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,025
Zink	µg/l	2,6	3,3	3,4	4,1	2,7	2,9
Naphthalin ⁺	µg/l	0,016	0,000	0,000	0,000	0,021	0,016
PAK15	µg/l	0,036	0,014	0,000	0,000	0,000	0,000

⁺ Naphtalin und Methylnaphtalin

Tab. B.27: Eluatfraktionen nach W/F-2-Schnelltest an Betonen mit 30 m% CEM I-Substitution durch ausgewählte bei 600 °C thermisch aufbereitete Betonbrechsande

		R1-1-c	R2-1-c	R3-1-c	R4-1-c	R5-1-c	R6-1-c
pH-Wert	-	12,6	12,6	12,69	12,63	12,77	12,70
El. Leitfähigkeit	mS/cm	7,77	7,82	7,45	8,18	8,28	7,82
Fluorid	mg/l	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Chlorid	mg/l	45	29	39	33	38	30
Nitrit	mg/l	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	0,50	0,43
Bromid	mg/l	0,51	0,38	0,50	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Nitrat	mg/l	1,7	1,7	1,6	2,0	8,8	3,9
Phosphat	mg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sulfat	mg/l	72	53	74	49	75	48
Arsen	µg/l	< 0,01	0,02	< 0,01	0,06	0,12	0,04
Cadmium	µg/l	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07
Chrom	µg/l	32	30	30	28	38	27
Cobalt	µg/l	36	37	38	49	54	46
Kupfer	µg/l	1,4	1,4	1,9	2,7	4,6	2,3
Nickel	µg/l	0,17	0,31	0,60	0,73	1,3	0,26
Blei	µg/l	4,9	4,6	5,6	7,2	8,1	6,9
Thallium	µg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002	0,002	< 0,002
Zink	µg/l	3,7	3,6	3,4	3,6	5,4	3,8
Naphthalin ⁺	µg/l	0,000	0,012	0,000	0,023	0,011	0,000
PAK15	µg/l	0,166	0,342	0,066	0,262	0,161	0,144

⁺ Naphtalin und Methylnaphtalin