

DBU-Förderantrag - AZ 34088

Reststofffrei rezyklierbares Sandwichelement aus nicht brennbaren, rein mineralischen Werkstoffen – CO₂-Vermeidung und CO₂-Sequestrierung in der Betonpraxis

Kurztitel: Vollrezyklierbares Sandwichelement zur 2-fachen CO₂-Vermeidung

Kurzbezeichnung: |2CO₂|sandwich ['tsvai 'tse: 'o: 'tsvai 'zentvɪʃ]



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
KAISERSLAUTERN



ZuberBeton

Fertigteile

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Hauptantragssteller:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Werkstoffe im Bauwesen (WiB)

Prof. Dr.ir. Eddie Koenders

Franziska-Braun-Straße 3

64287 Darmstadt

Internet: www.wib.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Albrecht Gilka-Bötzow

Telefon: +49 6151 16 22219

Mail: gilka-boetzow@wib.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
1.....Beschreibung des Gesamtprojektes	3
1.1 Relevanz des Vorhabens	3
1.2 Zusammenarbeit der Projektbeteiligten.....	5
1.3 Projektplan	5
2.....Mineralisierter Dämmschaum	6
2.1 Optimierung des Mischungsentwurfes des mineralisierten Schaums.....	6
2.2 Herstellung des mineralisierten Dämmschaums	7
2.3 Analyse der mechanischen Eigenschaften des mineralisierten Schaums.....	8
2.4 Prozessentwicklung für das Recycling	10
2.5 Kalzinierungstests zur Analyse des mineralisierten Schaums	12
2.6 Chemische und mikrostrukturelle Analyse	14
3.....Recycling-Beton.....	16
3.1 Herstellung, Zerkleinerung und Aufbereitung der Betonproben	16
3.2 Analyse der Ausgangsstoffe.....	19
3.3 Entwicklung geeigneter Auslagerungstechniken.....	23
3.4 Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Mischungsentwürfe.....	32
3.5 Entwicklungstool für Recycling-Beton	33
3.6 Herstellung des Recycling-Betons.....	36
3.7 Analyse der mechanischen Eigenschaften.....	37
3.8 Analyse der Dauerhaftigkeit.....	39
3.9 Modellierung der Dauerhaftigkeit	47
4.....Sandwichkonstruktion	56
4.1 Entwicklung effektiver Verbindungstechniken.....	56
4.2 Erarbeitung eines Verankerungskonzeptes	58
4.3 Entwicklung industrieller Produktionstechniken der Sandwichkonstruktion.....	60
4.4 Herstellung der Sandwichelemente.....	61
4.5 Prüfung der mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems.....	67
4.6 Versuche zur Statik und Modularität der Sandwichelemente.....	70
4.7 Entwicklung eines Bemessungsmodells für die Praxis.....	76
4.8 Recycling der entwickelten Sandwichelemente	77
5.....Ganzheitliche Analyse.....	78
5.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen	78
5.2 LCA: Stoffkreislauf 2CO ₂ - Sandwichelement.....	79
5.3 LCA: Stoffkreislauf RC-Beton	81
5.4 LCA: Stoffkreislauf des mineralisierten Dämmschaum.....	83
5.5 Wirkungsabschätzung.....	85
5.6 Auswertung der Ökobilanzierung.....	87
6.....Literaturverzeichnis	89
7.....Abbildungsverzeichnis	92

8.....Tabellenverzeichnis	96
9.....Anhang.....	97

1 Beschreibung des Gesamtprojektes

Ziel des Projektes ist die Entwicklung des sogenannten |2CO2|sandwich - eines reststofffrei rezyklierbaren, leichten, nicht tragenden und hochwärmedämmenden Sandwichelements. Das Bauteil für Fassaden und Trennwände besteht aus mineralisch gebundenen Baustoffen und ist nicht brennbar. Die Deckschichten bestehen aus Recycling-Beton, der Sandwichkern aus mineralisiertem Schaum niedriger Rohdichte. Die Verbindung der einzelnen Schichten erfolgt mit leichten Verbindungsmitteln aus Faserverbund-Kunststoff (FVK) mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit.

Das Anwendungsgebiet der neuen |2CO2|sandwiches liegt sowohl im Neubau als auch in der Bestandssanierung von Skelettbauwerken höherer Gebäudeklassen. Durch die Leichtbauweise werden anspruchsvolle umweltfreundliche Neubauten möglich sowie vielfältige Sanierungsmöglichkeiten und Konzepte eröffnet.

Das |2CO2|sandwich ist eine konsequente, ökologische und umweltschonende Weiterentwicklung der leistungsfähigen Betonsandwichbauweise. So wird zum einen in den Deckschichten aus Recycling-Beton des materialkonformen Sandwiches gezielt CO₂ gespeichert und zum anderen durch eine neue Recyclingtechnik für den hochdämmfähigen zementgebundenen Schaum im Kern CO₂ vermieden.

1.1 Relevanz des Vorhabens

Aktuellste Zahlen zum Energieverbrauch deutscher Haushalte machen darauf aufmerksam, dass weiterhin großer Bedarf an wirtschaftlich interessanten Lösungen für die Sanierung des Gebäudebestandes unter Einbeziehung aller Gebäudeklassen besteht. Der gesamte Energieverbrauch deutscher Haushalte sowie der Anteil an dem Verbrauch, der für Raumwärme genutzt wird und somit durch effiziente energetische Sanierungskonzepte beeinflussbar ist, zeigt in den letzten 20 Jahren und insbesondere seit 2010 eine annähernd gleichbleibende Ausprägung (Abbildung 1). Untermauert wird die Notwendigkeit von energetisch effizienten Sanierungskonzepten dadurch, dass der steigende Einsatz von erneuerbaren Energien vorwiegend in Form von elektrischer Energie derzeit diesen Anwendungsbereich weitestgehend ausspart.

Zement ist als Ausgangsstoff für Beton im Bauwesen notwendig. Das weltweite Wachstum bedingt, dass immense Mengen dieses Materials benötigt werden. So steigt die weltweite Zementproduktion stetig und betrug im Jahr 2017 etwa 4,1 Milliarden Tonnen [1]. Die Zementproduktion ist mit etwa fünf Prozent aller Industrie- und Verbrennungsprozesse an den weltweiten CO₂-Emissionen beteiligt [2]. Eine erhebliche Umweltrelevanz ergibt sich daraus, dass bei der Herstellung von Zement nicht nur durch das Brennen selbst, sondern auch prozessbedingt durch die sogenannte Kalksteinentsäuerung klimaschädliches CO₂ ausgestoßen wird. Dieser chemische Prozess stellt einen Anteil von über die Hälfte (etwa 55 %) der Gesamtemissionen, der nicht etwa durch den Einsatz von erneuerbaren Energien zum Betreiben der Brennöfen reduziert werden kann [3].

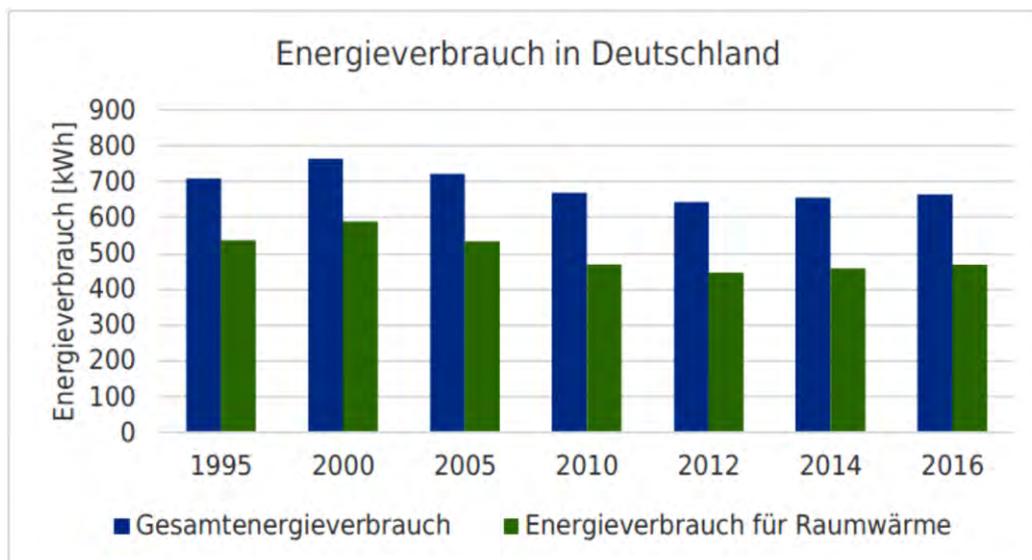


Abbildung 1: Temperaturbereinigter Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen (Quelle: Statistisches Bundesamt).

Auch das nachhaltige Baustoffrecycling spielt in der heutigen Zeit eine immer größere Rolle. Weltweit steigt die Menge an anfallendem Abfall drastisch und sorgt für eine sich immer weiter verschärfende Problematik der Entsorgung. So wurde es in Deutschland in den letzten Jahren versäumt für ausreichend Deponien zu sorgen, so dass der aktuelle „Bauboom“ zu Engpässen führt. Bauabfälle stellen deutschlandweit derzeit die Hälfte der zu deponierenden Reststoffe dar [4]. Selbst in der kurzen Zeitspanne von 2012 zu 2016 ist eine Erhöhung der angefallenen Abfallmengen ersichtlich und die steigende Tendenz deutlich erkennbar (Abbildung 2). Diese Situation wird durch neue internationale Bedingungen, die einen Reststoffexport schwieriger machen, weiter verschärft [5]. Besonders deutlich wird das Ausmaß dieser Problematik vor dem Hintergrund, dass Experten eine weitere Verdopplung der weltweiten Abfallmenge bis 2025 prognostizieren [6].

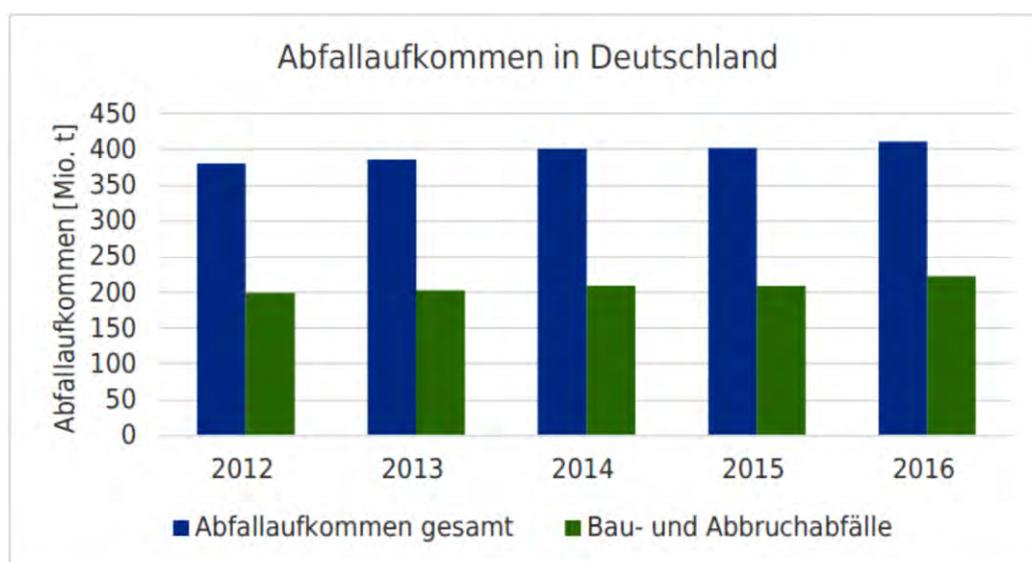


Abbildung 2: Abfallaufkommen in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt).

1.2 Zusammenarbeit der Projektbeteiligten

Die Zusammenarbeit der Projektbeteiligten kann unter Berücksichtigung aller wesentlichen Aspekte (regelmäßige Treffen, Informationsaustausch, Bearbeitung der Arbeitspakete) als effizient und zielgerichtet bezeichnet werden.

Forschungspartner:

Institut für Werkstoffe im Bauwesen, TU Darmstadt (WiB) - Antragsteller
AG Baukonstruktion und Fertigteiltbau, TU Kaiserslautern (MB_KL)

Industriepartner:

Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG Betonwerk (Röser)
Zuber Betonwerk GmbH & Co. KG (Zuber)
Südhessische Wertstoffrückgewinnungs-GmbH (SHW)

1.3 Projektplan

Exemplarisch wird ein ökologisches und leistungsfähiges Sandwichelement entwickelt und beforscht, das über eine Tragschicht aus Beton und eine Dämmschicht aus zementös mineralisiertem Schaum besteht. Das Bauteil genügt modernem energieeffizientem Bauen, besteht zu einem Großteil aus Recyclingmaterial und kann durch einen materialkonformen Aufbau sortenrein und vollständig wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden und ist zudem nicht brennbar. Die signifikante Minderung des Treibhauspotentials von zementgebundenen Baustoffen erfolgt zum einen durch eine gezielte und dauerhafte CO₂-Bindung in karbonatisierter rezyklierter Gesteinskörnung des Deckbetons. Zum anderen werden Techniken entwickelt, die es erlauben, die zementgebundene Dämmschicht an ihrem Lebensende vollständig in die Zementproduktion zurückzuführen. Substanziell gliedert sich das Projekt wie das angestrebte neuartige Beton-Sandwich-Bauteil in zwei Werkstoffe: Rezyklierten Beton und mineralisierter Schaum. Die jeweils relevanten Komponenten werden insbesondere in Bezug auf die CO₂ vermeidenden Maßnahmen einzeln für sich sowie als Ganzes sowohl technisch als auch bilanziell in Form zweier paralleler geschlossener Stoffkreisläufe („Closed-Loops“) betrachtet.



Abbildung 3: Schematische Darstellung des Lösungskonzeptes.

2 Mineralisierter Dämmschaum

Die dämmende Schicht des |2CO2|sandwich besteht wie die Deck- und Tragschicht aus zementgebundenem Material, nämlich aus sogenanntem mineralisiertem Schaum. Die Arbeitspakete des ersten Teilbereiches beziehen sich auf die Entwicklung dieses mineralisierten Dämmschaums.

2.1 Optimierung des Mischungsentwurfes des mineralisierten Schaums

Für die Optimierung des mineralisierten Dämmschaums werden zunächst unterschiedliche Bindemittelzusammensetzungen untersucht. Hierbei liegt der besondere Fokus darauf, keine dem Zement grundsätzlich artfremde Bestandteile hinzuzufügen, damit der mineralisierte Schaum nach Ablauf des Lebenszyklus im Sandwichelement in der Zementherstellung vollständig als Sekundärrohstoff wiederverwendet werden kann. Ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklungsarbeit stellt die Zusammensetzung der Bindemittelkomponenten des Dämmschaums dar. Exemplarisch sind an dieser Stelle drei unterschiedliche Zusammensetzungen des Bindemittels in Tabelle 1 dargestellt. Außerdem werden verschiedene Zielrohddichten erprobt. Alle Rezepturen weisen einen w/f-Wert von 0,33 auf.

Tabelle 1: Exemplarische Übersicht über ausgewählte Mischungszusammensetzungen

Material und Masse [kg/m ³]	R1	R2	R3
CEM I 52,5 R	78,0	42,8	42,5
CEM III/A 52,5 R	-	36,0	25,5
Silicastaub	6,8	6,8	6,8
Weißzement (Dyckerhoff)	-	-	10,2
Wasser	28,8	28,7	28,5
Fließmittel	0,6	0,3	0,3
Erhärtungsbeschleuniger	0,8	0,4	0,4
Schwindreduzierer	1,6	0,9	0,9
Stabilisierer	0,8	0,4	0,4
Wasserschaum	80,0	80,0	80,0
Rechnerische Schaumddichte	120,0	120,0	120,0

Die Rezepturen werden anhand der Rohddichte, Wärmeleitfähigkeit und Porosität beurteilt. Probekörper mit geringeren Zielrohddichten als 100 kg/m³ sind sehr weich und zerfielen in der Hand schon unter sehr leichtem Druck. Die Prüfung der Rohddichte und der Wärmeleitfähigkeit dieser Proben kann folglich nicht durchgeführt werden. Die dritte Mischungszusammensetzung (R3) mit einer Zielrohddichte von 100 kg/m³ zeigt in den Untersuchungen die geringste Rohddichte (103 kg/m³) bei der kleinsten Wärmeleitfähigkeit (0,047 W/mK). Trotz der geringen Dichte ist diese Probe sehr leicht zu verarbeiten. Diese Mischungszusammensetzung (gelb markiert in Abbildung 4) wird hinsichtlich der durchgeführten Untersuchungen am geeignetsten eingestuft.

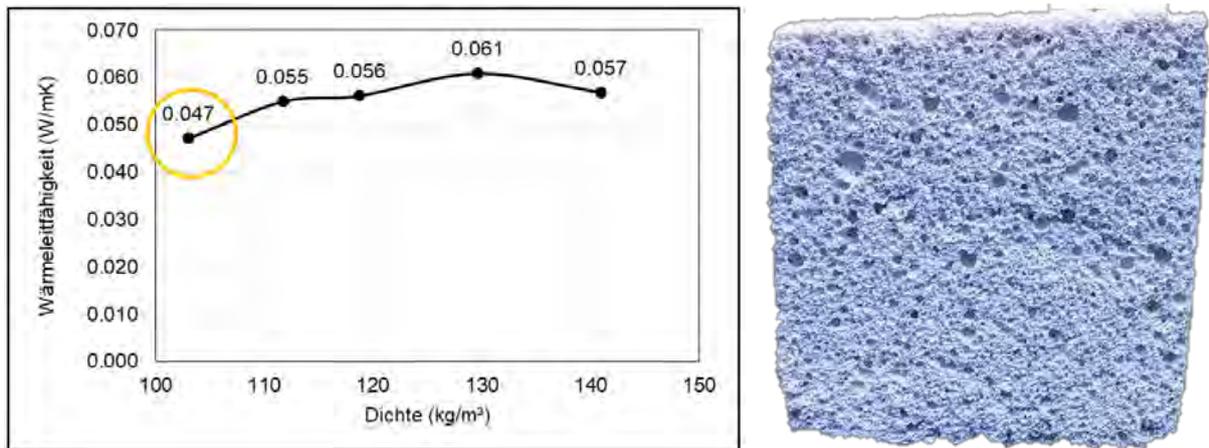


Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Aufnahme des mineralisierten Schaums (R3); rechts mit Zielrohddichte von 100 kg/m³.

Im Laufe des Projektes wird der mineralisierte Dämmschaum stetig weiter entwickelt insbesondere im Hinblick auf die Reduktion von Schwindprozessen beim Erhärten. Hierfür wurde unter anderem der Einsatz von Metakaolin als Zusatzstoff neben Portlandzement erprobt. Da das Material ein hohes Wasserbindevermögen besitzt, kann durch den Einbezug von Metakaolin erheblich die Stabilität des mineralisierten Dämmschaums sowie eine Reduktion von Schwindverformungen realisiert werden.

Die finale Zusammensetzung des mineralisierten Dämmschaums ist in Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Finale Mischungszusammensetzung mineralisierter Dämmschaum

Material	Rohdichte [kg/dm ³]	Gehalt [kg/m ³]	Volumen [dm ³ /m ³]	Zugabe
CEM I 52,5 R	3,10	71,70	23,13	
Centrilit NC II MC (MK)	1,45	11,80	8,14	
Wasser (W)	1,00	27,56	27,56	
Centrament Stabi 508 (ST)	1,01	2,41	2,39	nach W
Powerflow 3189 (FM)	1,06	0,42	0,39	nach ST
Trocurin (BE)	1,30	1,67	1,29	nach FM
Summe Zementleim	-	115,56	62,89	
Wasserschaum mit Centripor SK 155	0,05	47,35	937,11	

2.2 Herstellung des mineralisierten Dämmschaums

Eine qualitativ hochwertige Herstellung des Dämmschaums kann mit der Anlage in Abbildung 5 erreicht werden. Auf der rechten Seite im Bild sind der Leimmischer sowie ein Vorhaltebecken für die finale Leimmischung zu erkennen. In dem Vorhaltebecken wird der Zementleim ständig in Bewegung gehalten, bis er abgerufen wird. Auf der linken Seite im Bild ist der Schaumgenerator zu sehen. Der Schaum wird mithilfe von Schaumkonzentrat und Wasser hergestellt. Durch die fein abgestimmte Zugabe dieser Ausgangsstoffe im Schaumgenerator kann gezielt die Rohdichte des Wasserschaums eingestellt werden. Auf der Rückseite des Schaumgenerators (Abbildung 6, links) wird der Wasserschaum sowie

der Zementleim zusammengeführt und der mineralisierte Dämmschaum kann abgerufen werden. Der finale mineralisierte Schaum ist in Abbildung 6 (rechts) dargestellt.



Abbildung 5: Anlage zur Herstellung des mineralisierten Dämmschaums.



Abbildung 6: Herstellung des mineralisierten Schaums (Zufuhr von Zementleim und Schaum) (links), Mineralisierter Schaum (rechts).

2.3 Analyse der mechanischen Eigenschaften des mineralisierten Schaums

Die Analyse der mechanischen Eigenschaften des entwickelten mineralisierten Schaums ist in Hinblick auf den Herstellprozess sowie die Bemessung des Sandwichelementes im Endzustand notwendig, bei denen die Druck- und Schubtragfähigkeit der Schaumdämmung eine besondere Bedeutung erlangt.

Bei einer Fertigung der Wandelemente im Negativverfahren im Werk wirkt das Eigengewicht des Frischbetons der Tragschale auf den Mineralschaum, während der Verbund zwischen dem Verbindungsmittel und dem umgebenden Beton noch nicht vorhanden ist. Aus diesem Grund muss der Schaum im Herstellprozess eine planmäßige Stützwirkung ermöglichen. Zur mechanischen Beschreibung werden Druckversuche an dem Mineralschaum in Anlehnung an DIN EN 826 im Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern durchgeführt und ausgewertet. Der Versuchsaufbau für die Druckversuche und der exemplarische Last-Stauchungsverlauf sind in Abbildung 7 dargestellt. Bis zu einer Spannung von ca. 40 kPa ist ein lineares Last-Verformungsverhalten des Mineralschaums zu erkennen. Darüber ist das Materialverhalten durch ein sprödes Versagen einzelner Poren gekennzeichnet. Ab einer Druckspannung von ca. 80 kPa setzt ein Fließen des spröden Materials ein.

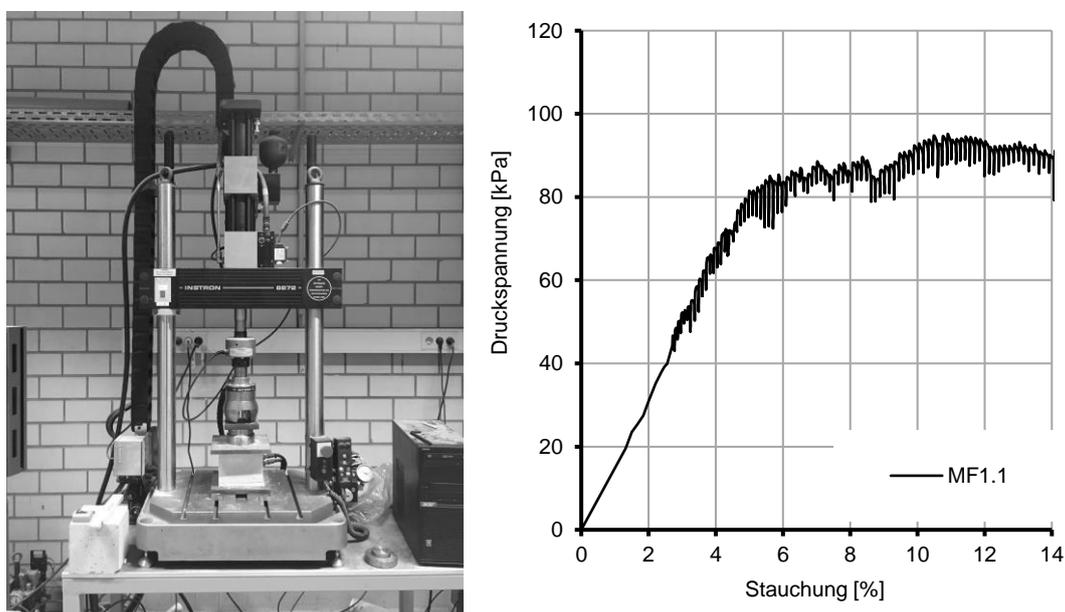


Abbildung 7: Links: Versuchsaufbau eines Druckversuches an ultraleichtem Mineralschaum in Anlehnung an DIN EN 826; Rechts: Exemplarischer Druckspannungs-Dehnungsverlauf des betrachteten Mineralschaums.

Als Mittelwert aus jeweils drei Versuchsergebnissen kann die Druckspannung bei 10 %-Stauchung zu $\sigma_{10, MF} = 90,9 \text{ kPa}$ und der Elastizitätsmodul zu $E_{c, MF} = 2.769 \text{ kPa}$ bestimmt werden.

Tabelle 3: Druckfestigkeit des Mineralschaums und Druckspannung bei 10 %-Stauchung

MF	Nr.	max. Spa. kPa	x kPa	v %	Spa. 10 % kPa	x kPa	v %
MF1	1	95,2			91,9		
	2	89,7	95,6	6,33	82,5	90,9	8,70
	3	101,8			98,2		

Tabelle 4: Elastizitätsmodul des Mineralschaums unter Druckbelastung

MF	Nr.	e ₁ %	s ₁ kPa	e ₂ %	s ₂ kPa	E kPa	Em kPa	v %
MF1	1	1,2	13,2	2,1	32,5	2144	2769	38,5
	2	1,0	12,6	1,6	36,6	4000		
	3	1,9	17,6	3,2	45,7	2162		

Weiterhin werden die Scherfestigkeit und das Schubmodul des Mineralschaums in Anlehnung an DIN EN 12090 ermittelt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Die so bestimmte Scherfestigkeit sowie das Schubmodul des Wärmedämmstoffs bilden die Basis für die statisch-konstruktive Vorbemessung des Sandwichelementes und bilden somit die Grundlage für die Arbeitspakete des dritten Teilbereiches (Sandwichkonstruktion).

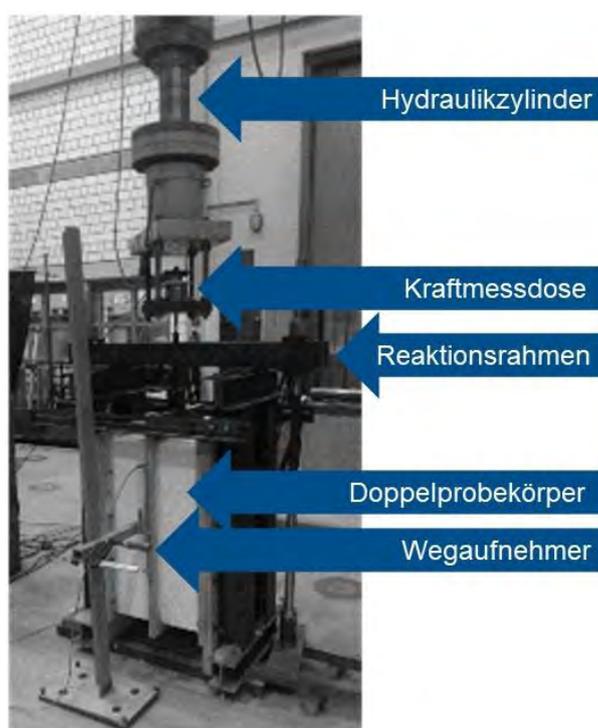


Abbildung 8: Versuchsaufbau für Scherversuche an Doppelprobekörpern in Anlehnung an DIN EN 12090.

Im Zuge der Scherversuche konnte eine mittlere Scherfestigkeit von 26,7 kPa und ein mittlerer Schermodul von 744 kPa gemessen werden.

2.4 Prozessentwicklung für das Recycling

Die Prozessentwicklung für das Recycling der mineralisierten Dämmschaum-Schicht wird von der Südhessischen Wertstoffrückgewinnungs-GmbH (SHW) durchgeführt. Das Unternehmen ist auf das Recycling von Baumaterialien spezialisiert. Der mineralisierte Schaum wird am Ende des Bauteillebenszyklus des Sandwich-Elementes von der Deck- und Tragschicht aus Recycling-Beton getrennt und fein aufgemahlen. Das Material wird im Anschluss als Rohstoff bei der Zementherstellung eingesetzt. Der Trennungsprozess wird exemplarisch für die Sandwichwand in Abbildung 9 links durchgeführt.



Abbildung 9: Sandwichwand.

Wie in Abbildung 9 rechts zu erkennen ist, wird das Sandwichelement durch Verbindungsanker stabilisiert. Diese jedoch behindern das Entfernen des mineralisierten Schaums. Der Schaumbeton besitzt eine sehr poröse Struktur und ist daher empfindlich gegenüber Erschütterungen und mechanischer Belastung. Eine Trennung mit hydraulischen Beißzangen, Spaltwerkzeugen oder Pressen ist daher nicht möglich.

Bei der SHW Messel werden verschiedene Trennmethode getestet (siehe Abbildung 10). Dabei sind vor allem die sortenreine Trennung sowie eine nahezu vollständige Entfernung des Schaumes ausschlaggebende Faktoren, um eine möglichst große Menge an mineralisiertem Schaumbeton für das Recycling zu erhalten.



Abbildung 10: Trennung.

Vor allem das manuelle Abtragen mittels einer Schaufel und das anschließende Aufsammeln von losen Schaumbetonstücken erzielen zufriedenstellende Ergebnisse. Jedoch ist

dieses Verfahren langwierig und benötigt den Einsatz von mehreren Arbeitern. Eine andere vielversprechende Methode ist das Absaugen der Schaummatrix mithilfe eines Industriesaugers. Durch die Geräteleistung wird der mineralisierte Schaum pulverisiert und kann dadurch mühelos eingesaugt werden. Das Material wird im Sauger aufgefangen und kann anschließend recycelt bzw. der Zementproduktion zugeführt werden. Bei der Trennung der Sandwichelemente ist es essentiell die beiden Betonschichten gegen die Destabilisierung, welche aus der Entfernung des mineralisierten Schaums resultiert, zu sichern.

2.5 Kalzinierungstests zur Analyse des mineralisierten Schaums

Um das Potential der Rückführung in den Stoffkreislauf verfahrenstechnisch zu untersuchen, werden Kalzinierungstests im Labor durchgeführt. Da der mineralisierte Schaum hauptsächlich aus Portlandzement besteht, wird ein Zementleim aus Portlandzement und Wasser mit einem w/z-Wert von 0,45 hergestellt. Der Zementstein wird nach 28 Tagen fein aufgemahlen und bezüglich seiner mineralogischen Zusammensetzung untersucht.

Tabelle 5 zeigt eine Gegenüberstellung der Zusammensetzung des hydratisierten Zementsteins verglichen mit konventionellem Rohmehl, welches für die Klinkerherstellung verwendet wird. Diese Analyse zeigt wesentliche Unterschiede in der Rohstoffzusammensetzung beider Materialien auf. Bei konventionellem Rohmehl ist die CaO-Quelle in erster Linie Calcit. Im Zementsteinmehl hingegen sind die wichtigsten CaO-Lieferanten Portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) und ein bedeutender Anteil an C-S-H. Im hydratisierten Zementstein werden Portlandit, Ettringit und AFm-Phasen als Hydratationsprodukte röntgendiffraktometrisch nachgewiesen. Belit (C_2S) und Ferrit (C_4AF) werden bei der Hydratation nicht vollständig verbraucht und verbleiben als nicht umgesetzte Klinkerphasen im Zementsteinrohmehl.

Tabelle 5: Mineralogische Zusammensetzung des gemahlene Schaumbetons und konventionellem Rohmehl für die Klinkerherstellung

Anteil [M.-%]	Belit (C_2S)	Ferrit (C_4AF)	Portlandit	Ettringit	Calcit	Quartz	Dolomit	Mullit	Sonst.
Hydrat. Zementstein	6,50	5,30	17,00	5,00	0,44				68,00
Konventionelles Rohmehl					62,00	5,20	5,00	1,20	29,60

Die Ergebnisse der thermogravimetrischen Analysen sind Abbildung 11 zu entnehmen. Die Ableitung der TG-Funktion (DTG-Kurve, hier nicht dargestellt) weist drei wesentliche Massenverlustprozesse auf:

- 1) bei ca. 100 °C bis 200 °C durch Freisetzung von locker gebundenem Wasser,
- 2) bei ca. 450 °C durch Portlanditzersetzung und
- 3) im Temperaturbereich von 600 °C bis 800 °C durch Entkarbonisierung von CaCO_3 .

In der Zementsteinprobe ist der Hauptmassenverlust auf die Dehydroxylierung von C-S-H (50 °C bis 600 °C), Aluminatphasen (50 °C bis 300 °C), Dehydroxylierung von Portlandit zu Kalk ab 440 °C bis 460 °C zurückzuführen. Portlandit wird bei 520 °C vollständig abgebaut.

Die thermische Zersetzung des Calcits beginnt bei ca. 680 °C. Karbonisierung und Entkarbonisierung des bei der letzten Reaktion gebildeten Kalks wurden nicht beobachtet. Im konventionellen Rohmehl steht der endotherme Hauptpeak um 850 °C im Zusammenhang mit dem Karbonatabbau.

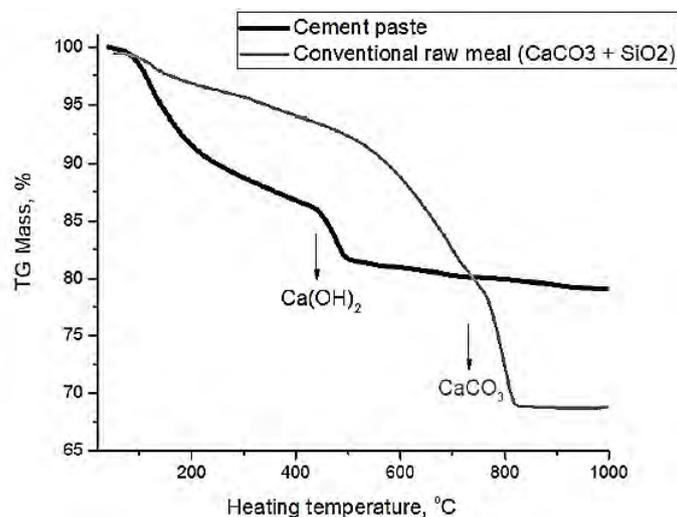


Abbildung 11: Thermogravimetrische Analyse des hydratisierten Zementsteins und dem konventionellen Rohmehl.

In Abbildung 12 sind die DSC-Kurven für die Erwärmung (900 °C bis 1450 °C) von konventionellem Rohmehl und hydratisiertem Zementstein dargestellt. Über 900 °C treten mehrere kleine endo- und exotherme Signale auf. Oberhalb der Kalzinierungstemperaturen kann ein breiter endothermer Peak im Bereich von 1100 °C bis 1170 °C auf den polymorphen Übergang der Hauptbelitkomponente zurückgeführt werden. Endotherme Schmelzsignale sind deutlich zwischen 1250 °C und 1350 °C zu beobachten, wobei die Hauptschmelzspitzen in den konventionellen und Zementsteinproben bei 1328 °C bzw. 1303 °C liegen.

Die Alit-Kristallisation ist nicht gut als definierter exothermer Peak erkennbar, da die Reaktion von Kalk und Belit zu Alit über einen weiten Temperaturbereich verteilt ist und hauptsächlich durch die Diffusion von Ca^{2+} durch die Schmelzphase gesteuert wird [7]. Beim Abkühlen zeigen die DSC-Kurven mehrere auffällige exotherme Peaks, die mit der Kristallisation von C_3A und C_4AF aus der Schmelze und polymorphen Übergängen von Belit in Verbindung gebracht werden können. Der Shift zu niedrigeren Temperaturen der Schmelzendothemerme und der Erstarrungs- und polymorphen Übergangsexothermen deutet auf eine verbesserte Brennbarkeit des Zementsteinrohmehls hin. Diese Ergebnisse implizieren folglich, dass eine Zugabe von hydratisierten Zementrückständen zu einem Klinkerrohmehl die Klinkerphasenbildung begünstigt.

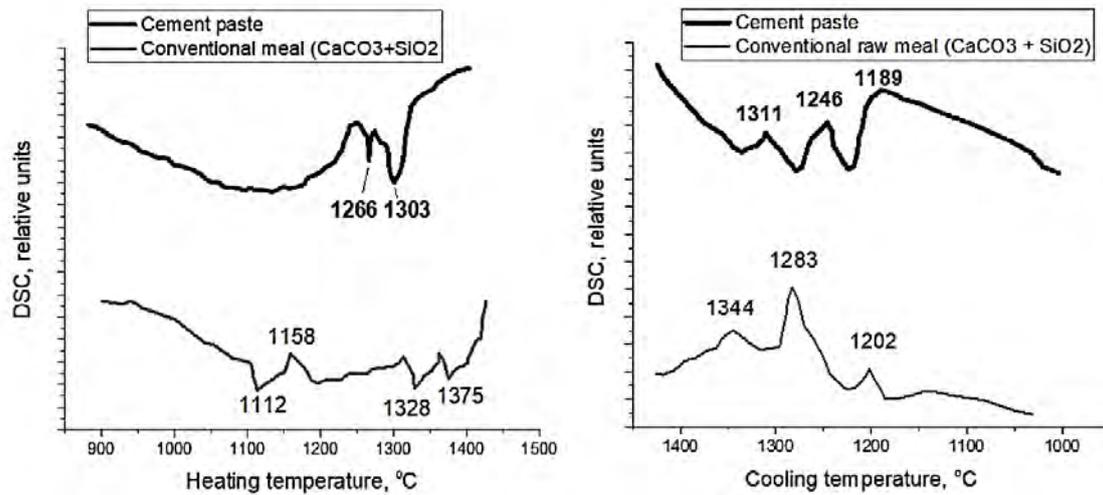


Abbildung 12: DSC-Analyse während des Erhitzens (links) und Abkühlens (rechts) von Zementhydrat und konventionellem Rohmehl.

2.6 Chemische und mikrostrukturelle Analyse

Das hergestellte Rohmehl aus dem hydratisierten Zementleim wird für weitere Versuche in eine zylindrische Form mit 30 mm Durchmesser und 10 mm Höhe gepresst. Die Pellets werden in einem statischen Luft-Hochtemperaturofen mit einer Aufheizrate von 10 K/min und einer Verweilzeit von 10 min bei 1450 °C gebrannt, gefolgt von einer kontrollierten Abkühlrate von 10 K/min bis Raumtemperatur. Die durch das Brennen bei 1450 °C synthetisch erzeugte Klinkerprobe wird röntgendiffraktometrisch auf ihre mineralogische Zusammensetzung untersucht. Die Ergebnisse zeigen eindeutig die für Portlandzementklinker typischen Phasen (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF). Im Vergleich zu kommerziellen Zementen sind zusätzlich weitere Calciumsulfatphasen aufgrund eines leicht höheren Sulfatgehalt erkennbar. Solche Phasen werden das bei der Herstellung von Zement erst während des Mahlprozesses zur späteren Erstarrungsregulierung eingebracht.

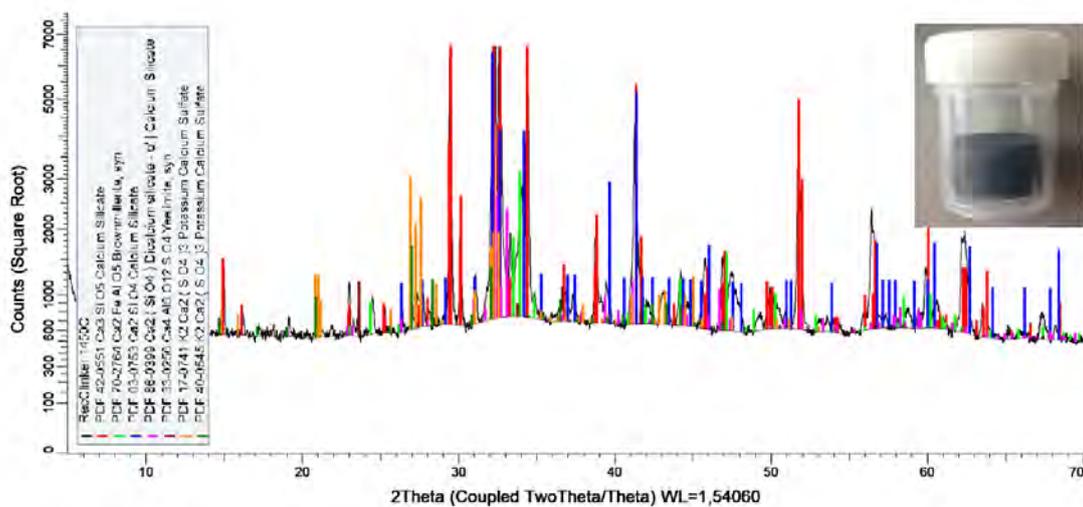


Abbildung 13: Qualitative Röntgenbeugungsanalyse für die durch Brennen bei 1450 °C erhaltene synthetische Klinkerprobe (oben rechts: ungemahlener Klinker).

Im Vergleich zum herkömmlichen Rohmehl enthält der bei 1450 °C gebrannte Zementstein deutlich mehr Belit, was zum Teil auf ein niedrigeres CaO/SiO₂-Verhältnis und zum Teil auf die thermodynamische Stabilisierung von Belit durch Einarbeitung von Sulfur zurückzuführen ist [8].

In der Produktionspraxis ist es derzeit zwar noch unwahrscheinlich, dass hydratisiertes Zementsteinmehl als einziger oder hauptsächlicher Bestandteil von Klinkerrohmehl verwendet wird, aber die vorliegenden Ergebnisse weisen auf eine positive Wirkung von hydratisiertem Zementstein auf den Klinkerprozess hin. Zusammenfassend werden folgende Aspekte herausgearbeitet:

Die Schmelz- und Klinkerphasenbildung im hydratisierten Zementleim erfolgt schneller, was auf einen positiven Beitrag der Zementhydrate zur Brennbarkeit des Rohmehls hinweist. Die Reaktionen unterhalb der typischen Zementklinkertemperaturen werden durch (1) die innige Vermischung von Kalk-, Silikat- und Aluminatkomponenten im hydratisierten Zement und (2) durch den erhöhten Sulfatgehalt, der als Flussmittel und Belitmineralisator wirkt, verstärkt. Das Vorhandensein von CaO in nicht-karbonatisierter Form im ausgehärteten Zementstein ermöglicht eine direkte Reduktion der Calcinierungs-CO₂-Emissionen.

3 Recycling-Beton

Die Arbeitspakete des zweiten Teilbereiches beziehen sich auf die Entwicklung des Recycling-Betons. Dabei werden zunächst Betonproben zerkleinert und aufbereitet sowie im Anschluss bezüglich ihrer Eigenschaften umfassend analysiert. Des Weiteren liegt der Fokus darauf, geeignete Auslagerungstechniken für die Speicherung von CO₂ in den recycelten Betonproben zu entwickeln. Anhand der gewonnenen Erkenntnisse werden Mischungsentwürfe für den Recycling-Beton entwickelt. Die Herstellung des Recycling-Betons sowie die Analyse der karbonatisierten, recycelten Gesteinskörnung im Recycling-Beton schließen sich daran an. Auch die Analysen der mechanischen Eigenschaften sowie der Dauerhaftigkeit des Recycling-Betons ist im Arbeitspaket Recycling-Beton enthalten.

3.1 Herstellung, Zerkleinerung und Aufbereitung der Betonproben

Für die Herstellung und Analyse der Recycling-Gesteinskörnung wird Altbeton verschiedenen Ursprungs verwendet.

Zum einen werden Betonproben der Firma Zuber Betonwerk GmbH & Co. KG mit Sitz in Crailsheim zur Verfügung gestellt. Die Betonproben entstammen der Produktion und sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 exemplarisch dargestellt. Bei den Bauteilen handelt es sich um unterschiedliche Mischungen aus reinem Portlandzement und Kalksteinmehl sowie verschiedenen Korngrößen der Gesteinskörnung. Der Vorteil besteht darin, dass die Mischungsentwürfe der einzelnen Betone bekannt sind. So können die Ergebnisse der Analysen konkret auf die Bestandteile des Betons zurückgeführt werden.



Abbildung 14: Betonproben (1/2).

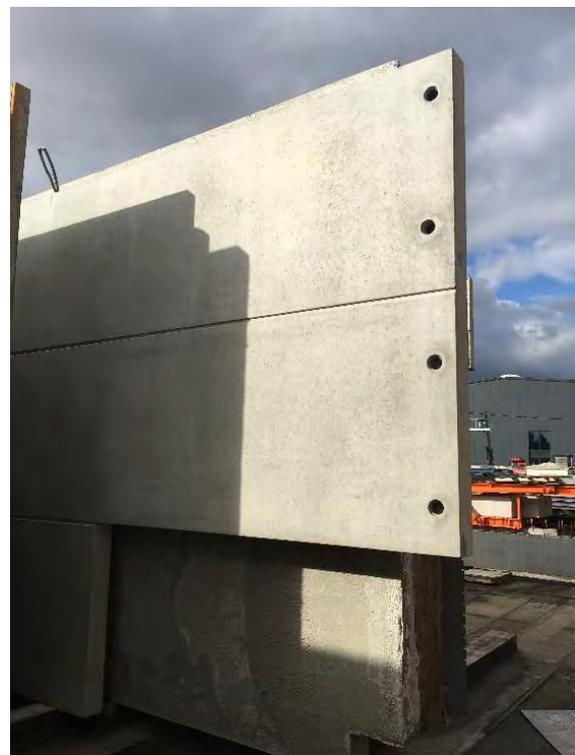


Abbildung 15: Betonproben (2/2).

Zum anderen wird rezyklierte Gesteinskörnung aus einer abgebrochenen Brückenkappe gewonnen (Abbildung 16). Die Brücke befindet sich in der Gemarkung Lämmerspiel im Landkreis Offenbach südöstlich von Frankfurt am Main. Das Brückenbauwerk überführt die Kreisstraße K191, von Obertshausen kommend in Richtung Lämmerspiel, über die Bundesstraße B448. Das Bauwerk wurde im Jahre 1977 als 2-stegige Spannbetonplattenbrücke als Durchlaufträger über zwei Felder hergestellt. Die Gesamtbreite beträgt 14,00 m und die Gesamtlänge 50,94 m. Die Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung beschränkt sich auf die Brückenkappen. Diese bestehen aus einem Stahlbeton C 25/30-LP mit hohem Frost- und Tausalz widerstand der Expositionsclassen XC4/XD3/XF4/WA, Mindestluftporengehalt nach ZTV-ING 3-1, Tab. 3.1.1, max. $w/z = 0,50$.



Abbildung 16: Abbruch der Brückenkappe.

Der Beton, die Bewehrung und die Querfugen der Kappen wurden erschütterungsarm mit Kleingerät (Minibagger) abgebrochen. Erforderliche Trennschnitte zum schonenden Abbruch der Kappe waren ein Längsschnitt ca. 5 cm von der Außenkante des Kragarmes in Richtung Bauwerk mit einer Schnitttiefe bis ca. 2 cm oberhalb des Kragarmes, Querschnitte im Abstand von ca. 2 m und Horizontalschnitte im Gesims in Höhe der Oberkante der Kragplatte. Das Abbruchgut wurde im Anschluss an die Südhessische Wertstoffrückgewinnungs GmbH in Messel geliefert. Eine Separierung des Betons ist nicht notwendig. Nachteil an der Verwendung eines solchen Betons für die Laboruntersuchungen ist das Fehlen des originalen Mischungsentwurfs, was die Auswertung der Analysen erschwert. Jedoch kann durch die Verwendung eines über 40 Jahre alten Betons das reale Verhalten einer RC-Gesteinskörnung betrachtet werden.

Die Kombination aus im Werk hergestellten Betonbauteilen und realem Abbruch ermöglicht eine umfangreiche Analyse unter Betrachtung aller wesentlichen Aspekte.

Die Zerkleinerung des Altbetons aus Betonwerk und Brücke erfolgt analog bei der Südhessische Wertstoffrückgewinnungs-GmbH (SHW) mit Sitz in Messel mit einer stationären

Brecheranlage mit Lesehaus und zwei nachgeschalteten Siebanlagen. Dies garantiert einen hohen Mengendurchsatz sowie eine konstante Qualität der Produkte (Abbildung 17).



Abbildung 17: Anlage SHW Messel.

Das Material wird zwischen einer schwingenden Brechplatte und einer feststehenden Druckplatte in einem sich verengenden Spalt zermahlen. Mithilfe der Frequenz der Brechplatte und der Einstellung des Brechspaltes lässt sich die Korngröße variieren. Der zerkleinerte Bauschutt wird unter dem Brecher von einem Transportband aufgenommen. Manuelle und maschinelle Sortierbereiche ermöglichen eine fremdstofffreie Gesteinskörnung. Durch Magnetabscheider werden Eisenmetalle aussortiert.

Die nachgeschaltete Siebanlage ermöglicht eine Sortierung der Gesteinskörnung in die Korngruppen 0/2, 2/8 und 8/16 (Abbildung 18).



Abbildung 18: Korngruppen 0/2 (links), 2/8 (Mitte) und 8/16 (rechts).

3.2 Analyse der Ausgangsstoffe

Im Anschluss an das Brechen wird die RC-Gesteinskörnung an die TU Darmstadt transportiert. Die aufbereiteten Betonproben dienen für den zu entwickelnden Recycling-Beton als Gesteinskörnung und werden bezüglich ihrer Eigenschaften mikrostrukturell analysiert.

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung wird die Siebanalyse DIN EN 933-1 mithilfe eines Siebturms durchgeführt. Die Prüfung besteht im Aufteilen und Trennen der Körnung in unterschiedliche Klassen (Abbildung 19). Die kumulativ erhaltenen Anteile werden graphisch in einer Sieblinie dargestellt.

Zu Beginn wird die Probe bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend die Gesamt-Trockenmasse (M_1) gewogen. Das Material ist in den Siebturm zu schütten. Der Siebturm wird mithilfe der Vibrations-siebmaschine „AS 200 basic“ der Firma Retsch gerüttelt. Insgesamt wird eine Siebzeit von 15 Minuten angesetzt, in der über eine Dauer von 10 Minuten bei 40 % der Amplitude und 5 Minuten bei 60 % der Amplitude gesiebt wird. Anschließend sind die Analysensiebe nacheinander, mit der größten Öffnungsweite beginnend, abzunehmen und von Hand nachzusieben. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass kein Probenmaterial verloren geht und der zusätzliche Durchgang in das nächst kleinere Sieb überführt wird.

Der Rückstand R_i , der auf den Sieben der verschiedenen Maschenweiten verbleibt, ist zu wägen und zu notieren. Anhand dieser Ergebnisse können die prozentualen Rückstände sowie Durchgänge berechnet werden.



Abbildung 19: Siebturm.

Die Menge des anhaftenden Zements an der RC-Gesteinskörnung beeinflusst die Eigenschaften dieser erheblich. Der Zementgehalt hängt dabei von mehreren Faktoren ab, wie z. B. von den Verarbeitungsverfahren, der ursprünglichen Betonmischung und der Partikelgröße. Das Hauptproblem besteht darin, die Gesamtmenge des beigefügten Zement-

steins zu bestimmen. Bislang wurde noch keine Standardmethode für diese Messung definiert. Eine gängige Methode zur Bestimmung des Zement-Gehalts ist die Behandlung mit einer Lösung aus Salzsäure (Abbildung 20). Diese Methode konzentriert sich auf die Säureauflösung des Zementsteins als Mittel zur Trennung der ursprünglichen Gesteinskörnung vom alten anhaftenden Zement. Auch im vorliegenden Fall wird der Zementgehalt in den einzelnen Fraktionen der RC-Gesteinskörnung durch die Lagerung in Salzsäure bestimmt. Für den Versuch werden Stücke, der im Ofen bei 105 °C getrockneten Proben in einer Glasschale platziert. Anschließend wird mithilfe einer Pipette eine 37 %ige-Salzsäure über die Gesteinskörnung gegeben. Um ein Ausgasen der Säure zu verhindern, sind die Schalen abzudecken.



Abbildung 20: Lagerung in Salzsäure.

Wird nun das Gewicht der übriggebliebenen Gesteinskörnung gemessen und mit der Probenmasse zu Beginn des Versuchs verglichen, kann eine Aussage über den Anteil an anhaftendem Zementstein für die jeweiligen Kornfraktionen getroffen werden.

Für den Brückenbeton sind die Anteile jeweils für jede Korngruppe in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Massenverlust durch Säurelagerung (Brückenkappe)

Probe	m_{vor} [g]	m_{nach} [g]	Massenverlust [g]	Massenverlust [%]
0/2	8,39	2,98	5,41	64,48
2/8	17,65	8,60	9,05	51,27
8/16	25,67	17,83	7,84	30,54

Die Menge des anhaftenden Zementgehalts beträgt im Mittel ca. 30 % - 55 %. Dies bestätigen auch Nagataki et al. (2004) und Gokce et al. (2004), die ebenfalls den Zementgehalt mittels Salzsäure-Auflösung bestimmt haben. Der Zementstein reichert sich verstärkt im Brechsand an. Je feiner die Kornfraktion, umso höher der anhaftende Anteil an altem Zementstein.

Des Weiteren bewirkt die Feinheit der Gesteinskörnung einen Anstieg der Wasserabsorption. Dies wird anhand der Wasseraufnahme nach 10 Minuten gemäß DAfStb deutlich. Zunächst wird die Gesteinskörnung bei 105 °C bis zu Massenkonstanz getrocknet und an-

schließlich in einem Exsikkator auf Raumtemperatur (20 °C) abgekühlt, um die Trockenmasse ($m_{g,od}$) zu bestimmen. Daraufhin lagert die Probe für 10 Minuten unter Wasser und wird mit einem schwach feuchten Baumwolltuch abgetrocknet, bis die Oberfläche mattfeucht erscheint. Im Anschluss wird wiederum die Masse der Probe (m_f) bestimmt. Die Wasseraufnahme (W) resultiert dabei aus der Gleichung

$$W = \frac{m_f - m_{g,od}}{m_{g,od}} \cdot 100$$

Für die Gesteinskörnung, welche aus der alten Brückenkappe gewonnen wurde, ergibt die Untersuchung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten sowie die Bestimmung der Rohdichte nach DIN 1097-6 folgenden Ergebnisse.

Tabelle 7: Wasseranspruch und Rohdichte (Brückenkappe)

Probe	$m_{g,od}$ [g]	m_f [g]	W [%]	ρ_{rd} [kg/dm³]
0/2	627,23	659,54	5,15	2,66
2/8	752,62	772,38	2,63	2,76
8/16	753,65	764,56	1,45	2,78

Die feineren Fraktionen, welche eine erhöhte Menge an anhaftendem Zementstein aufweisen besitzen demnach auch eine erhöhte Porosität. Darüber hinaus ist festzuhalten, je feiner die Gesteinskörnung, desto höher die Wasseradsorption dieser Kornfraktion.

Weitere Aussagen über die Porosität und die Porengrößenverteilung lassen sich mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) treffen. Das MIP (mercury intrusion porosimeter) basiert auf dem Prinzip der druckabhängigen Quecksilberintrusion.

Für die Untersuchung, in Anlehnung an die Vorgehensweise in DIN 66133, werden Stücke aus der RC-Gesteinskörnung verwendet. Diese sind zunächst bei 105 °C im Ofen bis zur Massenkonstanz zu trocknen.

Die Druckprüfung wird in zwei Teilen, mit dem Niederdruckgerät „Pascal 140“ und dem Hochdruckgerät „Pascal 440“ von Porotec, durchgeführt (Abbildung 21). Dabei werden Porengrößen von 1,8 nm bis 300 µm erfasst. Mit Hilfe des „Pascal 140“ wird die Probe in einem Dilatometer bei einem max. Druck von 140 MPa für die Porosimetrie vorbereitet. Die RC-Gesteinskörnung wird hierbei entgast und mit Quecksilber beschichtet. Zudem wird die Niederdruckporosimetrie durchgeführt, welche sehr große Poren und Partikel misst. Nach der Niederdruckmessung wird das Dilatometer in das Hochdruckgerät überführt, welches die Porosimetrie bei max. 400 MPa ausführt. Mithilfe dieses hohen Drucks werden auch sehr kleine Poren detektiert. Die Oberflächenspannung des Quecksilbers liegt bei 0,48 N/m bei einer Prüftemperatur von 25,4 °C. Für die Versuchsreihe wird ein Kon-

taktwinkel von 125° zwischen dem Quecksilber und der Porenwand definiert. Dieser Winkel wird durch die Zusammensetzung des Zements und der Gesteinskörnung, der Charakteristik der Poren und dem verwendeten Quecksilber beeinflusst [9].



Abbildung 21: Pascal 140 & Pascal 440.

Der Vergleich zwischen der RC-Gesteinskörnung der Korngruppen 4/8 und 8/16 des Brückenbetons bestätigt die Aussagen, welche durch die vorangegangenen Versuche getroffen wurden (Abbildung 22).

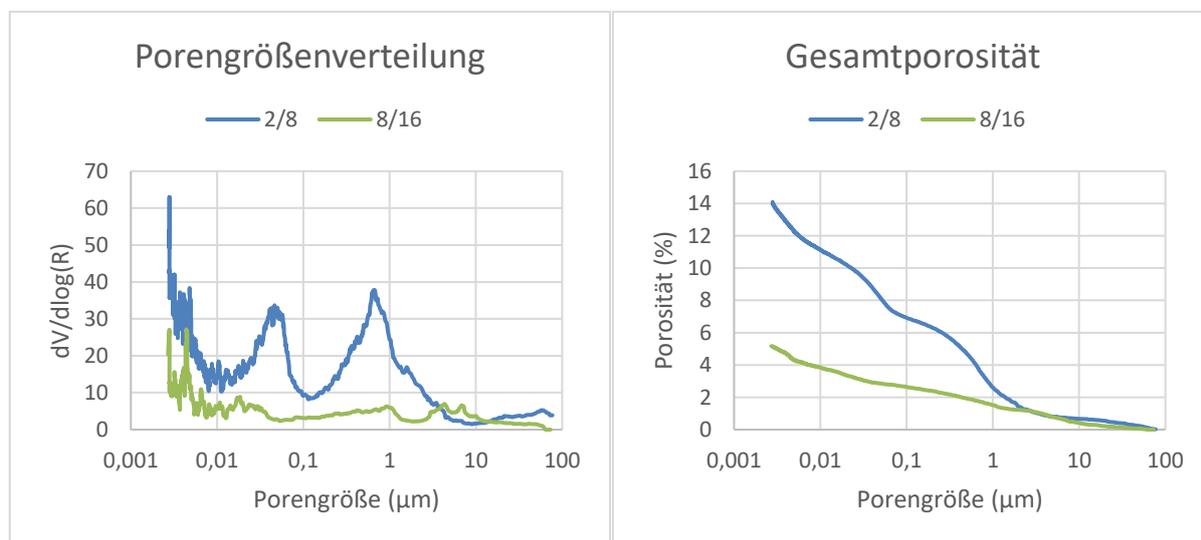


Abbildung 22: MIP für RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.

Die Porosität der RC-Gesteinskörnung wird durch die Zusammensetzung beeinflusst. Purer Zementstein hat eine Porosität von 50 %. Dieser Wert wird durch die Zugabe von dichtem Zuschlag (z. B. $\Phi_{\text{Granit}} = 0,2 - 1,5 \%$) reduziert. Normalbeton hat eine Gesamtporosität von

ca. 10 - 15 %. Der erhöhte Anteil an anhaftendem Zementstein der Korngruppe 2/8 gegenüber der Fraktion 8/16 spiegelt sich in der Gesamtporosität wieder. Während die RC-Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von 16 mm eine Porosität von ca. 5,2 % aufweist, besitzt die recycelte Gesteinskörnung der Größe 2/8 eine Gesamtporosität von 14,1 %. Vor allem der Anteil an Kapillarporen ist bei der feineren Kornfraktion deutlich ausgeprägt. Kapillarporen bilden sich, wenn Wasser, das nicht für die Zementhydratation benötigt wird, in den Zwickelbereichen der hydratisierten Zementpartikel zurückbleibt. Die ca. 10 nm bis 100 µm großen Poren ermöglichen die kapillare Aufnahme von Wasser. Sie beeinflussen somit die Kapillarität, die Permeabilität, die Festigkeiten und das Schwinden des zementgebundenen Materials. Diese erhöhte Wasseradsorption war bereits bei der Wasseraufnahme nach 10 Minuten zu erkennen.

3.3 Entwicklung geeigneter Auslagerungstechniken

Zur Herstellung des Recycling-Betons für das |2CO₂|sandwich soll rezyklierte Gesteinskörnung verwendet werden, welche zuvor in einem neuen Verfahren ausgelagert wird, um erhebliche CO₂-Mengen durch sog. Karbonatisierung gezielt zu binden. Auf diese Weise kann der Anteil des CO₂-Austoßes bei der Zementherstellung, der durch die Entsäuerung des Kalksteins verursacht wird, vollständig ausgeglichen werden. Dies erfolgt am besten direkt an den Produktionsstandorten der Elemente. Hier kann ausgestoßenes CO₂ - etwa aus der oft üblichen Wärmebehandlung von Fertigteilen - in die geeignet exponierte Recycling-Gesteinskörnung eingelagert werden. So wird aktiv und lokal zur Verringerung des Treibhauspotentials beigetragen.

Die für den RC-Beton zu verwendende RC-Gesteinskörnung besteht wie festgestellt zu 30 % bis 65 % aus Zementstein. Dieser ist, da er meist aus dem Inneren abgebrochener Betonbauteile stammt, nicht oder zumindest nicht vollständig karbonatisiert und kann weiterhin CO₂ aufnehmen (siehe nachfolgende vereinfachte Carbonatisierungsgleichung).



Es handelt sich dabei aufgrund der CO₂-reichen Atmosphäre um einen ständig stattfindenden Prozess.

Der Phenolphthaleintest nach DIN EN 12390-10 zeigt das Potential der nachträglichen Karbonatisierung. Dabei wird die Phenolphthaleinlösung auf die frische Betonbruchfläche gesprüht. Unkarbonatisierte Bereiche (pH > 12,6) färben sich kräftig violett, karbonatisierte Bereiche (pH < 9) bleiben dagegen farblos.

Auch nach über 40 Jahren ist der Beton der Brückenkappe nicht vollständig karbonatisiert. Die RC-Gesteinskörnung, welche mithilfe einer Brecheranlage hergestellt wurde, verfärbt sich stark violett, was einem pH-Wert > 12,6 entspricht (Abbildung 23).



Abbildung 23: Phenolphthaleintest der frisch gebrochenen RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.

Im vorliegenden Projekt wurde der Karbonatisierungsfortschritt neben dem Phenolphthaleintest auch mittels TGA überwacht.

Bei der thermogravimetrischen Analyse (TGA) kann die Massenänderung eines Stoffs in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit gemessen werden. Dazu wird eine Probe in einem Ofen erhitzt, während ein Schreiber das Gewicht und die Temperatur aufnimmt. Die Heizrate wird in Kelvin pro Minute gezählt und kann entweder konstant steigend, stufenweise isotherm oder vollständig isotherm sein. Die erste zeitliche Ableitung der thermogravimetrischen Kurve hilft, die verschiedenen Reaktionsprozesse getrennt voneinander zu betrachten und die Start- und Endtemperatur der einzelnen Reaktionen zu identifizieren.

Die TGA von Zementsteinproben ergibt unterschiedliche Temperaturbereiche, in denen die verschiedenen Bestandteile zersetzt werden. Im Bereich unter 105 °C, also noch während der Ofentrocknung, entweicht das Kapillarwasser. Ab 100 °C bis etwa 600 °C entweicht dann das chemisch gebundene Wasser. Das Calciumhydroxid zersetzt sich in einem Temperaturbereich von 400 °C bis 500 °C und das Calciumcarbonat zwischen 600 °C und 800 °C. Die Massenänderung des Calciumhydroxids und des Calciumcarbonats können dabei relativ zuverlässig isoliert von anderen Prozessen bestimmt werden, da sie gesondert von der Massenänderung der anderen Phasen auftreten [10].

Mittels der thermogravimetrischen Ergebnisse und der Molmassen der einzelnen Stoffe lässt sich auch der Anteil des Calciumhydroxids und Calciumcarbonats an der gesamten Zementsteinmasse berechnen. Calciumhydroxid gibt bei seiner Zersetzung Wasser ab und wird zu Calciumoxid. Calciumcarbonat wird ebenfalls zu Calciumoxid, gibt aber bei seiner Zersetzung Kohlenstoffdioxid ab.

Die Molmassen von Calciumhydroxid, Calciumcarbonat, Kohlenstoffdioxid und Wasser sind jeweils 74, 100, 44 und 18 Gramm pro Mol. Der Massenanteil von Calciumhydroxid bzw. Calciumcarbonat an der Gesamtmasse kann mithilfe folgender Gleichung berechnet werden

$$m = \Delta m \cdot \frac{M_1}{M_2}$$

Wobei:

- m Massenanteil des Stoffs an der Gesamtmasse [%]
 Δm Massenänderung gemessen in TGA [%]
 M_1 Molmasse des zersetzten Stoffes [*g/mol*]
 M_2 Molmasse der flüchtigen Komponente [*g/mol*]

Im hier zu entwickelnden Beton soll in die Gesteinskörnung durch gezielte und definierte Exposition ein Maximum an CO₂ durch beschleunigte Karbonatisierung der anhaftenden Zementreste eingelagert werden. Bestenfalls ist der Betonschutt gebrochen an der Luft zu lagern, um ihm die Möglichkeit zu geben möglichst viel CO₂ aufzunehmen. Dieses Ansinnen ist jedoch aufgrund des Platzbedarfs und der an der Luft immer noch sehr langsam ablaufenden Karbonatisierungsreaktion wirtschaftlich nicht attraktiv. Besteht jedoch eine wirtschaftlich und bilanziell sinnvolle Anwendung, wie sie das |2CO2|sandwich darstellt, hat die CO₂-Sequestrierung in RC-Beton großes Potential.

Hierfür wurden Versuche in einem Klimaschrank ICH C mit Kompressorkühlung, Feuchteregulierung und CO₂-Begasung der Firma Memmert durchgeführt. Die Klimakammer ermöglicht einen Einstelltemperaturbereich von +10 °C bis +50 °C, einen Einstellbereich der Feuchte von 10 %RH bis 80 %RH und eine Einspeisung von CO₂ von 0 % bis 20 %. Dadurch ist es möglich, Entwicklungen unter gewissen Umgebungsbedingungen beschleunigt zu betrachten.

In der Klimakammer ICH H werden unterschiedliche kombinierte Umgebungsbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit (RH), CO₂-Einspeisung) eingestellt. Durch die Lagerung der RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer wird die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung simuliert und zusätzlich durch die erhöhte CO₂-Konzentration/CO₂-Einspeisung beschleunigt, um anschließend mittels der TGA eine Aussage über den Anteil der chemischen Bindung an CO₂ treffen zu können. Die vorliegenden Proben der RC-Gesteinskörnung aus dem Brückenabbruch werden unter folgenden Bedingungen (konstante Parameter) in der Klimakammer gelagert:

- Temperatur: 20 °C
- CO₂-Einspeisung: 10 %

Die Analyse der eingespeicherten CO₂-Menge in der RC-Gesteinskörnung wird durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt. Das herkömmliche Vorgehen besteht darin, den Zementstein von der Gesteinskörnung abzukratzen und zu mahlen. Anschließend wird dieser mittels TGA untersucht. Das Problem an dieser Methode ist jedoch, dass das Abschaben des Zementsteins lediglich oberflächlich möglich ist. Dies führt dazu, dass nur die obere Zementschicht, welche ohnehin bereits karbonatisiert ist betrachtet wird. Es kann somit keine Aussage über die Karbonatisierungstiefe getroffen werden.

Die hier verwendete Methode wählt einen anderen Ansatz, um die Menge an CO₂ welche in der RC-Gesteinskörnung eingespeichert wurde zu bestimmen. Die maximale Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton stellt sich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 bis 80 Prozent ein. Diese Werte repräsentieren mitteleuropäische Bedingungen. Die Randbedingungen der TGA werden variiert, um den daraus folgenden Einfluss auf das Karbonatisierungspotential zu diskutieren. Die Proben werden getrennt unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % und 75 % (65 %RH, 75 %RH) gelagert.

Für die TGA werden die Proben der RC-Gesteinskörnung nach der Lagerung in der Klimakammer mittels einer Kombination aus Kugel- und Schlagmühle zerkleinert und anschließend mit einem Mörser pulverisiert. Aus den Ergebnissen der TGA wird der Anteil an Calciumhydroxid und Calciumcarbonat der Proben in der Einheit Gramm pro 100 Gramm einer Probe berechnet. Die TGA wird für jeweils vier Proben (65 %RH, 75 %RH) vor der Lagerung, nach vier Wochen und nach acht Wochen Lagerung in der Klimakammer ICH H durchgeführt.

Der Vorteil an der Methode ist, dass die Gesteinskörnung als Ganzes betrachtet wird. So ist es möglich den Fortschritt der Karbonatisierung in die Tiefe des Gesteinskorns anhand der ansteigenden Menge an CO₂ zu beobachten. Die Verunreinigungen, welche aus der ursprünglichen Gesteinskörnung resultieren sind für die einzelnen Untersuchungen konstant und können anschließend herausgerechnet werden.

In Tabelle 8 ist die berechnete Masse an Calciumhydroxid und Calciumcarbonat für jeweils vier Proben vor der Lagerung, nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen und nach einer Lagerungsdauer von acht Wochen unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % dargestellt und anschließend erläutert.

Tabelle 8: Ca(OH)₂- und CaCO₃-Gehalt, 65%RH, Lagerungsdauer null, vier und acht Wochen

Probe Lagerungsdauer in Wochen	Ca(OH) ₂ [g/100 g Probe]			CaCO ₃ [g/100 g Probe]		
	0	4	8	0	4	8
65-1	1,10	0,70	0,78	1,22	5,26	1,89
65-2	0,92	0,69	0,95	1,37	5,30	2,56
65-3	1,14	0,57	0,69	1,31	4,06	2,00
65-4	0,92	0,61	0,69	1,04	5,67	2,75

Es fällt auf, dass die Massenzunahme von Calciumcarbonat nach einer Lagerung von vier Wochen deutlich höher ist als die Massenzunahme von Calciumcarbonat nach acht Wochen. Zum Vergleich sind in Tabelle 6 die diese Werte für eine relative Luftfeuchtigkeit bei 75 % dargestellt.

Tabelle 9: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - und CaCO_3 -Gehalt, 75 %RH, Lagerungsdauer null, vier und acht Wochen

Probe	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ [g/100 g Probe]			CaCO_3 [g/100 g Probe]		
	0	4	8	0	4	8
Lagerungsdauer in Wochen						
75-1	1,10	0,57	0,66	1,22	1,95	3,43
75-2	0,92	0,64	0,74	1,37	2,79	2,82
75-3	1,14	0,61	0,61	1,31	2,02	2,89
75-4	0,92	0,35	0,53	1,04	2,23	3,23

Laut den Versuchsergebnissen ist die Masse an Calciumcarbonat unter einer Luftfeuchtigkeit von 65 % für die Lagerung von vier Wochen im Vergleich mit einer relativen Feuchtigkeit von 75 % um das Drei- bis Vierfache höher, wobei der Massenverlust von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ für die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen (65 %RH, 75 %RH) beinahe identisch sind. Für die Repräsentation plausibler Versuchsergebnisse werden im Folgenden die Massenunterschiede von Calciumcarbonat bei einer relativen Feuchtigkeit von 65 % nach einer Lagerung von acht Wochen verwendet.

Um die Versuchsergebnisse weiter zu diskutieren, werden die Massenunterschiede berechnet, dargestellt und anschließend erläutert. In Tabelle 10 sind die Mittelwerte für den Massenunterschied von Calciumhydroxid nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen und der Massenunterschied von Calciumcarbonat nach einer Lagerungsdauer von acht Wochen für die vier untersuchte Proben (65 %RH) dargestellt. In Tabelle 11 sind die Mittelwerte für den Massenunterschied von Calciumhydroxid und Calciumcarbonat für vier untersuchte Proben (75 %RH) nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen dargestellt.

Tabelle 10: Massenunterschiede $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und CaCO_3 , 65 %RH

Probe	Massenunterschied $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [g/100 g Probe]	Massenunterschied CaCO_3 [g/100 g Probe]
65-1	- 0,40	1,89
65-2	- 0,23	2,56
65-3	- 0,57	2,00
65-4	- 0,31	2,75
Mittelwert	- 0,28	2,30

Tabelle 11: Massenunterschiede $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und CaCO_3 , 75 %RH

Probe	Massenunterschied $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [g/100 g Probe]	Massenunterschied CaCO_3 [g/100 g Probe]
75-1	- 0,53	0,73
75-2	- 0,28	1,42
75-3	- 0,53	0,71
75-4	- 0,57	1,19
Mittelwert	- 0,48	1,01

Das negative Vorzeichen des Massenunterschiedes an Calciumhydroxid zeigt den Massenverlust an Calciumhydroxid. Durch die Karbonatisierung des anhaftenden Zementstein der RC-Gesteinskörnung reagiert Calciumhydroxid durch die chemische Bindung von CO_2 zu Calciumcarbonat. Der positive Massenunterschied von Calciumcarbonat zeigt diese Massenzunahme an CaCO_3 .

In Tabelle 10 (65 %RH) liegen die Massenunterschiede von Calciumhydroxid bei 0,23g/100g bis 0,57g/100g. In Tabelle 11 (75 %RH) liegen die Massenunterschiede von Calciumhydroxid bei 0,28 g/100g bis 0,57 g/100g. Die Werte liegen nahe bei einander und zeugen für eine Repräsentativität der Versuchsergebnisse. Das theoretische Karbonatisierungspotential der vorliegenden RC-Gesteinskörnung wird im Folgenden aus den Versuchsergebnissen an Hand des Massenunterschiedes von Calciumhydroxid berechnet. Um einen repräsentativen Mittelwert für die Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotential der RC-Gesteinskörnung zu verwenden, wird der Mittelwert mit der niedrigsten Streuung aus Tabelle 11 unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % gewählt.

Die Ergebnisse aus der TGA streuen teilweise stark. Der Karbonatisierungsfortschritt der vorliegenden Proben lässt sich u.a. deshalb schwer abschätzen, da die Karbonatisierung in der äußeren Schicht des Betons stattfindet und der Beton im Inneren des Bauteils zum Zeitpunkt des Abbruchs nicht karbonatisiert vorliegt. Der Ursprung des Betonabbruchs/Altbetons der Brückenkappen ist nur bedingt bekannt. Es ist unbekannt, ob der Betonbruch aus randnahen Betonbauteile oder aus dem Inneren der Betonbauteile stammt. Aus diesem Grund ist die Homogenität der Probenmasse nur bedingt gewährleistet. Die Arbeit mit Betonabbruch im Gegensatz zu unter Laborbedingungen hergestellten Prüfkörpern bietet jedoch den Vorteil einer realen Betrachtung der derzeitigen Situation. Trotz der beschriebenen Streuungen ist das Potential zur CO_2 -Einspeisung in 40 Jahre alten Brückenbeton deutlich erkennbar. Zusätzlich wird für eine präzisere Berechnung des Karbonatisierungsfortschritts der w/z-Wert des ursprünglichen Betons und somit der originale Mischungsentwurf benötigt. Nach Betrachtung und Abschätzung aller Versuchsergebnisse wird die Versuchsreihe der Probe 1 bis Probe 4 für die Randbedingungen 75 %RH, 0 Wochen und 4 Wochen für die folgenden Berechnungen verwendet. Im Folgenden wird aus den Mittelwerten dieser Versuchsergebnisse (siehe Tabelle 11) das theoretische Karbonatisierungspotential der RC-Gesteinskörnung berechnet.

Vor der Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotentials wird der Einfluss der erhöhten CO_2 -Konzentration/ CO_2 -Einspeisung während der Lagerung der Proben der fein aufgemahlene RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer ICH H diskutiert.

Die Abhängigkeit des Karbonatisierungsfortschritts und der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von der CO_2 -Konzentration der Atmosphäre und von der Zeit verläuft nicht linear. Durch das Umwälzen der RC-Gesteinskörnung während der Auslagerung zur CO_2 -Auf-

nahme soll eine gleichmäßige Karbonatisierung der exponierten RC-Gesteinskörnung erreicht werden, die in einem Betonbauteil nach Einbau nicht gegeben ist und bessere Bedingungen für die Karbonatisierung des Betons schafft.

Die CO₂-Konzentration der Atmosphäre wird als konstant angenommen und liegt bei 0,04 %, was umgerechnet etwa 0,8 g/m³ Luft beträgt. In Abgasen kann der Gehalt an CO₂ der Umgebungsluft deutlich höher liegen. Bereits kleine Mengen an Abgasen erhöhen den CO₂-Gehalt stark, sodass z. B. in Anlagen des Motorfahrzeugverkehrs wie Tunnel oder Garagen mit einer Erhöhung der CO₂-Konzentration um 0,01 % gerechnet wird. Zusätzlich erhöht sich, durch die Erhöhung des CO₂-Gehaltes der Luft, die Karbonatisierungsgeschwindigkeit [11]. Auf Grund des Standortes der SHW wird für die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung eine erhöhte CO₂-Konzentration der Luft von 0,05 % angenommen. Auf Grundlage der Diffusionsgesetze lässt sich die Karbonatisierungstiefe eines Bauteils in Abhängigkeit der CO₂-Konzentration im Wurzelmaßstab darstellen [11]. Im Falle einer Schnellkarbonatisierung zur Simulation der Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer erhöht sich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei einer CO₂-Einspeisung von zehn Prozent um den Faktor $\sqrt{200} = 14,142$.

In Tabelle 12 sind die (Eingangs-) und Berechnungsgrößen für die Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotentials für die RC-Gesteinskörnung u.a. auf Grundlage der TGA-Ergebnisse dargestellt und anschließend in der Berechnung wiederzufinden.

Tabelle 12: Berechnungsgrößen Karbonatisierungspotential

Berechnungsgröße	Wert	Einheit
M _{Ca(OH)₂} , Molare Masse an Ca(OH) ₂	74,09	g/mol
M _{CO₂} , Molare Masse an CO ₂	44,01	g/mol
Massenunterschied Ca(OH) ₂ , 75 %RH	4,78	g/100 g Probe
Anteil RC-GK in 1m ³ RC-Beton	1565,74	kg/m ³
CO ₂ -Gehalt (Klimakammer)	10,00	%
CO ₂ -Gehalt (SHW-Messel)	0,05	%

Stöchiometrische Berechnungen:

$$\frac{M_{\text{Ca(OH)}_2}}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{m_{\text{Ca(OH)}_2}}{m_{\text{CO}_2}}$$

$$\rightarrow \text{Masse CO}_2 (m_{\text{CO}_2}) = 0,2839 \text{ g/100 g}$$

Umrechnung auf 1 m³ RC-Beton:

$$2,839 \text{ g/kg} \cdot 1565,74 \text{ kg/m}^3 = 4445,51 \text{ g/m}^3$$

Theoretisches Karbonatisierungspotential unter Berücksichtigung der Schnellkarbonatisierung:

$$4445,51 \text{ g/m}^3 \div \sqrt{200} = 314,35 \text{ g/m}^3$$

Aus den Ergebnissen der Proben 1, 2, 3 und 4 ergibt sich ein mittlerer Massenunterschied von 4,8 g Calciumhydroxid pro 100 g einer aufgemahlene Probe der RC-Gesteinskörnung. Aus der stöchiometrischen Berechnung ergeben sich 2,8 g gebundenes CO₂ pro Kilogramm RC-Gesteinskörnung. Aus dem Mischungsentwurf und unter Berücksichtigung des Faktors der Schnellkarbonatisierung ergibt sich ein theoretisches Karbonatisierungspotential von etwa 315 g gebundenes CO₂ pro Kubikmeter RC-Beton durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass mehrere Materialparameter einen Einfluss auf den Ablauf der Karbonatisierung haben. Diese Einflussfaktoren müssen identifiziert und quantifiziert werden, um eine geeignete Auslagerungstechnik zu entwickeln. Beispiele hierfür sind die CO₂-Konzentration, die Feuchtigkeit und Temperatur sowie die Art des Zements.

Die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ist besonders einflussreich, da sie seit dem Beginn der Industrialisierung exponentiell ansteigt. Das bedeutet, dass in Zukunft auch die Karbonatisierung minimal beschleunigt voranschreiten wird. So hat sich die CO₂-Konzentration innerhalb der letzten 10 Jahre um durchschnittlich 2 - 3 ppm erhöht [12]. In der Nähe von Verkehrswegen und industriellen Betrieben ist ebenfalls eine erhöhte Menge an CO₂ nachweisbar [11].

Für die Reaktion von Calciumhydroxid zu Kalkstein wird neben Kohlenstoffdioxid auch Wasser benötigt. Da die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre nahezu konstant ist, steuert die Menge an vorhandenem Wasser maßgeblich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Die Umgebungsfeuchtigkeit besitzt dadurch eine der größten Einflüsse auf die Karbonatisierung.

Bei einem zu niedrigen Feuchtegehalt steht nicht genug Wasser für die Reaktion zur Verfügung, das CO₂ kann sich nicht im Porenwasser auflösen und so auch nicht das Calciumhydroxid neutralisieren. Ein zu hoher Feuchtegehalt führt jedoch dazu dass eine Wasserschicht auf den Poren verhindert, dass CO₂ in den Porenraum eintritt. Das liegt daran, dass der Diffusionskoeffizient für CO₂ im Wasser im Gegensatz zu dem in der Luft vernachlässigbar gering ist. So lässt sich z. B. auch bei unter Wasser gelagerten Bauteilen effektiv keine Karbonatisierung feststellen. Zwischen diesen beiden Extremwerten liegt eine optimale relative Feuchtigkeit. Gehlen [13] definiert den Optimalwert mit 65 %RH. Stark und Wicht [11] sowie Lagerblad [14] grenzen den Bereich auf 60 %RH bis 80 %RH ein. Im Gegensatz dazu ist nach Papadakis [15] eine relative Feuchtigkeit von 50 %RH am effektivsten. Versuche zeigen, dass die Porosität der RC-Gesteinskörnung positiv mit der relativen Feuchtigkeit korreliert. Das liegt daran, dass der Kapillarraum einer feinporigen Zementmatrix vermehrt durch Wasser blockiert wird als der eines Betons mit größeren Poren.

Allgemein ist davon auszugehen, dass moderate Temperaturen keinen signifikanten Einfluss auf die Karbonatisierungstiefe haben. Eine erhöhte Temperatur verlangsamt zwar die Löslichkeit von Ca(OH)₂, jedoch steigt dadurch die Molekülbewegung, was die Diffusion

von CO₂ in den Zementstein begünstigt. Dementsprechend ist eine höhere Temperatur als karbonatisierungsfördernd zu beurteilen [11].

Bei der Karbonatisierungsreaktion wird Calciumhydroxid in Calciumcarbonat umgewandelt. Diese Verbindung entsteht im Beton hauptsächlich durch die Hydratisierung der Klinkerphasen Tricalciumsilikat (C₃S) und Dicalciumsilikat (C₂S). Die Reaktionsgeschwindigkeit der Karbonatisierung hängt dabei von der Menge an vorhandenem Calciumhydroxid im Zementstein und dadurch auch von der Menge an C₃S und C₂S im Zement ab. Zemente mit einem niedrigen Klinkeranteil bilden weniger Calciumhydroxid und weisen dadurch höhere Karbonatisierungstiefen auf als Zemente mit einem hohen Klinkeranteil. Im vorliegenden Fall werden RC-Gesteinskörnungen aus verschiedenen Zementarten hergestellt und die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten miteinander verglichen [16].

Insgesamt sind demnach ein hoher CO₂-Gehalt der Luft, warme Temperaturen, eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit sowie eine hohe Porosität des Betons beschleunigende Einflussgrößen für die Karbonatisierung. Dahingegen führen ein hoher Zementgehalt, dabei vor allem ein hoher Anteil an C₃S und C₂S, eine lange, feuchte Nachbehandlung sowie eine gute Verdichtung des Altbetons zur Verzögerung der Karbonatisierung. Für die Entwicklung einer geeigneten Auslagerungstechnik sollten diese Aspekte berücksichtigt werden.

Die Südhessische Wertstoffrückgewinnungs-GmbH (SHW) mit Sitz in Messel befindet sich in einem Industriegebiet in unmittelbarer Nähe zu einem Ytong Werk, welches die CO₂-Konzentration der Atmosphäre beeinflusst. Durch die gezielte Karbonatisierung könnte dieser Effekt vermindert werden. Die große ebene Fläche des Areals ermöglicht eine Auslagerung der Gesteinskörnung (Abbildung 24). Speziell das Fehlen von beispielsweise hohen Gebäuden begünstigt hohe Temperaturen vor allem im Sommer. Jedoch ist es wichtig eine regelmäßige Umwälzung der RC-Gesteinskörnung durchzuführen, sodass der Zuschlag in den unteren Lagen ebenfalls karbonatisiert. Hierzu bieten sich Radlader an, welche in regelmäßigen Abständen die auslagernde Gesteinskörnung umschichten.



Abbildung 24: Lageplan SHW Messel.

Die getesteten Laborbedingungen lassen sich nicht immer unmittelbar auf die realen Gegebenheiten übertragen. Bei freibewitterten Flächen muss auch der Einfluss von Niederschlagsereignissen auf den Fortschritt der Karbonatisierung berücksichtigt werden. Durch die direkte Beregnung entstehen abwechselnd Niederschlags- und Trocknungsperioden. Während der Niederschlagsperiode und zu Beginn der Trocknungsperiode ist dabei die Karbonatisierung durch die Sättigung der Randzone mit Wasser bis zur Trocknung unterbrochen. Wie viel Feuchtigkeit die Recycling-Gesteinskörnung dabei aufnimmt ist nicht nur abhängig von der Intensität und Dauer des Niederschlagsereignisses, sondern auch von der Porosität und der damit verbundenen kapillaren Wasseraufnahmefähigkeit. Eine Möglichkeit, um diesen Effekt zu übergehen, wäre die Verwendung von einer Art Pavillon, der die RC-Gesteinskörnung vor unmittelbarem Niederschlag schützt jedoch eine fortwährende Durchlüftung ermöglicht.

3.4 Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Mischungsentwürfe

Ein Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines reststofffrei rezyklierbaren, leichten, nicht tragenden und hochwärmedämmenden Sandwichelements. Die Vorsatz- und Tragschicht besteht jeweils aus Recyclingbeton, der Sandwichkern aus mineralisiertem Schaum niedriger Rohdichte. Die Sandwich-Elemente besitzen eine Länge von 360 cm und eine Breite von 50 cm. Die Stärke der äußeren Vorsatzschicht beträgt 3,5 cm und die der Tragschicht 5,5 cm. Dazwischen befindet sich eine Schicht Schaumbeton von 16 cm. Das Sandwichelement entspricht dabei einem Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37 ohne Zusätze und einem Größtkorn von 8 mm.

Normativ ist die Verwendung von RC-Gesteinskörnung auf einen Anteil von 35 Vol.-% des Gesamtvolumens des Zuschlags und eine Korngröße > 2 mm begrenzt. Um das Sequestrierung-Potential vollkommen auszuschöpfen, wurden jedoch drei Mischungsentwürfe mit verschiedenen Anteilen an Recycling-Material entwickelt.

Der erste Mischungsentwurf ist ein normativ korrekter Beton (M-Norm). Die Fraktion 0/2 enthält vollständig Primärsand. Die Fraktion 2/8 besteht aus RC-Material und übersteigt einen Anteil von 35 Vol.-% nicht. Für den zweiten Mischungsentwurf (M-RC) wird für beide Fraktionen 0/2 und 2/8 ausschließlich RC-Gesteinskörnung verwendet. Der dritte Mischungsentwurf (M-50/50) entspricht M-Norm, jedoch besteht die feine Fraktion 0/2 zu 50% ebenfalls aus RC-Material (

Tabelle 13).

Tabelle 13: Übersicht über die verwendeten Mischungsentwürfe (M-Norm, M-RC, M-50/50 bzw. RC N, RC 100 und M-50/50).

Beton	Zement	Wasser	Gesteinskörnung				
			natürlich		1/2	rezykliert	
			0,1/0,5	0,5/1		0/2	2/8
RC 100 / M-RC	416,67	225	0	0	0	1021,07	544,67
RC 50/50 / M-50/50	416,67	225	107	297,33	100,02	0,1/0,5	0,5/1
						107	297,33
						2/8	100,02
						565,68	
RC N / M-Norm	416,67	225	214	594,65	200,03	0	565,68

3.5 Entwicklungstool für Recycling-Beton

Das Entwicklungstool ermöglicht die Entwicklung eines leistungsfähigen Recycling-Betons. Für die Bereitstellung des Mischungsentwurfes werden lediglich die Sieblinien, die Rohdichten sowie das Wasserabsorptionsverhalten nach 10 Minuten der verschiedenen Kornfraktionen benötigt. Anschließend ist die Berechnung einer variablen Betonmenge möglich.

Die Sieblinie aller Mischungen orientiert sich an der Sieblinie B8 mit einem k-Wert von 2,9 unter der Bedingung, dass die Fraktion 2/8 einen Anteil von 35 Vol.-% nicht überschreitet. Dieses Optimierungsproblem wird mit Hilfe eines Exceltools (Software „Excel Solver“) gelöst. Hierzu sind zunächst die Sieblinien der zur Verfügung stehenden, ofentrockenen und massenkonstanten Korngruppen zu bestimmen. Dies umfasst die Recycling-Fraktionen 0/2 und 2/8 sowie die Fraktionen 0,1/0,5, 0,5/1, 1/2 des Primärsandes. Anschließend wird der geforderte Siebdurchgang der Betonschicht für jede einzelne Maschenweite durch eine Kombination der Gesteinskörnungen optimiert. Ziel ist die Erreichung eines k-Wertes von 2,9. Dabei ist der Anteil der Fraktion 2/8 auf 35 Vol.-% zu begrenzen und die Summe aller Anteile von 100 Vol.-% zu erreichen.

Maschenweite [mm]		0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
Durchgang [Vol.-%]		3,31	14,84	52,50	64,16	77,82	97,37	100,00	100,00	100,00
Rückstand [Vol.-%]		96,69	85,16	47,50	35,84	22,18	2,63	0,00	0,00	0,00
			A8 =	3,63						
$k = \sum R/100$		2,90	B8 =	2,90						
			C8 =	2,27						
Anteile	Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
0,1/0,5	Durchgang [Vol.-%]	21,16	98,29	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,79	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	78,84	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5/1	Durchgang [Vol.-%]	0,67	2,66	99,33	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,32	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	99,33	97,34	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	Durchgang [Vol.-%]	0,00	0,42	3,38	90,30	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,89	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	100,00	99,58	96,62	9,70	0,00	0,00	0,00	0,00
2/8	Durchgang [Vol.-%]	0,40	0,59	0,59	1,19	36,63	92,48	100,00	100,00	100,00
35,00	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	99,60	99,41	99,41	98,81	63,37	7,52	0,00	0,00
Summe										
100,00	Vol.-%									

Abbildung 25: Tool für den Mischungsentwurf M-Norm.

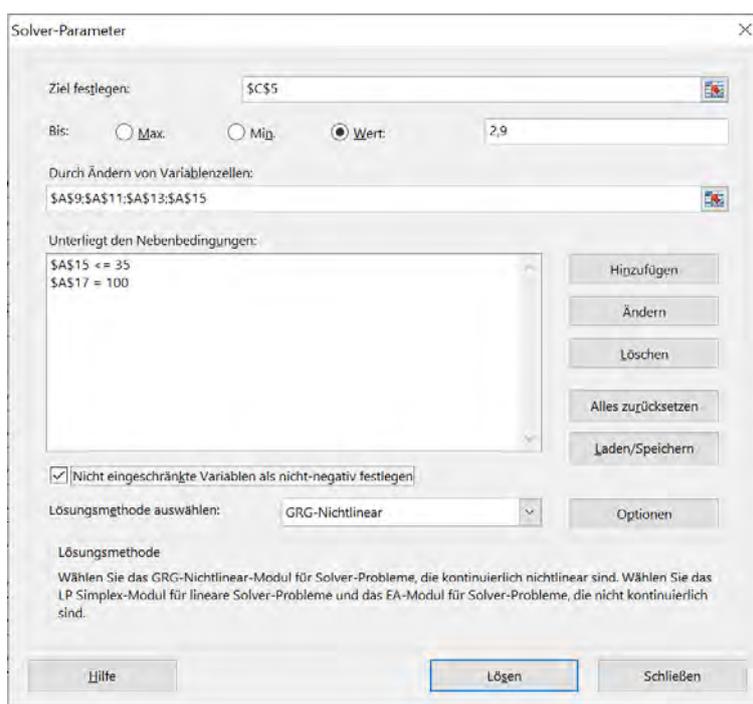


Abbildung 26: Bedingungen für den Solver (M-Norm).

Neben der Sieblinie ist der w/z-Wert ebenfalls ein Faktor, der durch die RC-Gesteinskörnung beeinflusst wird. Für Betonsplitt aus Altbeton ist die Wasserabsorption aufgrund des anhaftenden Mörtels erhöht. Aus diesem Grund ist die Saugfähigkeit der Gesteinskörnung bei der Bemessung des w/z-Wertes speziell zu berücksichtigen.

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{eff} = \frac{w}{z} + \frac{w_{add}}{z} - \delta \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i \cdot P_i}{z}\right)$$

Mit

w/z nominaler w/z-Wert

w_{add}/z zusätzlich zugegebenes Wasser

δ relative Absorptionsgeschwindigkeit

p_i Wasseraufnahmekapazität der „i-ten“ Fraktion

P_i Trockenmasse der „i-ten“ Fraktion

Der nominale w/z-Wert beträgt 0,54. Dies begründet sich in einer angestrebten Konsistenzklasse von F3. Das zusätzlich benötigte Wasser ist abhängig von der Saugfähigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung. Hierfür werden die Ergebnisse verwendet, die aus der Prüfung der Wasseraufnahme nach 10 min resultieren. Um das stärkere Saugvermögen, in Abhängigkeit der Korngrößen der rezyklierten Gesteinskörnung zu berücksichtigen, muss die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung getrennt nach Kornfraktionen erfolgen. In diesem Fall wird das zusätzliche Wasser im Zuge einer Vorsättigung der RC-Gesteinskörnung zugeführt. Dadurch lässt sich das zeitabhängige Saugen unterbinden und die anfänglich bestehende Gefahr der Entmischung, des Blutens und des verstärkten Frühschwindens begrenzen. Für den Normbeton resultiert exemplarisch unten folgender Mischungsentwurf.

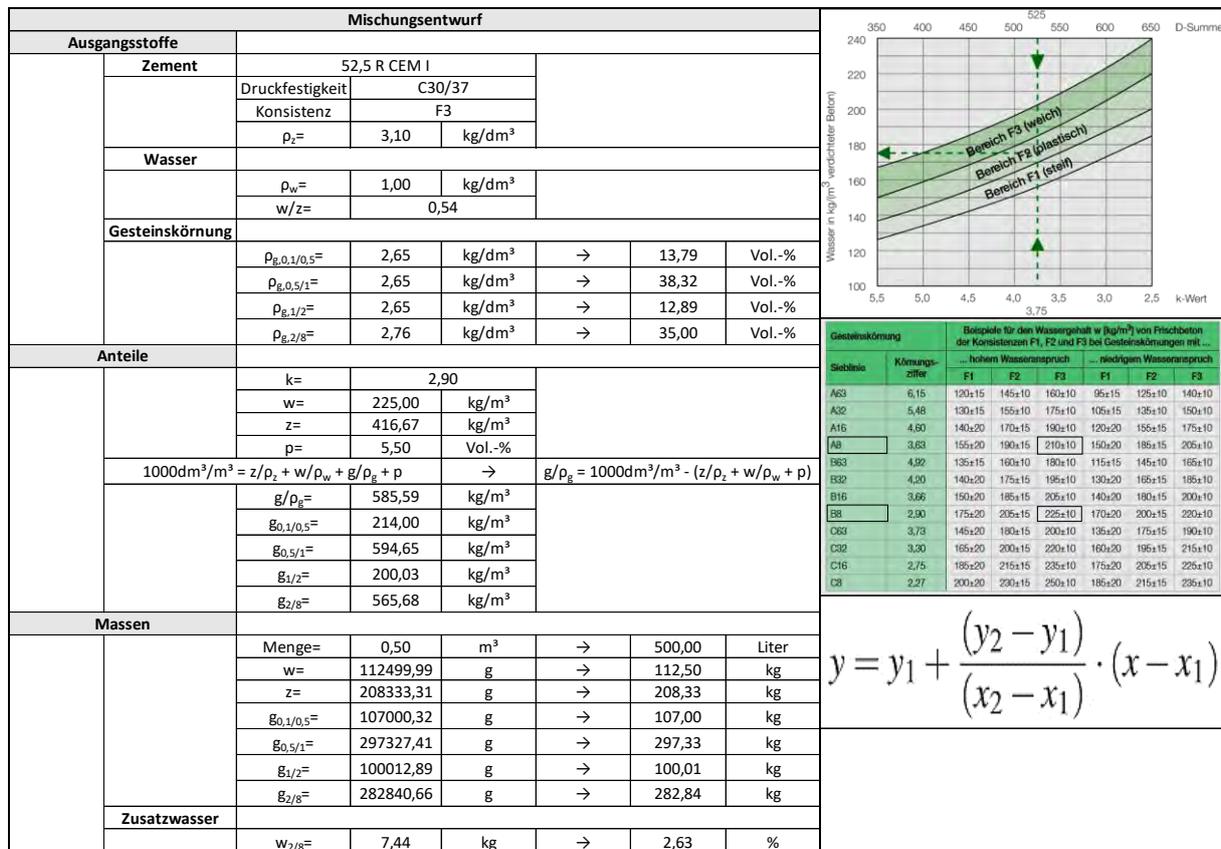


Abbildung 27 : Mischungsentwurf M-Norm für die Brückenkappe.

Im Folgenden ist exemplarisch das Modul für einen M-RC Beton abgebildet. Die grün hinterlegten Felder stellen die anzupassenden Zellen dar.

Maschenweite [mm]		0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
Durchgang [Vol.-%]		8,37	21,30	41,84	63,00	78,08	97,40	100,00	100,00	100,00
Rückstand [Vol.-%]		91,63	78,70	58,16	37,00	21,92	2,60	0,00	0,00	0,00
k = $\sqrt{R}/100$		2,90	A8 =	3,63						
			B8 =	2,90						
			C8 =	2,27						
Anteile	Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
0/2	Durchgang [Vol.-%]	12,56	32,19	63,51	95,70	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
65,55	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	87,44	67,81	36,49	4,30	0,00	0,00	0,00	0,00
2/8	Durchgang [Vol.-%]	0,40	0,60	0,60	0,80	36,38	92,45	100,00	100,00	100,00
34,45	Vol.-%	Rückstand [Vol.-%]	99,60	99,40	99,40	99,20	63,62	7,55	0,00	0,00
Summe										
100,00	Vol.-%									

Abbildung 28: Sieblinie.

Mischungsentwurf									
Ausgangsstoffe									
Zement	52,5 R CEM I								
	Druckfestigkeit	C30/37							
	Konsistenz	F3							
	$\rho_z =$	3,10	kg/dm ³						
Wasser									
	$\rho_w =$	1,00	kg/dm ³						
	w/z =	0,54							
Gesteinskörnung									
	$\rho_{g,0/2} =$	2,66	kg/dm ³	→	65,5508411	Vol.-%			
	$\rho_{g,2/8} =$	2,76	kg/dm ³	→	34,4491589	Vol.-%			
Anteile									
	k =	2,90							
	w =	225,00	kg/m ³						
	z =	416,67	kg/m ³						
	$\rho =$	5,50 Vol.-%							
$1000\text{dm}^3/\text{m}^3 = z/\rho_z + w/\rho_w + g/\rho_g + p \rightarrow g/\rho_g = 1000\text{dm}^3/\text{m}^3 - (z/\rho_z + w/\rho_w + p)$									
	$g/\rho_g =$	585,59	kg/m ³						
	$g_{0/2}/\rho_g =$	1021,07	kg/m ³						
	$g_{2/8}/\rho_g =$	556,78	kg/m ³						
Massen									
	Menge =	0,50	m ³	→	500,00	Liter			
	w =	112500,00	g	→	112,50	kg			
	z =	208333,33	g	→	208,33	kg			
	$g_{0/2} =$	510533,92	g	→	510,53	kg			
	$g_{2/8} =$	278389,21	g	→	278,39	kg			
Zusatzwasser									
	w _{0/2} =	26,29	kg	→	5,15	%			
	w _{2/8} =	7,32	kg	→	2,63	%			

Sieblinie	Körnungsziffer	... hohem Wasseranspruch			... niedrigem Wasseranspruch		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
A63	6,15	120±15	145±10	160±10	95±15	125±10	140±10
A32	5,48	130±15	155±10	175±10	105±15	135±10	150±10
A16	4,60	140±20	170±15	190±10	120±20	155±15	175±10
A8	3,63	155±20	190±15	210±10	150±20	185±15	205±10
B32	4,92	135±15	165±10	180±10	115±15	145±10	165±10
B16	3,66	150±20	185±15	205±10	140±20	180±15	200±10
B8	2,90	175±20	205±15	225±10	170±20	200±15	220±10
C32	3,73	145±20	180±15	200±10	135±20	175±15	190±10
C16	2,75	185±20	215±15	235±10	175±20	205±15	225±10
C8	2,27	200±20	230±15	250±10	185±20	215±15	235±10

$$y = y_1 + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot (x - x_1)$$

Abbildung 29: Mischungsentwurf für M-RC Beton.

3.6 Herstellung des Recycling-Betons

Der eigentliche Herstellungsprozess des leistungsfähigen RC-Betons für die Vorsatz- und Tragschicht des |2CO2|sandwiches folgt den normativen Vorgaben. Die Ausgangsstoffe werden entsprechend des Mischungsentwurfs abgemessen. Der Beton wird in einer oder mehreren Lagen in die Form gefüllt und verdichtet. In Abhängigkeit von der Geometrie

der Schalungen ist die Anzahl der Schichten so zu wählen, dass vollständige Verdichtung erreicht wird.

Die Probekörper werden an der TU Darmstadt mittels Konus-Mischer hergestellt und auf einem Rütteltisch verdichtet.

Bei Herstellen von RC-Beton liegt ein besonderes Augenmerk auf der stärkeren (Wasser-)Saugfähigkeit der Gesteinskörnung. Beim Entwurf und der Herstellung von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung muss dies besonders berücksichtigt werden, um mögliche Auswirkungen auf Frisch- und Festbetoneigenschaften zu vermeiden. Im Vergleich zu Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung muss ein erhöhter Wasseranspruch eingeplant werden. Diese Daten entstammen der Wasseraufnahme nach 10 min. Das zusätzlich erforderliche Wasser sollte stets zur Vorsättigung der rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden, bevor der eigentliche Mischprozess beginnt. Die Vorsättigung findet gemäß Wasseranspruch gesondert für die einzelnen Kornfraktionen statt.



Abbildung 30: Herstellung der Probekörper an der TU Darmstadt.

3.7 Analyse der mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Recycling-Betons werden sowohl im frischen als auch im festen Zustand untersucht.

Neben der Frischbetonrohichte wird zudem auch das Ausbreitmaß bestimmt. Frischbetonprüfungen werden unmittelbar nach dem Mischen des Betons durchgeführt.

Eine erste Kontrolle der Eignung des Mischungsentwurfes bildet die Ermittlung des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5. Der Frischbeton wird in einen Kegelstumpf, der auf einem Ausbreittisch steht, eingebracht. Nach Entfernen der Form wird die bewegliche Tischplatte 15-mal bis zur Begrenzung angehoben und wieder fallen gelassen. Das Ausbreitmaß wird parallel zu den Tischkanten auf 10 mm genau gemessen (x_1 , x_2). Der Durchmesser des Betonkuchens als Mittelwert von zwei Messungen gibt das Ausbreitmaß an. Zusätzlich wird der Beton optisch auf eventuell auftretende Entmischungen geprüft.



Abbildung 31: Bestimmung des Ausbreitmaßes.

Zur Bestimmung der Frischbetonrohddichte nach DIN EN 12350-6 wird der Frischbeton in einem biegesteifen und wasserdichten Behälter verdichtet und gewogen. Das Verhältnis von Masse Betonprobe m [kg] und Behältervolumen V [m³] ergibt die Frischbetonrohddichte D und ist auf 10 kg/m³ genau anzugeben.

M-Norm				M-RC			
Ausbreitmaß				Ausbreitmaß			
	x_1 =	42,0	cm		x_1 =	48,0	cm
	x_2 =	42,0	cm		x_2 =	46,5	cm
	x =	42,0	cm		x =	47,25	cm
	Klasse	F3			Klasse	F3	
Frischbetonrohddichte				Frischbetonrohddichte			
	Leer=	4,16	kg		Leer=	4,16	kg
	Voll=	21,5	kg		Voll=	21,14	kg
	Volumen=	0,005	m ³		Volumen=	0,005	m ³
	D =	3468	kg/m ³		D =	3396	kg/m ³
	Rohddichte=	3,47	kg/dm ³		Rohddichte=	3,40	kg/dm ³

Abbildung 32: Frischbetonversuche Brückenkapfenbeton.

Die Druckfestigkeit von Festbeton ist gemäß DIN EN 12390-3 an mindestens drei Würfeln, mit einer Kantenlänge von 150 mm, im Alter von mindestens 28 Tagen zu ermitteln.

Beton	Probekörper	m [kg]	Abmessungen [mm x mm x mm]	V [dm ³]	D [kg/dm ³]
RC 100	1	6,877	150,00 x 149,95 x 150,35	3,38	2,03
	2	6,909	149,05 x 149,85 x 149,75	3,34	2,07
	3	6,776	148,40 x 150,05 x 149,60	3,33	2,03
RC 50/50	1	7,132	150,00 x 149,75 x 150,05	3,37	2,12
	2	7,214	149,60 x 149,70 x 150,10	3,36	2,15
	3	7,181	150,40 x 150,15 x 150,30	3,39	2,12
RC N	1	7,506	150,20 x 149,80 x 150,00	3,38	2,22
	2	7,408	149,70 x 150,00 x 150,10	3,37	2,20
	3	7,440	150,00 x 149,60 x 149,90	3,36	2,21

Abbildung 33: Druckfestigkeit Brücken-Beton.

3.8 Analyse der Dauerhaftigkeit

Die Analyse und Modellierung der Dauerhaftigkeit orientiert sich an den Expositionsklassen für Beton. So umfasst sie sowohl die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands und der Wassereindringtiefe unter Druck als auch die Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes und des Chloridwiderstandes des Betons.

Zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands gegen Abwitterung der Betonoberfläche wird das CDF-Verfahren angewendet. Hierfür steht die Frost-Tau-Truhe und Zubehör für CDF-Versuche nach RILEM zur Verfügung. Dazu werden in einer Prüfflüssigkeit gelagerte Probekörper definierten, zyklischen Frost-Tau-Beanspruchungen ausgesetzt. In regelmäßigen Abständen erfolgt eine Bestimmung der äußeren Schädigung (Wägung des abgewitterten Materials) und der inneren Schädigung (Messung der Ultraschalllaufzeit durch die Probekörper).

Die Verwendung von Betonbrechsand führt zu einer Verringerung des Frost-Tausalz-Widerstandes der geprüften Betone. In Abbildung 34 bzw. Abbildung 35 sind die Prüfergebnisse des Frost-Tausalz-Widerstandes gegenübergestellt. Die flächenbezogene Abwitterung der Betone mit Betonbrechsandanteil, ist jeweils höher als beim Referenzbeton RC N. Hierbei liegen die Betone RC 100 bzw. RC 50/50 um 0,542 kg/m² (75,91 %) bzw. 0,932 kg/m² (130,53 %) über der flächenbezogenen Abwitterung des Referenzbetons.

Die massenbezogene Abwitterung (Masse des abgewitterten Materials im Verhältnis zur Masse des ungesättigten Probekörpers) beträgt im Mittel 0,85 % für den Beton RC 100, 1,09 % für den Beton RC 50/50 sowie 0,45 % für den Beton RC N.

Beton	m _{s,28} i.M. [g]	m Probekörper ungesättigt i.M. [g]	massenbezogene Abwitterung [%]	Zunahme S ₂₈ gegenüber RC N	
				[kg/m ²]	[%]
RC 100	28,26	3308	0,85	0,542	75,91
RC 50/50	37,03	3400	1,09	0,932	130,53
RC N	16,05	3586	0,45	Referenz	

Abbildung 34: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Referenzbeton.

Im BAW-Merkblatt - Frostprüfung von Beton [17] der Bundesanstalt für Wasserbau ist als Abnahmekriterium eine mittlere Abwitterung $\leq 1500 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln definiert. Dieser Grenzwert wird von den Betonen RC 100 sowie RC N eingehalten. Der Beton RC 50/50 überschreitet den Grenzwert um 9,73 %. Der Beton RC-N weist dahingehend die höchste Leistungsfähigkeit auf und unterschreitet den geforderten Grenzwert um 52,40 %. Zieht man diesen Grenzwert zur Bewertung der Dauerhaftigkeit heran, weisen die Betone RC 100 sowie RC N eine ausreichende Dauerhaftigkeit bei Frost-Tausalz-Beanspruchung auf.

Beton	m Probekörper i.M. [kg]		Δm , Sättigung i.M.		S ₁₄ [kg/m ²]	S ₂₈ [kg/m ²]	Abweichung von Grenzwert S ₂₈ = 1,500 kg/m ²	
	ungesättigt	gesättigt	[g]	[%]			[kg/m ²]	[%]
RC 100	3,308	3,331	22,30	0,67	0,591	1,256	-0,244	-16,26
RC 50/50	3,400	3,414	14,60	0,43	0,395	1,646	+0,146	+9,73
RC N	3,586	3,595	9,40	0,26	0,174	0,714	-0,786	- 52,40

Abbildung 35: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Grenzwert.

Vor Beginn der Frost-Tau-Zyklen, wurden die Probekörper zur kapillaren Flüssigkeitsaufnahme in einer Natriumchloridlösung vorgesättigt. Dabei nahmen die Probekörper des Betons RC 100 im Mittel 22,30 g (0,67 %) ihrer Ausgangsmasse zu. Für den Beton RC 50/50 lag die Massenzunahme der Probekörper bei 14,60 g (0,43 %). Die Probekörper des Referenzbetons RC N wiesen nach der Sättigung eine mittlere Massenzunahme von 9,40 g (0,26 %) auf.

In Abbildung 36 ist die Massenzunahme der Probekörper nach der Sättigung dargestellt.

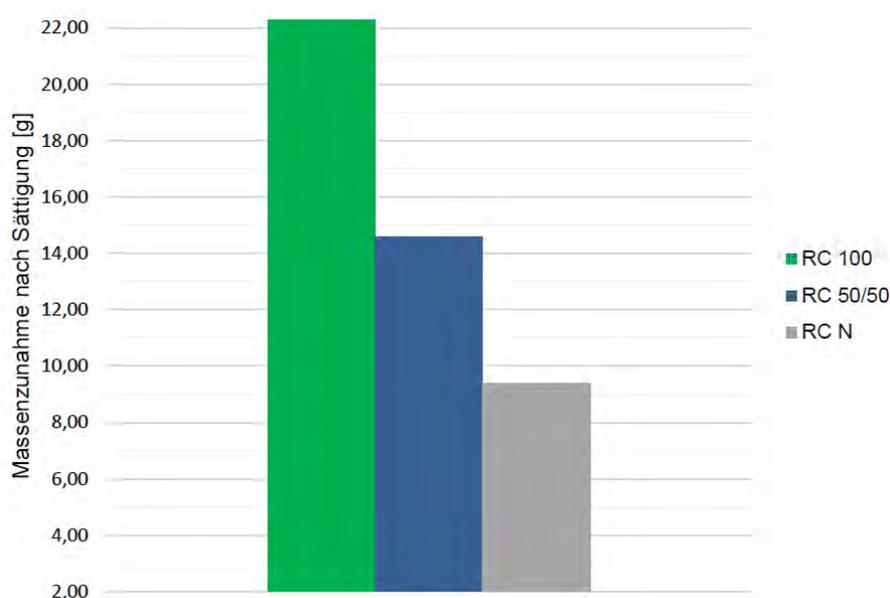


Abbildung 36: Massenzunahme der Probekörper nach Sättigung.

In Abbildung 37 ist die Massenzunahme der Probekörper durch die kapillare Flüssigkeitsaufnahme und die flächenbezogene Abwitterung, nach 14 bzw. 28 Frost-Tau-Wechseln, gegeneinander aufgetragen. Bei der Betrachtung wird die Korrelation der beiden Parameter ersichtlich. Zudem fällt auf, dass die Streuung der Messwerte beim Beton RC N am geringsten ist.

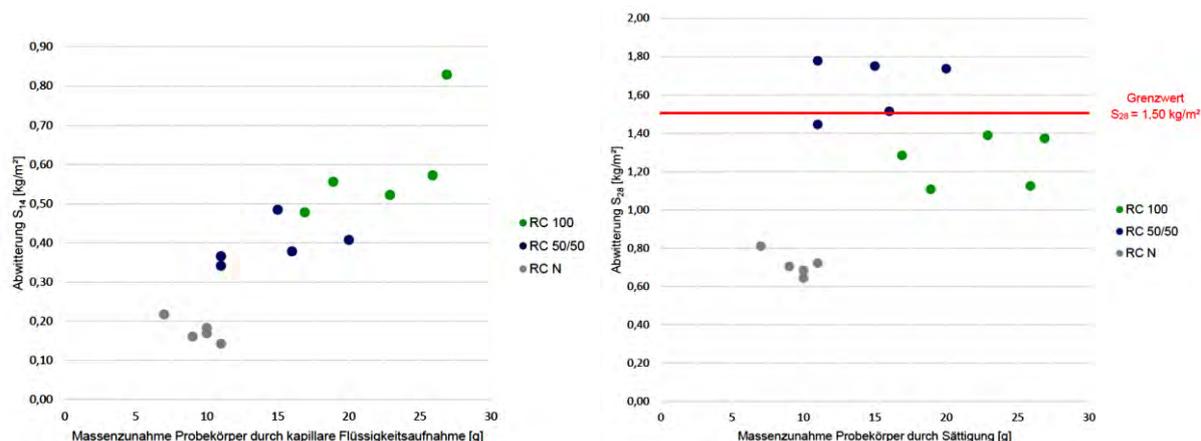


Abbildung 37: Zusammenhang Abwitterung und kapillare Flüssigkeitsaufnahme -14 Frost-Tau-Wechsel (li.), 28 Frost-Tau-Wechsel (re.).

Bei der Betrachtung der Prüfflächen ist bereits visuell ein höherer Schädigungsgrad der Probekörper aus Beton mit Brechsandanteilen zu erkennen. In Abbildung 38 sind die Prüfflächen dargestellt (v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N).



Abbildung 38: Gegenüberstellung - Prüfflächen der Probekörper für CDF-Prüfung.

Durch organoleptische Begutachtung des abgewitterten Materials nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde festgestellt, dass sich dieses in seiner jeweiligen Beschaffenheit deutlich voneinander unterscheidet. Das abgewitterte Material der Betone mit Betonbrechsandanteilen enthält neben dem Feinanteil zudem gröberes Material. Wohingegen sich die Abwitterung des Referenzbetons RC N hauptsächlich aus feinem Material zusammensetzt.

In Abbildung 39 ist das abgewitterte Material dargestellt (v. li.: RC 100; RC 50/50; RC N).



Abbildung 39: Gegenüberstellung - abgewittertes Material nach 28 Frost-Tau-Wechseln.

Der geringere Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit Betonbrechsand, lässt sich auf den höheren Kapillarporenanteil der feinen rezyklierten Gesteinskörnung.

Die höhere Kapillarporosität begünstigt die kapillare Flüssigkeitsaufnahme, wodurch mehr Flüssigkeit in den Beton aufgenommen wird. Infolgedessen liegt eine größere Menge potentiell gefrierbares Wasser im Beton vor, als im Beton RC N mit gefügedichtetem Natur sand. Aufgrund des kapillaren Effektes, gefriert das Wasser zunächst in den Kapillarporen. Beim Gefrieren von Wasser zu Eis, kommt es zu einer Zunahme des ursprünglichen Volumens, was eine Verdrängung von Wasser zur Folge hat. Durch bereits vorhandenes Eis in den Kapillarporen, ist der erforderliche Expansionsraum nicht gegeben, wodurch ein hydraulischer Druck entsteht, der zur Schädigung des Betons führt. [18]

Der Beton RC 50/50 weist nach 28 Frost-Tau-Wechseln eine 31 % höhere flächenbezogene Abwitterung auf, als der Beton RC 100, dessen feine Gesteinskörnung vollständig aus Betonbrechsand besteht. Gegebenenfalls ist dies darauf zurückzuführen, dass trotz der höheren kapillaren Wasseraufnahme, verhältnismäßig mehr Expansionsraum im Beton zur Verfügung steht.

Diese Beobachtung lässt sich im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht abschließend klären und bietet Anlass für weitere Untersuchungen, zur Beantwortung der Fragestellung, wie sich das Verhältnis von Brechsand zu Natursand auf den Frost-Tausalz-Widerstand von RC-Betonen auswirkt.

In [19] wurden, im Rahmen einer Frostwiderstandsprüfung von RC-Betonen mit variierender Zusammensetzung der Gesteinskörnung (u.a. 100 % Brechsandanteil), ausreichend hohe Frostwiderstände festgestellt. Zudem wird von Schwankungen, hinsichtlich der Masse des abgewitterten Materials, bei den geprüften Betonen berichtet.

Für die Prüfung der Wassereindringtiefe wird nach DIN EN 12390-8 Wasser unter Druck (500 kPa) auf die Oberfläche des Prüfkörpers aufgebracht. Nach Einwirken des Drucks über 72 Stunden wird der Probekörper gespalten, die größte Eindringtiefe gemessen und auf 1 mm genau angegeben. Das Mindestalter der Proben zu Prüfbeginn beträgt 28 Tage.

Die Wassereindringtiefe in den Beton steigt mit zunehmendem Brechsandanteil. Die mittlere Wassereindringtiefe der Mischung RC 100 liegt mit 4,3 mm (+ 26,88 %) deutlich über der mittleren Wassereindringtiefe des Betons RC N. Die Wassereindringtiefe des Betons RC 50/50 weicht um 1,0 mm (+ 6,25 %) vom Referenzwert ab. In Abbildung 40 sind die Prüfergebnisse gegenübergestellt. Abbildung 41 zeigt den Verlauf der Wassereindringtiefe an den Probekörpern (v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N).

In den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton ist festgelegt, dass die Wassereindringtiefe von Betonen für Wasserbauwerke ≤ 30 mm sein muss. Dieser Grenzwert wird von den geprüften RC-Betonen deutlich unterschritten, somit ist ein ausreichender Wassereindringwiderstand der Betone gegeben.

Beton	Mittelwert d_{\max} [mm]	Zunahme d_{\max} gegenüber RC N		Abweichung von Grenzwert $d \leq 30$ mm	
		[mm]	[%]	[mm]	[%]
RC 100	20,3	4,3	26,88	-9,7	-32,33
RC 50/50	17,0	1,0	6,25	-13,0	-43,33
RC N	16,0	Referenz		-14,0	-46,67

Abbildung 40: Gegenüberstellung - Wassereindringtiefe.



Abbildung 41: Gegenüberstellung - Wassereindringtiefe an Probekörpern.

Die Zunahme der Wassereindringtiefe mit höherem Brechsandanteil, lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die wiederum die Wasserpermeabilität des Betons beeinflusst. [11][18]

In [20] wurde festgestellt, dass kein signifikanter Unterschied bei der Wassereindringtiefe von Betonen mit rezykliertem Zuschlag (Typ 1), im Vergleich zu Normalbetonen besteht. Die untersuchten Betone enthielten jedoch keinen Brechsand. Siebel et al. vermuten, dass die Verwendung von Brechsand, in einer geringfügig höheren Wassereindringtiefe resultiert und führen dies auf die höhere Porosität des Brechsandes gegenüber Natursand zurück. [20]

Die in [20] von Siebel et al. angestellte Vermutung, lässt sich anhand der hier vorgestellten Prüfergebnisse bestätigen.

Für die Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes des Betons wird wiederum mit dem Klimaschrank ICH C mit Kompressorkühlung, Feuchteregulierung und CO₂-Begasung der Firma Memmert durchgeführt.

Der Karbonatisierungswiderstand nimmt mit zunehmendem Brechsandanteil im Beton ab. In Tabelle 15 sind die Karbonatisierungskoeffizienten gegenübergestellt. Die Betone RC 100 bzw. RC 50/50, weisen einen 62,26 % bzw. 41,51 % höheren Karbonatisierungskoeffizienten auf, als der Referenzbeton RC N.

Beton	K _{AC} [mm/d ^{1/2}]	Zunahme K _{AC} gegenüber RC N [%]
RC 100	1,72	62,26
RC 50/50	1,50	41,51
RC N	1,06	Referenz

Abbildung 42: Gegenüberstellung - Karbonatisierungsgeschwindigkeit bzw. -koeffizient.

Die Karbonatisierungstiefen sowie die maßliche und prozentuale Abweichung gegenüber des Referenzbetons RC N, können Tabelle 16 entnommen werden. Während der Unterscheid der Karbonatisierungstiefen der Betone zu Beginn der CO₂-Beaufschlagung noch relativ gering ist, wird dieser mit fortschreitender Expositionsdauer zunehmend deutlich (Abbildung 43). Die Karbonatisierung ist beim Beton RC 100, nach 28 d bzw. 42 d, um 57,14 % bzw. 56,66 % weiter fortgeschritten, als beim Referenzbeton RC N. Für den Beton RC 50/50 liegt die Zunahme der Karbonatisierungstiefe nach 28 d bzw. 42 d, 36,55 % bzw. 40,81 % über dem Referenzwert.

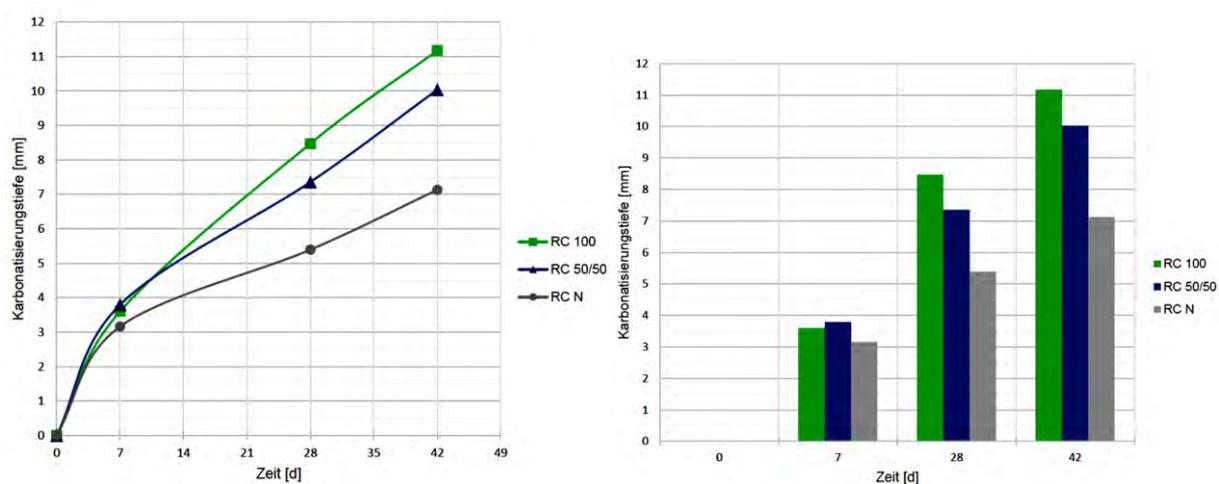


Abbildung 43: Gegenüberstellung - Zeitl. Verlauf d. Karbonatisierungstiefe (li.), Karbonatisierungstiefe nach Expositionsdauer (re.).

Beton	Karbonatisierungstiefe je Expositionsdauer			Zunahme d_k gegenüber RC-N					
	d_k , 7 d [mm]	d_k , 28 d [mm]	d_k , 42 d [mm]	7 d		28 d		42 d	
				[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
RC 100	3,60	8,47	11,17	0,44	13,92	3,08	57,14	4,04	56,66
RC 50/50	3,80	7,36	10,04	0,64	20,25	1,97	36,55	2,91	40,81
RC N	3,16	5,39	7,13	Referenz					

Abbildung 44: Abweichung des Karbonatisierungsfortschritts gegenüber Referenzbeton.

Der geringere Karbonatisierungswiderstand der Betone mit Betonbrechsand, lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die wiederum die Gaspermeabilität des Betons beeinflusst. [11] [18].

Im Rahmen anderer Forschungsarbeiten [18] [20] wurde der Karbonatisierungsfortschritt an RC-Betonen mit gleichwertiger Druckfestigkeit ermittelt. Diese wurde erreicht, indem der w/z-Wert durch einen höheren Zementanteil verringert wurde. Dementsprechend sind diese Forschungsergebnisse nur bedingt mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar.

Siebel et al. konnten in [20] keinen nachteiligen Einfluss von Betonbrechsand auf den Karbonatisierungswiderstand feststellen. Ferner wird in [18] ein positiver Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung beschrieben, der bei einem Austausch von 20 bzw. 50 Vol.-%, sowohl bei feiner, als auch bei grober rezyklierter Gesteinskörnung festgestellt wurde.

In [20] wird dieser positive Einfluss auf den Nachbehandlungseffekt, der durch das vorge-sättigte Rezyklat im Beton entsteht, zurückgeführt. Bei höheren Brechsandanteilen wird wiederum von einem geringeren Karbonatisierungswiderstand berichtet. [18]

Mit Chlorid-Diffusionskoeffizienten können sowohl die Stoffeigenschaften von Beton eingeschätzt als auch Transportvorgänge berechnet und modelliert werden. Diffusionskoeffizienten können i.d.R. jedoch nur in sehr zeitaufwendigen, teilweise über mehrere Monate dauernden Versuchen ermittelt werden. Eine gute Alternative bieten hier die sogenannten Schnell-Migrationsversuche. Die im Rahmen dieser Versuche ermittelbaren Chlorid-Migrationskoeffizienten stehen in direkter Korrelation zu Chlorid-Diffusionskoeffizienten und es besteht die Möglichkeit, innerhalb nur weniger Tage ein Versuchsergebnis zu erhalten. Ein weiterer großer Vorteil des Migrationsversuchs besteht auch darin, dass der Migrationskoeffizient zu einem bestimmten Alter des Betons ermittelt werden kann, während beim klassischen Diffusionsversuch nur ein mittlerer Diffusionskoeffizient über die gesamte Dauer des Versuchs ermittelt wird. Für die Bestimmung des Migrationskoeffizienten wird der RCM-Versuch nach Tang.

Der Chlorideindringwiderstand sinkt mit zunehmendem Betonbrechsandanteil. Abbildung 45 und Abbildung 46 sind die Ergebnisse der Chloridmigrationsprüfung gegenübergestellt.

Die Chlorideindringtiefe x_d (Abbildung 46; v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N) hat, aufgrund der unterschiedlichen Prüfspannungen, keine direkte Aussagekraft. Ein Vergleich der Betone untereinander, ist demzufolge erst nach Auswertung der Prüfergebnisse anhand des Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} möglich. Die Betone RC 100 bzw. RC 50/50, weichen mit einer Zunahme von 68,78 % bzw. 35,61 % vom Chloridmigrationskoeffizienten des Referenzbetons RC N ab.

Im BAW-Merkblatt - Chlorideindringwiderstand von Beton [43] der Bundesanstalt für Wasserbau sind in Abhängigkeit der Expositionsklasse, Grenzwerte für den Chloridmigrationskoeffizienten angegeben. Für die Expositionsklasse XD1 darf der Mittelwert $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ nicht überschritten werden. Der Referenzbeton unterschreitet diesen Grenzwert mit $9,80 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ um 2 %. Die Betone mit Brechsandanteil überschreiten den Grenzwert jeweils deutlich. Hierbei liegt der Chloridmigrationskoeffizient des Betons RC 100 mit $16,54 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ um 68,78 % über dem Grenzwert. Der Beton RC 50/50 weicht mit $D_{RCM} = 13,29 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ um 32,90 % vom Grenzwert ab.

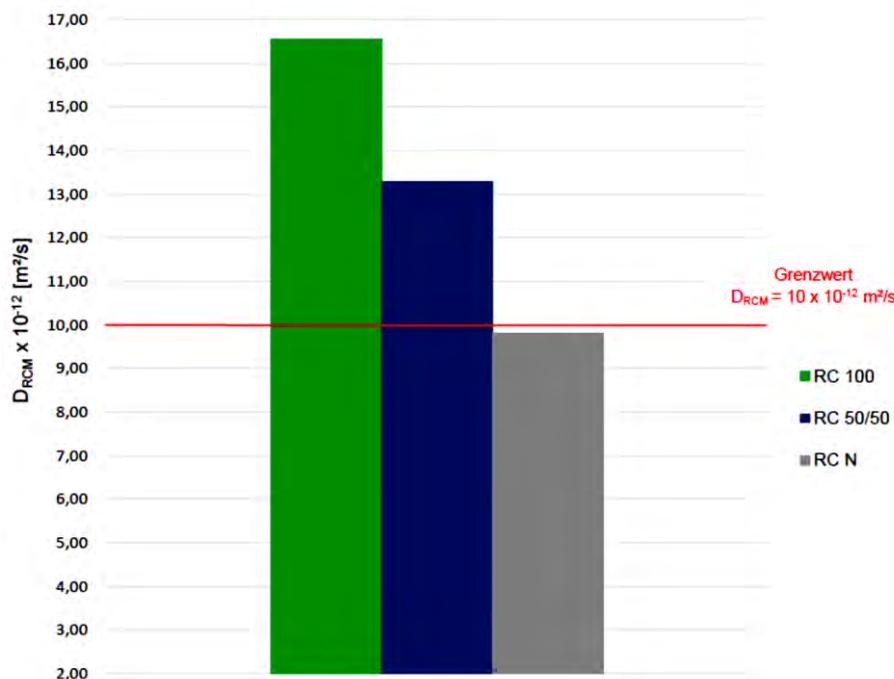


Abbildung 45: Chlorideindringwiderstand.

Beton	Prüfspannung U [V]	x_d [mm]	D_{RCM} [$\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	Zunahme D_{RCM} gegenüber RC N [%]	Abweichung von Grenzwert $D_{RCM} = 10 \times 10^{-12} \text{ [m}^2/\text{s]}$ [%]
RC 100	10	11,84	16,54	68,78	+ 65,40
RC 50/50	10	9,80	13,29	35,61	+ 32,90
RC N	15	10,76	9,80	Referenz	- 2,00

Abbildung 46: Gegenüberstellung - Chlorideindringwiderstand.



Abbildung 47: Gegenüberstellung – Chlorideindringtiefe an Probekörpern.

Der geringere Chlorideindringwiderstand der Betone mit Brechsandanteilen, steht in Zusammenhang mit der höheren Porosität sowie der Porenstruktur der rezyklierten Gesteinskörnung.

Chloride werden über das Porensystem in den Beton transportiert. Das Betongefüge ist, aufgrund des höheren Kapillarporenanteils der feinen Gesteinskörnung, weniger dicht. Folglich nimmt der Widerstand gegenüber Chlorideindringung in den Beton ab. [11][21]

In [18] wird von einer signifikanten Zunahme der Chlorideindringtiefe, bei steigendem Betonbrechsandanteil berichtet. Dieser Zusammenhang wurde ebenso im Rahmen der vorliegenden Arbeit festgestellt.

3.9 Modellierung der Dauerhaftigkeit

Das Modellieren der Dauerhaftigkeit erfolgt für die Karbonatisierung des Betons anhand des Wurzel-Zeit-Gesetzes. Die Modellierung der Dauerhaftigkeit, für das Eindringen von Chloriden in den Beton, basiert auf einer analytischen Lösung.

Es wird jeweils eine Zeitspanne, die Nutzungsdauer, berechnet bis die Karbonatisierungsfreie Bewehrung erreicht hat, bzw. bis der kritische Chloridgehalt innerhalb der Betondeckung im Bereich der Bewehrung erreicht ist. Dies führt in beiden Fällen zur Depassivierung des Bewehrungsstahles, welcher infolgedessen korrosionsbereit im Beton vorliegt.

Unter Berücksichtigung der gegebenen Parameter lässt sich, stark vereinfacht, die Nutzungsdauer abschätzen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Modellierung der Dauerhaftigkeit bzgl. Karbonatisierung bzw. Chlorideindringung, unabhängig voneinander erfolgen. Konkret bedeutet dies, dass der Einfluss der Karbonatisierung, die eine dichtere Betonstruktur bewirkt, bei der Berechnung des zeit- und tiefenabhängigen Chloridgehaltes unberücksichtigt bleibt. Somit handelt es sich um eine theoretische Berechnung, bei der die realen Bedingungen nicht abgebildet werden.

Um die Dauerhaftigkeit des Sandwichelementes zu modellieren, wird die Betondeckung mit $c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$ (Abbildung 48) entsprechend der konstruktiven Vorgaben, als Eingangsparameter herangezogen.

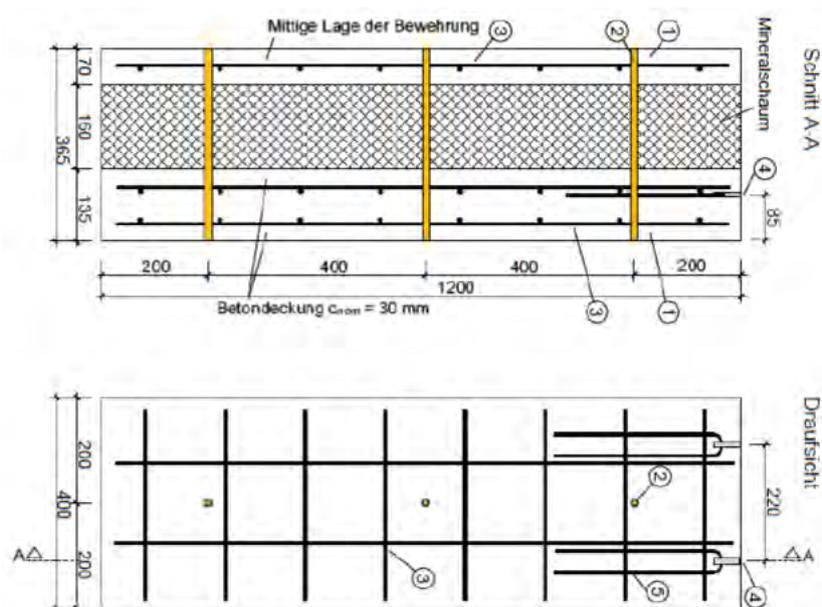


Abbildung 48: Sandwichelement im Querschnitt und Grundriss.

Ferner wird die Annahme getroffen, dass das Sandwichelement als Außenwand im Wohnungsbau verwendet wird. Entsprechend der Einwirkungen aus der Umgebung auf das Bauteil, ergibt sich die Zuordnung der Expositionsklassen XC4, XF1 sowie der Feuchtigkeitsklasse WF. Hieraus resultieren Anforderungen bezüglich des Zementgehaltes, des w/z-Wertes, der Druckfestigkeitsklasse sowie zur Betondeckung, die in Abbildung 49 zusammengestellt sind. [22]

Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklasse	Mindest-Zementgehalt Z_{min} [kg/m ³]	Wasser-Zement-Wert w/z _{max} [-]	Mindest-Druckfestigkeitsklasse	Mindest-Betondeckung c_{min} [mm]
XC4	280	0,60	C 25/30	25
XF1	280	0,60	C 25/30	keine Anforderung

Abbildung 49: Expositionsklassen Sandwichelement.

Um den Zeitpunkt zu berechnen, zu dem der Bewehrungsstahl infolge der Karbonatisierung depassiviert im Beton vorliegt, ist zunächst der Karbonatisierungskoeffizient K_{AC} , der anhand des beschleunigten Verfahrens ermittelt wurde, auf den Karbonatisierungskoeffizienten unter atmosphärischen Bedingungen K_{NAC} umzurechnen. Die erhöhte CO_2 -Konzentration CO_{2AC} betrug während des beschleunigten Verfahrens 3,00 Vol.-%. Die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre wird zu 0,035 Vol.-% angenommen.

Die Umrechnung erfolgt anhand der untenstehenden Formel. [23]

$$K_{NAC} = \frac{K_{AC}}{\left(\frac{CO_{2AC}}{CO_{2N}}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Durch Umformen, des erläuterten Wurzel-Zeit-Gesetzes, lässt sich schließlich die Zeit t , die als Nutzungsdauer bei der gegebenen Betondeckung $c_{nom} = 30$ mm betrachtet werden kann, berechnen. [11]

$$d_k = K_{NAC} \cdot \sqrt{t}$$

$$d_k = c_{nom}$$

$$t = \left(\frac{c_{nom}}{K_{NAC}} \right)^2$$

Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 50 zusammengefasst sowie in Abbildung 51 grafisch ausgewertet.

Beton	K_{AC} [mm/d ^{1/2}]	K_{NAC} [mm/d ^{1/2}]	K_{NAC} [mm/a ^{1/2}]	t [a]
RC 100	1,72	0,1858	3,549	71,45
RC 50/50	1,50	0,1620	3,095	93,96
RC N	1,06	0,1145	2,187	188,17

Abbildung 50: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung.

Zieht man die zur Planung vorgesehene Nutzungsdauer von 50 Jahren für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke entsprechend DIN EN 1990 (Eurocode 0) als Kriterium zur Bewertung der Dauerhaftigkeit heran, weisen alle im Rahmen dieser Arbeit geprüften Recycling-Betone, eine ausreichende Dauerhaftigkeit in Bezug auf die Karbonatisierung auf.

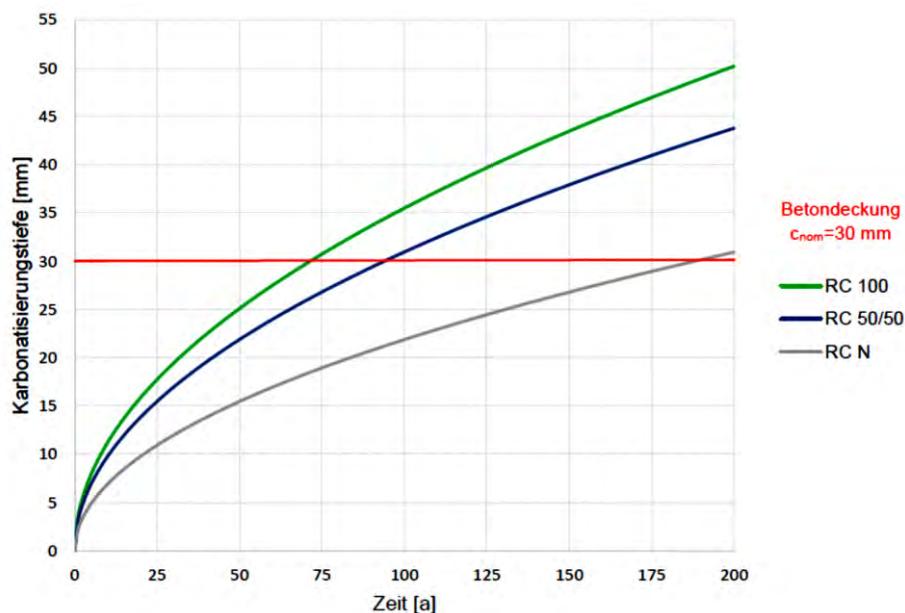


Abbildung 51: Graph. Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung.

Die Dauerhaftigkeit eines chloridbeanspruchten Betonbauteils, lässt sich analytisch mithilfe der untenstehenden Gleichung berechnen. Hierbei ist zu prüfen, ob der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt C_{crit} innerhalb der Betondeckung, während der vorgesehenen Nutzungsdauer erreicht bzw. überschritten wird.

Zunächst ist der zeitabhängige offensichtliche Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app}(t)$ zu berechnen.

Hierzu wird der Chloridmigrationskoeffizient D_{RCM} , der bei der Prüfung des Chlorideindringwiderstandes ermittelt wurde, angesetzt. Darüber hinausgehen das Betonalter bei der Migrationsprüfung t_{28} [s] sowie die jeweilig betrachtete Zeit t [s] mit in die Berechnung ein. Der von der Zementart abhängige Alterungsexponent n ergibt sich nach Gehlen [13] für den verwendeten Portlandzement (CEM I) zu $n = 0,30$.

$$D_{app}(t) = D_{RCM} \cdot \left(\frac{t_{28}}{t}\right)^n$$

Zur Berechnung des zeit- und tiefenabhängigen Chloridgehaltes $C(x,t)$ im Bereich der Bewehrung, wird für die Bauteiltiefe x , das Nennmaß der Betondeckung C_{nom} angesetzt. Die genaue Chloridbeaufschlagung des Bauteils ist unbekannt. Es wird jedoch von einer tendenziell geringen Beanspruchung, durch Chloride aus Taumitteln ausgegangen. Zudem erfolgt die Beaufschlagung von Betonbauteilen mit Tausalzen in aller Regel saisonal. In [24] sind Oberflächenkonzentrationen für Umgebungsbedingungen, entsprechend der Expositions klasse XD1, im Bereich von 0,5 - 1,5 M.-%/Zementgehalt angegeben. Für die Modellierung der Dauerhaftigkeit des Sandwichelementes, wird $C_s = 0,5$ M.-%/ Zement sowie $C_s = 0,75$ M.-%/Zement angenommen. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt wird zu $C_{crit} = 0,40$ M.-%/Zement angesetzt. [21]

$$x = c_{nom}$$

$$C(x, t) = C_s \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right) \right]$$

Die Berechnungsergebnisse sind in Abbildung 52 bzw. Abbildung 53 zusammengefasst sowie in Abbildung 54 bzw. Abbildung 55 grafisch ausgewertet.

Beton	D_{RCM} [x 10 ⁻¹² m ² /s]	$D_{app}(t)$ [x 10 ⁻¹² m ² /s]			$C(x,t)$ [M.-%/Zement]			t bis C_{crit} bei C_{nom} [a]
		20 [a]	50 [a]	120 [a]	20 [a]	50 [a]	120 [a]	
RC 100	16,54	3,12	2,37	1,82	0,32	0,36	0,40	123
RC 50/50	13,29	2,50	1,90	1,46	0,30	0,35	0,39	168
RC N	9,80	1,85	1,40	1,08	0,27	0,33	0,37	> 200

Abbildung 52: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung bei $C_s = 0,5$ M.-%/Zementgehalt.

Beton	D_{RCM} [x 10 ⁻¹² m ² /s]	$D_{app}(t)$ [x 10 ⁻¹² m ² /s]			$C(x,t)$ [M.-%/Zement]			t bis $C_{crit.}$ bei C_{nom} [a]
		10 [a]	20 [a]	50 [a]	10 [a]	20 [a]	50 [a]	
RC 100	16,54	3,84	3,12	2,37	0,41	0,47	0,55	9
RC 50/50	13,29	3,08	2,50	1,90	0,37	0,45	0,52	13
RC N	9,80	2,27	1,85	1,40	0,32	0,40	0,49	20

Abbildung 53: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung bei $C_s = 0,75$ M.-%/Zementgehalt.

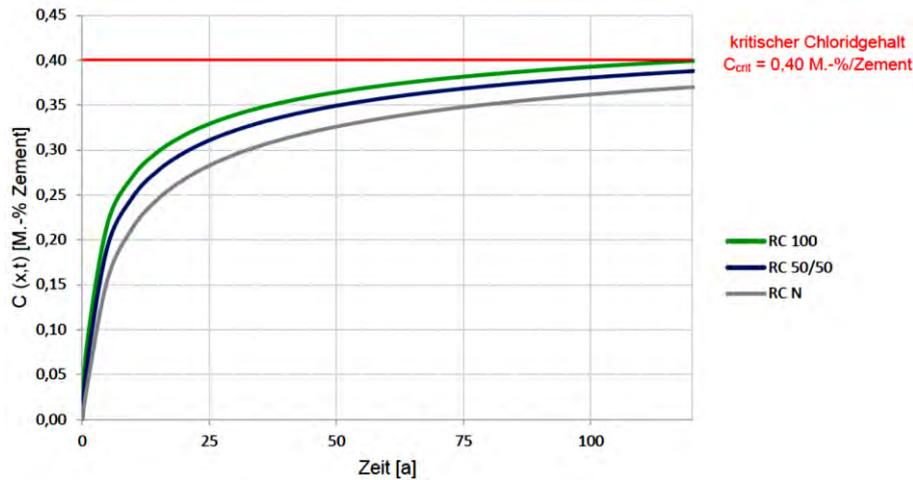


Abbildung 54: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei $C_s = 0,5$ M.-%/Zement.

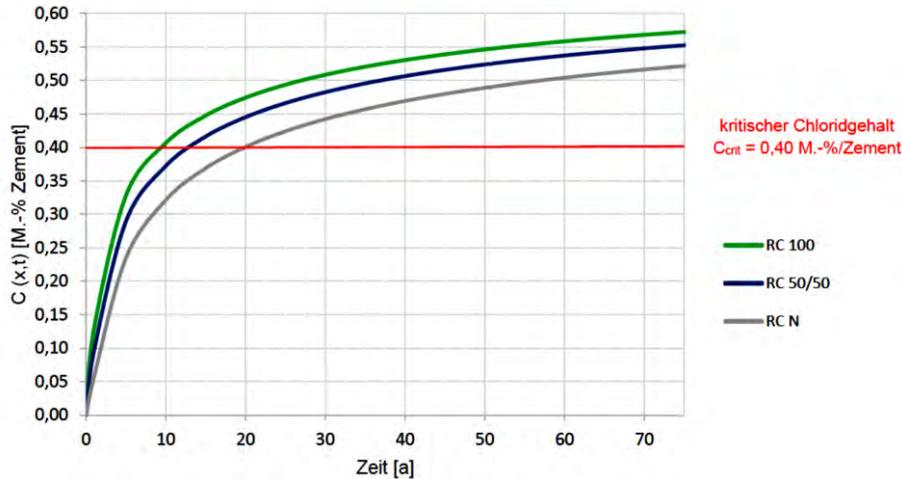


Abbildung 55: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei $C_s = 0,75$ M.-%/Zement.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zur Dauerhaftigkeit der Betone beim Eindringen von Chloriden, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Intensität der Chloridbeaufschlagung. Während die Dauerhaftigkeit der untersuchten Betone bei einer Chloridoberflächenkonzentration von $C_s = 0,5$ M.-%/Zement gegeben ist, erreicht der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt, die Bewehrung bei $C_s = 0,75$ M.-%/Zement bereits innerhalb deutlicher kürzerer Zeitspannen. Somit wäre die zur Planung vorgesehene Nutzungsdauer von 50 Jahren, für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke gemäß DIN EN 1990 (Euro-

code 0) und damit die Dauerhaftigkeit der untersuchten Betone, nicht gegeben. Entsprechend der Verwendung des Sandwichelementes als Außenwand im Wohnungsbau, stellt die Beanspruchung durch Chloride aus Tausalzen jedoch keine relevante Umwelteinwirkung dar [22]. Des Weiteren ist die Verwendung von rezykliertem Gesteinskörnung, bei chloridbeanspruchten Betonbauteilen normativ nicht vorgesehen. Damit bestätigt sich die Regelung der DAfStb-Richtlinie bezüglich der Einschränkungen bei den Expositionsklassen.

Zur Bewertung der Dauerhaftigkeit erfolgte ein Vergleich der Prüfergebnisse mit Grenzwerten aus Regelwerken oder Zielwerten, die sich aus den Anforderungen der Expositionsklassen ergeben. Darüber hinaus werden die Betone untereinander verglichen. Hierbei dient ein normkonform hergestellter Recyclingbeton als Referenz. Die Dauerhaftigkeit wird für die Karbonatisierung des Betons, anhand des Wurzel-Zeit Gesetzes modelliert. Für das Eindringen von Chloriden in den Beton, wird eine analytische Lösung zur Modellierung der Dauerhaftigkeit herangezogen.

Es ist festzustellen, dass die Verwendung von Betonbrechsand, auch bei vollständigem Ersatz des Natursandes, zu adäquaten Frisch- und Festbetoneigenschaften führt. Die Materialwiderstände nehmen in der Regel mit zunehmendem Recyclingsandanteil ab, erfüllen aber zumeist dennoch die dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen. Dabei ist die Veränderung der Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit des Recyclingsandanteils, auf die Beschaffenheit der feinen rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen, die aufgrund des anhaftenden Zementsteins, eine geringere Festigkeit, höhere Porosität sowie andersartige Porenstruktur, als Natursande aufweist. Die Herstellung dauerhafter Recyclingbetone, mit bis zu 100 % Betonbrechsandanteil, ist demnach möglich. Dabei sollte bei der Betonkonzeption, der Anteil des Recyclingsandes, auf die typischen Umgebungsbedingungen des Bauteils abgestimmt werden. Bei chloridbeanspruchten Betonbauteilen, sollte von einer Verwendung von Betonbrechsand im Beton abgesehen werden.

Beton	Materialwiderstand	Dauerhaftigkeitskennwert	Grenz- bzw. Zielwert	Prüf- ergebnis
RC 100	„Dauerhaftigkeit“	Druckfestigkeit	C 25/30	C 20/25
RC 50/50				C 25/30
RC N				C 30/37
RC 100	Wassereindringwiderstand	Wassereindringtiefe unter Druck	< 30,0 mm	20,3 mm
RC 50/50				17,0 mm
RC N				16,0 mm
RC 100	Karbonatisierungs- widerstand	Karbonatisierungsgeschwindigkeit (Karbonatisierungskoeffizient)	50 Jahre	71 Jahre
RC 50/50				94 Jahre
RC N				188 Jahre
RC 100	Frost-Tausalz-Widerstand	Flächenbezogene Abwitterung	< 1,50 kg/m ²	1,256 kg/m ²
RC 50/50				1,646 kg/m ²
RC N				0,714 kg/m ²
RC 100	Chlorideindringwiderstand	Chloridmigrationskoeffizient	< 10 x 10 ⁻¹² m ² /s	16,54 x 10 ⁻¹² m ² /s
RC 50/50				13,29 x 10 ⁻¹² m ² /s
RC N				9,80 x 10 ⁻¹² m ² /s

Abbildung 56: Zusammenfassung der Dauerhaftigkeits-Ergebnisse.

Die Druckfestigkeit von Betonen, dient im Rahmen der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbeurteilung, als Kennwert zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen, wird mit den Expositionsklassen eine Mindestdruckfestigkeitsklasse gefordert. Die Untersuchung der Recyclingbetone hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit, führt zu der Erkenntnis, dass die Druckfestigkeit mit zunehmendem Brechsandanteil im Beton sinkt. Die Festigkeitseinbußen durch die Verwendung von Betonbrechsand, sind im Wesentlichen auf die geringere Festigkeit und damit verbunden, auf die höhere Porosität des Betonbrechsandes im Vergleich zu Natursand, zurückzuführen. Dies ist wiederum, durch den höheren Anteil von anhaftendem Zementstein an der der feinen rezyklierten Gesteinskörnung bedingt. Darüber hinaus ist ein Zusammenhang von Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte festzustellen. Mit zunehmendem Brechsandanteil nimmt, neben der Druckfestigkeit, auch die Festbetonrohddichte ab. Dies ist auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung, insbesondere des Brechsandes, zurückzuführen.

Bei einem Betonbrechsandanteil von 100 % (RC 100) wird die, in den Expositionsklassen geforderte Druckfestigkeitsklasse, um eine Klasse unterschritten und damit nicht erreicht. Der Recyclingbeton, mit je 50 % Betonbrechsand bzw. Natursand (RC 50/50), erreicht die Mindestdruckfestigkeitsklasse. Der normkonforme Recyclingbeton RC N übertrifft die geforderte Mindestdruckfestigkeit um eine Druckfestigkeitsklasse.

Anhand der Wassereindringtiefe, lässt sich die Wasserpermeabilität der Betone beurteilen. Mit zunehmendem Brechsandanteil steigt die Wassereindringtiefe in den Beton. Dies lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die zu einem weniger dichten Betongefüge führt.

Die ermittelten Wassereindringtiefen liegen jeweils unterhalb des Grenzwertes, somit ergibt sich für die untersuchten Recyclingbetone ein jeweils ausreichender Wassereindringwiderstand.

Der Karbonatisierungswiderstand ist ein Maß für die CO₂-Permeabilität der Betone. Mit zunehmendem Brechsandanteil nimmt der Karbonatisierungswiderstand ab. Dies ist auf die höhere Porosität des Betonbrechsandes, im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung zurückzuführen. Anhand der ermittelten Karbonatisierungskoeffizienten, wird mithilfe des Wurzel-Zeit-Gesetzes, die Zeit bis zur Depassivierung des Bewehrungsstahls berechnet. Die vorgesehene Nutzungsdauer, die den Expositionsklassen zugrunde liegt, wird von den untersuchten Recyclingbetonen jeweils deutlich übertroffen.

Die Verwendung von Betonbrechsand in Beton führt zu einer Abnahme des Frost-Tausalz-Widerstandes. Hierbei wird die kapillare Wasseraufnahme in den Beton, durch die höhere Kapillarporosität der Betone mit Brechsandanteilen, begünstigt. Dies resultiert in einer größeren Menge potentiell gefrierbaren Wassers im Beton, das beim Gefrieren zu Eis aufgrund seiner Volumenzunahme eine Schädigung des Betons herbeiführt. Für den Beton mit 100 % Brechsandanteil (RC 100) sowie für den normkonformen Beton (RC N), kann ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand, anhand der flächenbezogenen Abwitterung, nachgewiesen werden.

Der Chlorideindringwiderstand sinkt mit zunehmendem Betonbrechsandanteil. Der höhere Kapillarporenanteil des Betonbrechsandes führt, zu einem weniger dichten Betongefüge. Dies begünstigt den Transport von Chloriden in den Beton. Die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Brechsandanteilen (RC 50/50; RC 100) überschreiten den geltenden Grenzwert jeweils deutlich. Anhand der ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten wurde die Nutzungsdauer bei Chloridbeanspruchung modelliert. Dies führt zu dem Ergebnis, dass die Dauerhaftigkeit bei Chloridoberflächenkonzentrationen $> 0,50 \text{ M.-%/Zementgehalt}$ nicht gegeben ist.

Bei einer Novellierung der Regelwerke, sollte eine differenzierte Verwendung von Betonbrechsand der Korngruppe 0/4 in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ermöglicht werden. Daraus würden sich, entsprechend des facettenreichen Einsatzes von Beton, vielfältige Verwendungsmöglichkeiten für Betone mit feiner rezyklierter Gesteinskörnung, darbieten.

Der differenzierten Verwendung von hohen Betonbrechsandanteilen in RC-Betonen, steht in Bezug auf die Dauerhaftigkeit, nichts entgegen, sodass unbewehrte Bauteile, Innenbauteile sowie Außenbauteile mit geringer Beanspruchung aus der Umgebung, mit bis zu

100 % Betonbrechsand hergestellt werden könnten, sofern es die statischen Erfordernisse erlauben. Für die Verwendung in weiteren Betonbauteilen, sollte der Recyclingsandanteil in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (Expositionsklassen) festgelegt werden. Hierbei sollte es die Maßgabe sein, einen höchstzulässigen Recyclingsandanteil je Expositionsklasse, in den Regelwerken zu definieren, der die Abwägung der ökologischen sowie technologischen Vor- und Nachteile, die sich durch die Verwendung von Recyclingsand ergeben, berücksichtigt.

Gelingt es, neben einer Anpassung der Regelwerke, zudem ökonomische Anreize durch beispielsweise staatliche Förderungen, für die Verwendung von feiner und grober rezykliertem Gesteinskörnungen im Beton zu schaffen, könnte das Bauwesen einen enormen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten.

4 Sandwichkonstruktion

Die Arbeitspakete des dritten Teilbereiches behandeln die Entwicklung der Sandwichkonstruktion. Hierfür werden zunächst bauphysikalisch und mechanisch effektive Verbindungstechniken für die Verbindung des mineralisierten Dämmschaums mit dem Recycling-Beton entwickelt, aus denen im Anschluss das Verankerungskonzept für das |2CO2|sandwich erarbeitet wird. Im nächsten Schritt werden in enger Kooperation der Projektpartner industrielle Produktionstechniken für die Herstellung der Sandwichkonstruktion entwickelt und bei einem ersten gemeinsamen Betonagetermin (Normalbeton mit mineralisiertem Dämmschaum) auf dessen Praxistauglichkeit überprüft. Daraufhin werden die Sandwichelemente mit dem entwickelten Recycling-Beton hergestellt, sowie die mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems überprüft.

4.1 Entwicklung effektiver Verbindungstechniken

Zur Kopplung der Vorsatz- und Tragschale ist die Entwicklung einer geeigneten Verbindungstechnik notwendig. Fehlt eine solche Verbindung können schon beim Herstellungsprozess erhebliche Probleme, wie beispielsweise das Abgleiten von einzelnen Schichten des Sandwich-Elementes, auftreten (Abbildung 57). Folglich muss eine geeignete Verbindungstechnik für das geplante |2CO2|sandwich entwickelt werden.



Abbildung 57: Abgleiten von Schichten bei fehlender Verbindungstechnik.

Betonsandwichelemente weisen in der Regel einen dreischichtigen Aufbau, bestehend aus einer Vorsatzschale, einer Dämmschicht und einer Tragschale auf (Abbildung 58). Die Vorsatz- und Tragschale bestehen im Normalfall aus Normalbeton und im Rahmen dieses Forschungsprojekts aus Recycling-Beton. Die Vorsatzschale ist üblicherweise zwischen 7 cm und 12 cm dick, dient als architektonisches Gestaltungselement und erfüllt

die Funktion des Witterungsschutzes für den Wärmedämmstoff. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird eine Reduktion der Dicke von Vorsatzschale und Tragschale angestrebt.

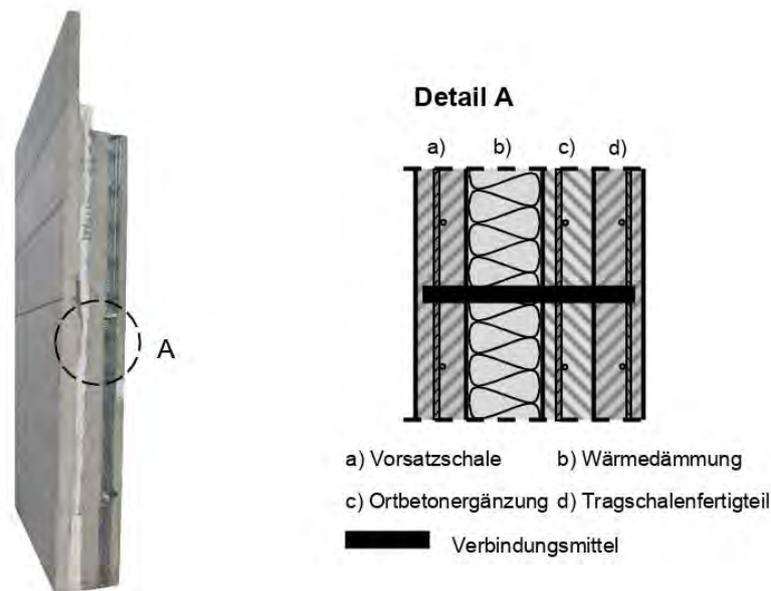


Abbildung 58: Querschnitt einer Betonsandwichwand aus DAfStb Heft 615.

Zur Kopplung der Vorsatz- und Tragschale werden linien- oder punktförmige Verbindungsmittel verwendet. Dabei wird üblicherweise ein System aus Trag- und Halteankern eingesetzt. Schubweiche Halteanker übertragen ausschließlich Normalkräfte, schubsteife Traganker übertragen sowohl Normal- als auch Querkräfte. Bei der Anordnung der Traganker wird eine statisch bestimmte Lagerung der Vorsatzschale angestrebt, um Zwang infolge thermischer und hygrischer Einwirkungen zu vermeiden.

Die Verbindungsmittel bestehen aus korrosionsbeständigen Werkstoffen wie nichtrostenden Stahl nach Z-30.3-6 oder aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Zur Verbindung der Betonschichten sollen Verbindungsmittel mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit verwendet werden, um Wärmebrücken zu verhindern. Dazu bieten sich Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff an.

Eine Marktübersicht vorhandener Verbindungsmittel aus glasfaserverstärktem Kunststoff sowie deren Kenngrößen sind in Abbildung 59 und Tabelle 14 zusammengestellt. Dabei werden die Verbindungsmittel entweder über eine Hinterschnittgeometrie oder über einen konstanten Verbund verankert. Da die Verankerung in dünnen Deckschichten mit ca. 40 mm Dicke ausgeführt werden sollen, wurde nachfolgend der Isolink weiter betrachtet.



Abbildung 59: Übersicht über Verbindungsmittel für Betonsandwich-Elemente.

Tabelle 14: Kenngrößen von Kunststoffverbindungsmitteln

Bezeichnung		Isolink	ThermoPin	TM-MC Anker
Materialzusammensetzung				
Matrixwerkstoff		Vinylesterurethanharz (VEU)	Epoxidharz	Vinylester (VE)
Faserwerkstoff		ECR-Glas	Glas	Borosilikatglas (E-Glas)
Faseranteil	Gew.-%	87,1	k.A.	74
	Vol.-%	74,3	k.A.	53
Oberfläche		gerippt	gewickelt	glatt
Oberflächenschutz		Schutzlack aus VE-Harz	k.A.	k.A.
Mechanische Kenngrößen				
min. Zugfestigkeit $f_{tk=yk}$	[N/mm ²]	1.000	1.500	700
Zug-E-Modul E_t	[N/mm ²]	60.000	60.000	40.000
Biege-E-Modul E_B	[N/mm ²]	60.000	60.000	30.000
Dichte	[g/cm ³]	2,2	2,0	1,85
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	< 0,5	0,48	k.A.

4.2 Erarbeitung eines Verankerungskonzeptes

Zur Bewertung der Verankerung der Verbindungsmittel im Beton der Vorsatzschalen werden statische Auszugversuche an der TU Kaiserslautern durchgeführt. Dabei wird die Einbindetiefe im Bereich zwischen 40 mm und 100 mm variiert. Die Betondruckfestigkeitsklasse der Serien beträgt C20/25. Der Versuchsaufbau sowie das typische Versagensbild Betonausbruch sind in Abbildung 60 dargestellt.

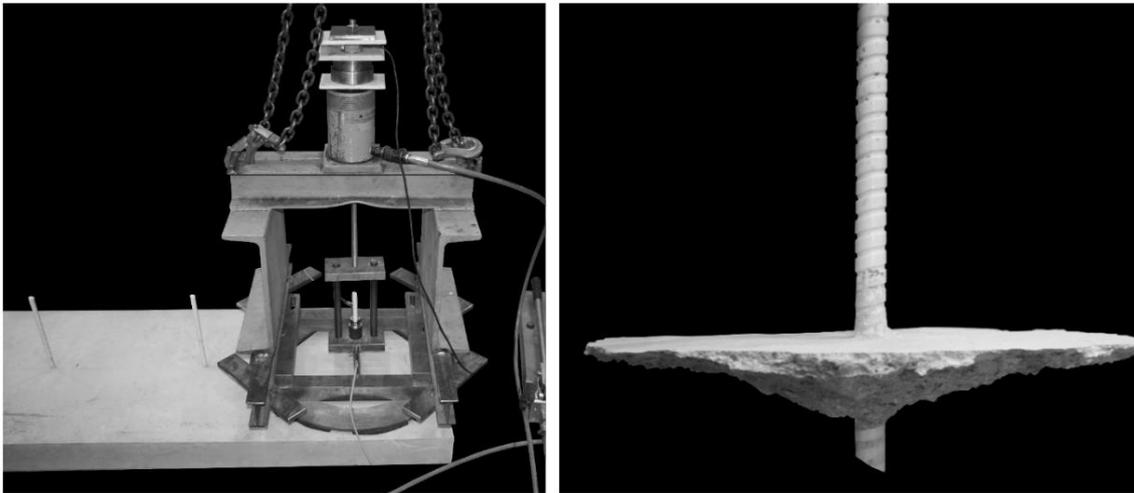


Abbildung 60: Auszugversuche am Isolink-Verbindungsmittel - Versuchsaufbau (links); typisches Versagensbild Betonausbruch (rechts).

Die Ergebnisse der Auszugversuche am Isolink-Verbindungsmittel sind in Abbildung 61 zusammenfassend dargestellt. Die Nachrechnung der experimentellen Ergebnisse erfolgt in Anlehnung das Vorgehen zur Bewertung metallischer Verbunddübel nach DIN EN 1992-4. Der Beiwert k_3 wurde aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen ermittelt und beträgt $k_{3,ucr} = 11,64$. Die effektive Einbindetiefe h_{ef} des Verbindungsmittels berechnet sich unter Berücksichtigung des Außendurchmessers $d_A = 13,5$ mm zu:

$$h_{ef} = h_{nom} - \tan(30) \cdot d_A \cdot 0,5$$

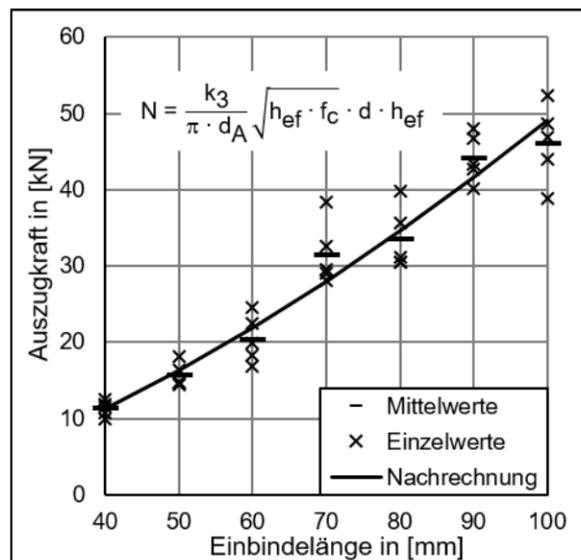


Abbildung 61: Auszugskraft der Isolink-Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Einbindetiefe.

Die Ergebnisse der Auszugversuche bilden eine weitere Grundlage für den statisch-konstruktiven Entwurf des Sandwichwandelementes, das im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelt wird.

4.3 Entwicklung industrieller Produktionstechniken der Sandwichkonstruktion

Die Herstellung der Sandwichelemente mit Deckschichten aus Recyclingbeton und einem mineralischen Kern aus ultraleichtem Mineralschaum im Fertigteilwerk erfolgt mittels Negativverfahren. Dabei ist die Produktion in Umlauf-, Aggregat- und Standfertigung unterschiedlicher Automatisierungsgrade möglich.

Als Zielvorgabe für eine industrielle Produktion der Wandelemente wird eine maximal eintägige Aushärtezeit des Mineralschaums definiert, um ein betonieren auf dem Mineralschaum zu ermöglichen. Dies ermöglicht perspektivisch die Einhaltung bestehender Umlaufzeiten bei der Verwendung des neuartigen Produktionsverfahrens. Diese Zielvorgaben wurden im Mischungsentwurf in Kapitel 2 berücksichtigt.

Weitere Zielvorgabe ist, dass der Mineralschaum ohne große Vorlaufzeiten und in ausreichendem Maße zur Verfügung steht. Dies konnte im Rahmen des Forschungsprojektes durch ein Chargenweises vormischen der Zementsuspension, ein zwischenspeichern dieser und einer kontinuierlichen Generation des Wasserschaums sichergestellt werden.

Die erfolgreichen Probestonagen im Werk Zuber sind in den folgenden Kapiteln dokumentiert. Zusätzlich wurden durch die Firma Röser weitere Herstellungsversuche im eigenen Werk durchgeführt, insbesondere um die Übertragbarkeit der gewählten Herstellungsmethodik sowie die Robustheit des ambitioniertesten RC-Beton-Mischungsentwurf RC 100 bzw. M-RC zu prüfen (siehe folgende Bilddokumentation).





4.4 Herstellung der Sandwichelemente

In der ersten Projekthälfte werden auf Grundlage der Ergebnisse der vorausgegangenen Arbeitspakete industrielle Produktionstechniken der Sandwichkonstruktion entwickelt. Die Praxistauglichkeit des entwickelten Herstellungsverfahrens für das |2CO2|sandwich wurde an dem ersten Betoniertermin der Sandwichkonstruktion am 09.03.2020 und 10.03.2020 bei der Firma Zuber Betonwerk GmbH & Co. KG in Crailsheim überprüft.

Die Schalungen der Elemente werden hinter einander auf dem Rüttel-Kipptisch platziert. Dies ermöglicht einen durchgängigen Betonierprozess mittels Betonierkübel. Zunächst wird dann die Vorsatzschicht bewehrt, betoniert und mithilfe des Rütteltisches verdichtet. Im Anschluss wird der mineralisierte Dämmschaum direkt auf den Beton der Vorsatzschicht gegeben, auf der gewünschten Höhe (in Abhängigkeit der Dicke der Dämmschicht) abgezogen und die Verbindungsmittel in den frischen Mineralschaum eingebracht. Wenn der mineralisierte Schaum eine ausreichende Festigkeit besitzt, kann die Tragschicht des

Sandwich-Elementes bewehrt, betoniert und mithilfe einer Rüttelflasche verdichtet werden. Die Elemente werden vom Kipptisch mit Kraneinsatz an den mit Rd-Anker befestigten Seilschlaufen abgehoben.

Die einzelnen Prozessschritte werden im Detail nachfolgend anhand der praktischen Herstellung im Werk erläutert.

Am 09.03.2020 und 10.03.2020 wurden bei der Firma Zuber Betonwerk GmbH & Co. KG in Crailsheim erste Sandwichelemente hergestellt. Alle Parteien des Kooperationsprojektes waren an diesem Termin beteiligt (Abbildung 62). Nur durch das umfassende Know-How aller Projektpartner konnte die Herstellung der ersten Sandwich-Elemente reibungslos stattfinden.



Abbildung 62: Projektteam bei dem ersten Herstellungstermin der Sandwich-Elemente bei der Firma Zuber in Crailsheim.

Anstelle des Recyclingbetons für die äußeren Schalen des Elementes wurde zunächst die Standard-Mischung von Zuber eines C35/45 Betons verwendet. Der mineralisierte Schaum wurde von der Firma Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. KG vor Ort im Werk von Zuber hergestellt. Hierfür wurde die gesamte Mischanlage zur Herstellung des mineralisierten Schaums in das Werk von Zuber in Crailsheim transportiert.

An beiden Tagen wurden in Summe 30 Sandwich-Elemente hergestellt. 20 Elemente wurden mit dem mineralisierten Dämmschaum der Firma Röser in drei verschiedenen Dicken (120 mm, 160 mm und 200 mm) realisiert. Weitere sieben Elemente wurden mit dem

Dämmstoff EPS mit einer Dicke von 160 mm hergestellt und drei Sandwich-Elemente enthielten keinen Dämmstoff. Die hergestellten Elemente dienen umfangreichen experimentellen Untersuchungen (vorwiegend Scherversuche). Die Wahl der verschiedenen Dämmstoffe dient dabei dem Vergleich des entwickelten Dämmschaums mit konventionell verwendeten Materialien bezüglich der Performance im Bauteil. Exemplarisch ist das Sandwich-Element mit einer 160 mm dicken Dämmschicht mit dem mineralisierten Dämmschaum in Abbildung 63 dargestellt. Als Verbindungsmittel wurden nach obigen Ausführungen Schöck Isolink Typ TA-H verwendet.

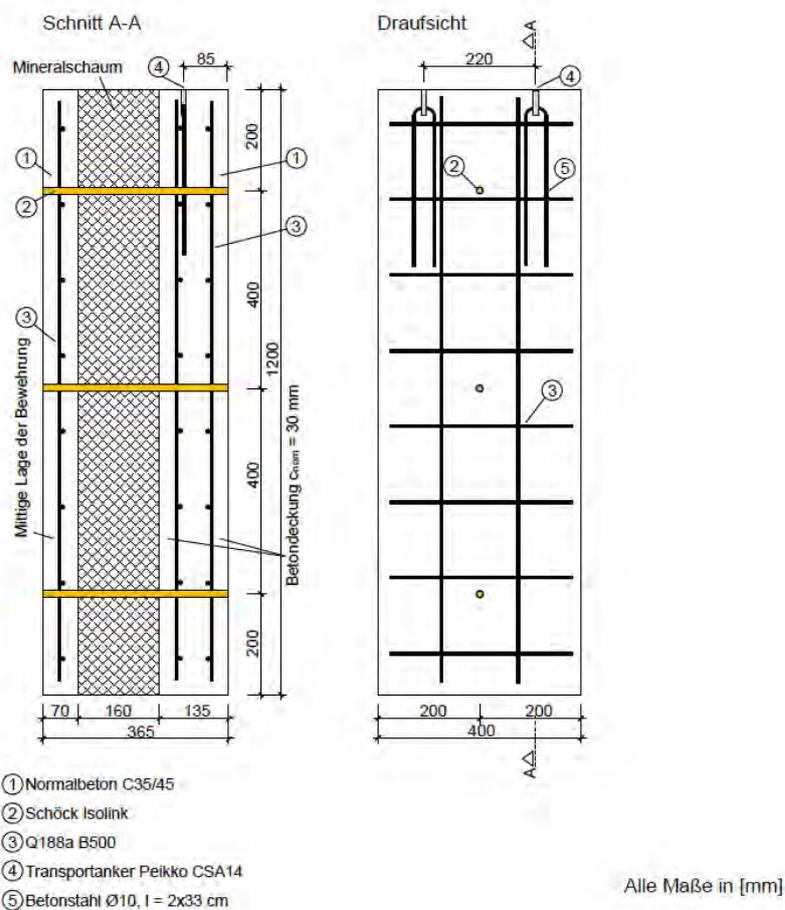


Abbildung 63: Sandwich-Element mit 160 mm mineralisierter Dämmschaum-Schicht.

Für die Herstellung der Sandwich-Elemente wurden zunächst die Schalungen hergestellt. Die Elemente weisen jeweils Abmessungen von 40 cm in der Breite und 120 cm in der Höhe auf. Die Holzschalungen wurden auf einem Rütteltisch wie in Abbildung 64 dargestellt platziert. Anschließend wurde die Bewehrung eingebracht (Abbildung 65).



Abbildung 64: Schalungen auf dem Rütteltisch.



Abbildung 65: Bewehrung der Vorsatzschicht.

Der Beton für die Trag- und Vorsatzschicht des Sandwich-Elementes wurde in der Mischanlage der Firma Zuber hergestellt. Der Beton hat die Festigkeitsklasse C35/45 mit einem Größtkorn von 8 mm für die Vorsatzschicht und 16 mm für die Tragschicht. Das Einbringen der Vorsatzschicht mit einer Höhe von 7 cm erfolgte für alle Elemente mithilfe eines Betonierkübels. Die Verdichtung wurde mit dem Rütteltisch durchgeführt. Anschließend wurde der mineralisierte Schaum wie obig im Detail beschrieben von Mitarbeitern der Firma Röser hergestellt und auf die Vorsatzschicht aufgebracht (Abbildung 67; Abbildung 68). Der mineralisierte Schaum wurde mithilfe einer Holzvorrichtung in der jeweiligen Höhe abgezogen (Abbildung 69). Im nächsten Schritt wurden pro Element jeweils drei Verbindungsmittel (Schöck Isolink TA-H) eingebracht (Abbildung 71).

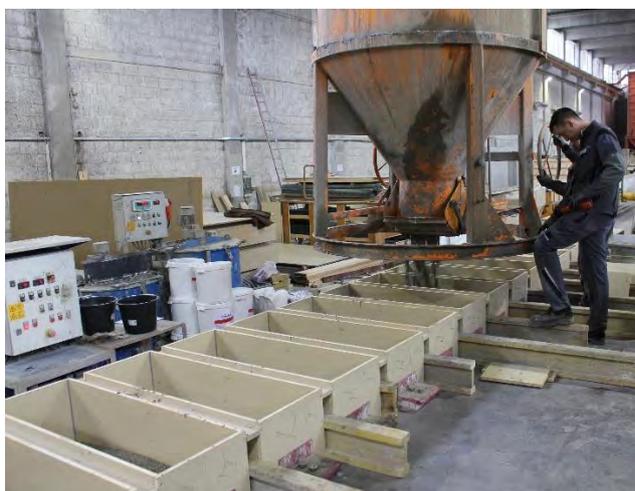


Abbildung 66: Betonage der Vorsatzschicht mit Betonierkübel.



Abbildung 67: Einbringen des mineralisierten Dämmschaums.



Abbildung 68: Eingebrachter mineralisierter Dämmschaum.

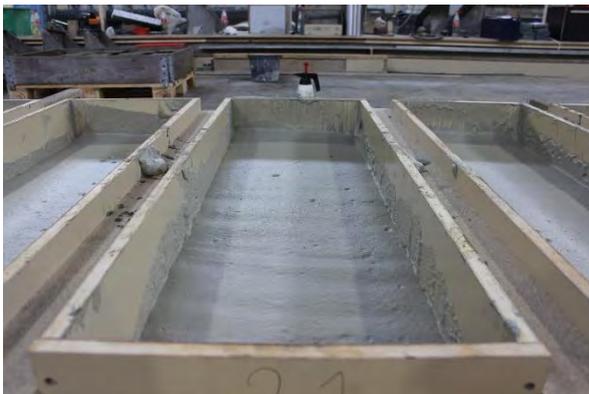


Abbildung 69: Abzug des mineralisierten Dämmschaums.



Abbildung 70: Abgezogene Oberfläche des mineralisierten Dämmschaums.

Abbildung 71: Einbringen der Verbindungsmittel.

Nachdem der mineralisierte Schaum 24 Stunden aushärtete, wurde die Bewehrung für die zweite Betonschicht eingebracht (Abbildung 72). Als Anschlagmittel wurde ein Rd-Anker (16 mm) mit Seilschlaufen gewählt (Abbildung 73).

Im Anschluss wurde der Beton für die Tragschicht eingebracht (Abbildung 74). Die Verdichtung erfolgte mithilfe einer Rüttelflasche (Abbildung 75). Ein bedeutendes Ziel der Entwicklung wird in der kommenden Projektphase sein, ein schnelleres Aushärten des mineralisierten Schaums zu erreichen, sodass das Einbringen der zweiten Betonschicht (Tragschicht) zeitnaher erfolgen kann. Hierfür ist insbesondere die Anpassung des Zeitpunkts der Dosierung des Beschleunigers angedacht.

Die fertig betonierten Sandwich-Elemente sind in Abbildung 76 dargestellt.



Abbildung 72: Bewehrung der Tragschicht.



Abbildung 73: Rd-Anker 16 mm.



Abbildung 74: Betonage der Tragschicht mit Betonierkübel.



Abbildung 75: Verdichtung mit Rüttelflasche.

Zum Ausschalen der Sandwich-Elemente wurden Seilschlaufen an die Rd-Anker befestigt, sodass die Bauteile durch ein Aufstellen des Kipptisches abgehoben werden konnte.

Am 18.11.2020 und 19.11.2020 wurden weitere Probekörper für Scher- und Biegeversuche im Betonfertigteilwerk der Firma Zuber in Crailsheim hergestellt. Die Produktion der Probekörper orientierte sich dabei an dem zuvor beschriebenen Vorgehen. Abweichend wurde dabei der im Forschungsprojekt entwickelte Recyclingbeton für die Betondeckschichten eingesetzt.



Abbildung 76: 30 hergestellte Sandwich-Elemente.

4.5 Prüfung der mechanischen Eigenschaften des Gesamtsystems

Die im Betonfertigteilwerk der Firma Zuber in Crailsheim hergestellten Probekörper werden nach dem Ausschalen zum Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern transportiert. An den Probekörpern werden anschließend Scherversuche unter kurz- und langzeitiger Belastung durchgeführt. Dabei stand die Identifikation maßgebender Tragmechanismen im Fokus der Betrachtung.

Der Versuchsaufbau für die statischen Scherversuche ist in Abbildung 77 dargestellt. Vor Versuchsbeginn kann aufgrund des Schwindes des Mineralschaums eine Zerstörung des Haftverbundes zwischen Mineralschaum und Tragschale beobachtet werden. Während der Versuchsdurchführung wird die auftretende Zylinderkraft und simultan die horizontal- und Vertikalverformungen des Probekörpers gemessen. Der Probekörper wird weggesteuert mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 mm/min über den Bruch hinaus belastet.

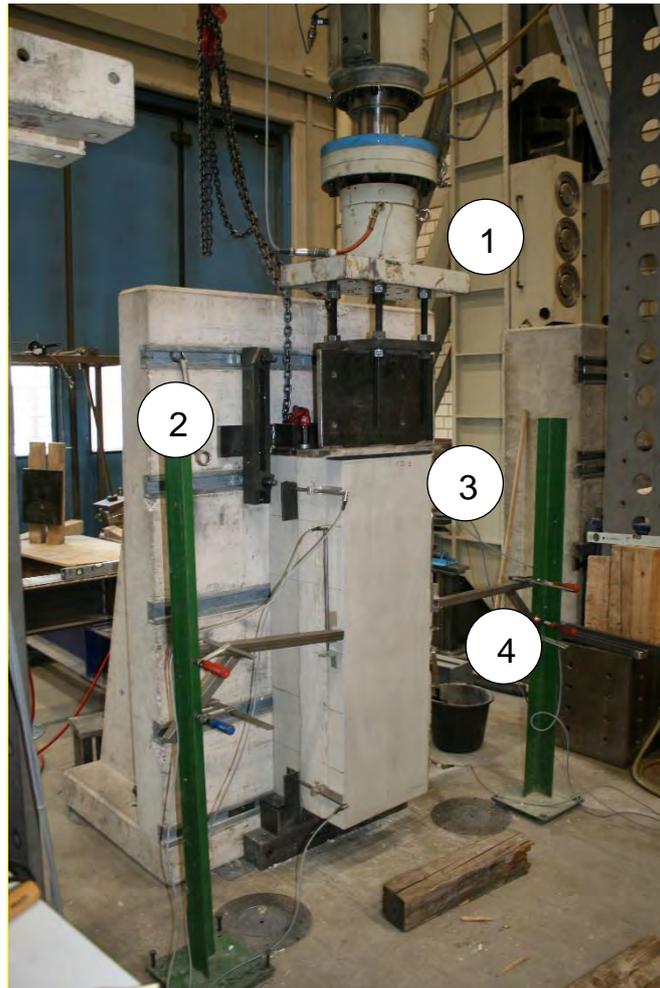


Abbildung 77: Versuchsaufbau für statische Scherversuche an Sandwichelementen mit einer Kernschicht aus Mineralschaum; 1: Servo-hydraulischer Prüfzylinder; 2: Verankerung des Probekörpers an Reaktionswand; 3: Probekörper; 4: Induktive Wegaufnehmer.

In Abbildung 78 ist das Last-Verformungsdiagramm der statischen Scherversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumkern und einer Dämmstoffdicke von 160 mm dargestellt. Im Vergleich mit der alleinigen Steifigkeit des Verbindungsmittels kann dabei bis zum Druckversagen des Mineralschaums eine Steigerung der Steifigkeit des Sandwichelementes beobachtet werden. Nach überschreiten der Druckfestigkeit des Mineralschaums kann eine Annäherung des im Versuch bestimmten Steifigkeit an die Steifigkeit des Verbindungsmittels registriert werden. Neben der Steigerung der Steifigkeit kann durch die Integration eine Steigerung der Tragfähigkeit des Sandwichelementes um ca. +200% gegenüber Wandelementen ohne Mineralschaum festgestellt werden.

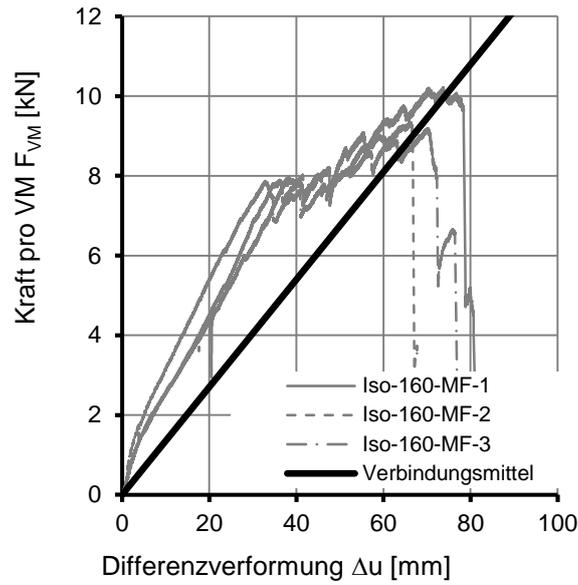


Abbildung 78: Last-Verformungsdiagramms der statischen Scherversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumkern und einer Dämmstoffdicke von 160 mm.

Weiterhin wurden Scherversuche unter Kriechbelastung im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen bei Sandwichelementen mit einem Kern aus Mineralschaum eine deutlich ausgeprägte Kriechneigung gegenüber einem Sandwichelement mit einem Kern aus expandiertem Polystyrol auf.

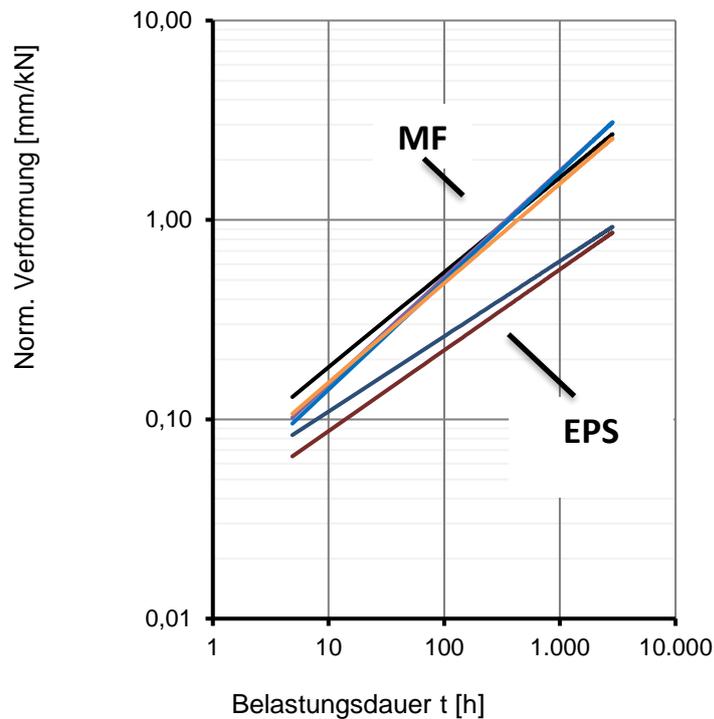


Abbildung 79: Ergebnisse der Kriechversuche an Sandwichelementen mit einem Kern aus expandiertem Polystyrol (EPS) bzw. Mineralschaum (MF).

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen wird in Kapitel 4.7 ein Ingenieurmodell zur Beschreibung des Tragverhaltens der Kernschicht abgeleitet.

4.6 Versuche zur Statik und Modularität der Sandwichelemente

Zur Bewertung des Tragverhaltens der Sandwichfassaden wurden 4-Punkt-Biegeversuche im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau durchgeführt. Die Herstellung der Probekörper im Betonfertigteilwerk der Firma Zuber Beton GmbH ist in Kapitel 4.4 beschrieben. Zielstellung der experimentellen Untersuchung ist die Ermittlung von Tragfähigkeiten am Gesamtsystem. Insgesamt wurden jeweils 3 Versuche an 3 unterschiedlichen Sandwichquerschnitten durchgeführt. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 15 zusammengestellt und die Geometrie der Probekörper ist in Abbildung 80 dargestellt. Die Probekörper weisen eine Länge von 3.600 mm und eine Breite von 500 mm auf. Die Höhen der Vorsatzschale, der Tragschale und der Dämmschicht variieren in Abhängigkeit der Versuchsserie. Die Serien 1 und 2 stellen mit einer Vorsatzschalendicke von 70 mm und einer Tragschalendicke von 140 mm den aktuellen Standardfall dar. In Serie 3 werden dagegen die im Projekt angestrebten Schalendicken betrachtet. Die Vorsatzschale ist in allen Serien einlagig mit einer Bewehrungsmatte Q188a bewehrt. Die Tragschale ist in den Serien 1 und 2 zweilagig mit einer Bewehrungsmatte Q335a unten und einer Bewehrungsmatte Q188a oben bewehrt. In der Serie 3 ist die Tragschale mittig mit einer Bewehrungsmatte Q335a bewehrt. Als Verbindungsmittel werden Schöck Isolink Typ TA-H mit einem Ankerraster von 300 x 300 mm verwendet.

Tabelle 15: Versuchsprogramm für 4-Punkt-Biegeversuche an großformatigen Sandwichelementen

Nr.	Abmessungen L x B - h _{vs} + h _{ts} [mm]	Dämmstoff	Dämmstoffdicke h _D [mm]	Anzahl
1	3600 x 500 - 70 + 140	MF Röser	60	3
2	3600 x 500 - 70 + 140	MF Röser	140	3
3	3600 x 500 - 35 + 55	MF Röser	160	3

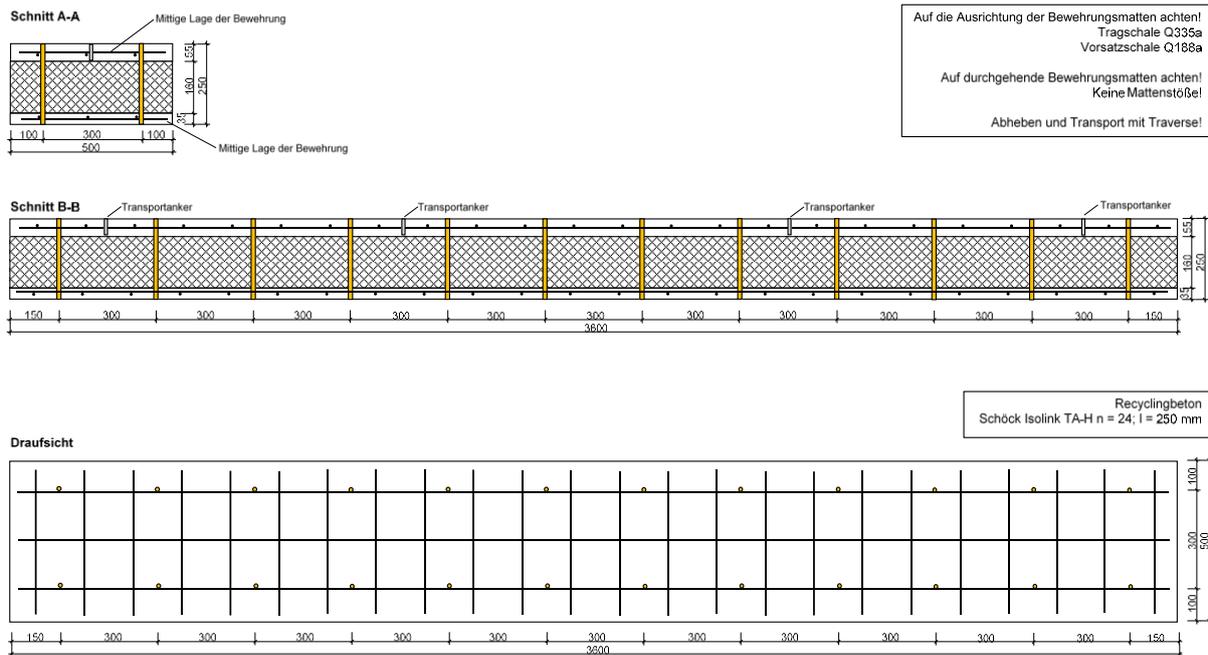


Abbildung 80: Geometrie der Probekörper für 4-Punkt-Biegeversuche.

Die Durchführung der 4-Punkt-Biegeversuche erfolgte im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der Technischen Universität Kaiserslautern. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 81 schematisch dargestellt. Die Stützweite des Probekörpers beträgt 3.400 mm, der Abstand der Lasteinleitungspunkte beträgt 800 mm.

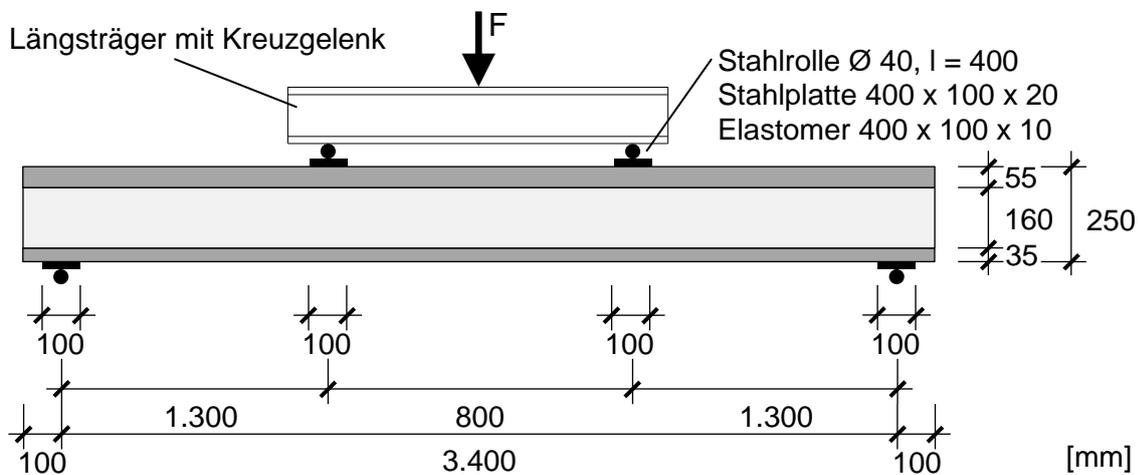


Abbildung 81: Schematischer Versuchsaufbau für 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichelementen.

Die Belastung des Probekörpers während der Versuchsdurchführung erfolgte weggesteuert durch einen servohydraulischen Prüfzylinder (siehe Abbildung 82) mit einer konstanten Belastungsgeschwindigkeit von 2 mm/min. Die Einleitung der Last in den Probekörper erfolgte auf der Tragschalenseite über einen Lastverteilungsträger.

Während der Versuchsdurchführung wurden die Zylinderkraft, die Durchbiegung in Feldmitte, die Durchbiegung im Bereich der Lasteinleitung, die Differenzverschiebung der Betonschalen sowie das Zusammendrücken der Kernschicht mit einer Messfrequenz von 10 Hz gemessen.



Abbildung 82: Versuchsaufbau für 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumdämmung im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau.

In Abbildung 83 sind die Last-Verformungskurven der Serie 1 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Traglasten über 12 kN betragen. In Abbildung 83 rechts ist im Detail das Last-Verformungsverhalten für den mittels $L / 250 = 3400 \text{ mm} / 250 = 13,6 \text{ mm}$ abgeschätzt.

Aus dem Last-Verformungsverhalten kann abgeschätzt werden, dass aufgrund der geringen Steifigkeit das Verformungskriterium im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend wird.

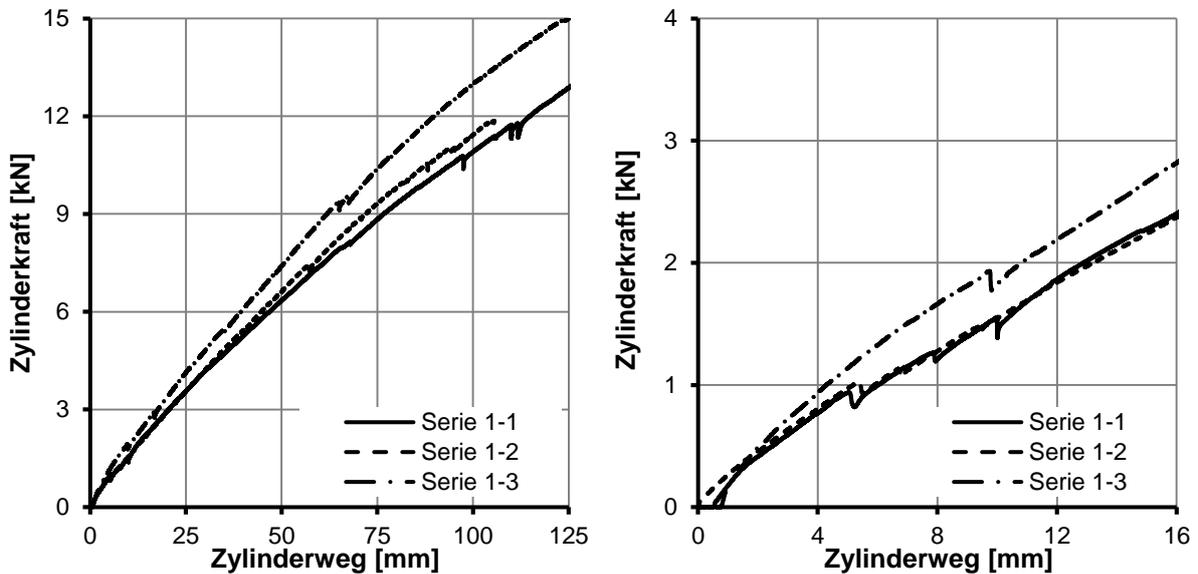


Abbildung 83: Links: Last-Verformungskurven der Serie 1; rechts: Detail der Lastverformungskurve im Bereich des Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Abbildung 84 zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen dem Zylinderweg und der Differenzverschiebung des |2CO2|sandwich-Elementes. Es ist zu erkennen, dass über den betrachteten ein linearer Zusammenhang als Grundannahme für weitere Betrachtungen angenommen werden kann.

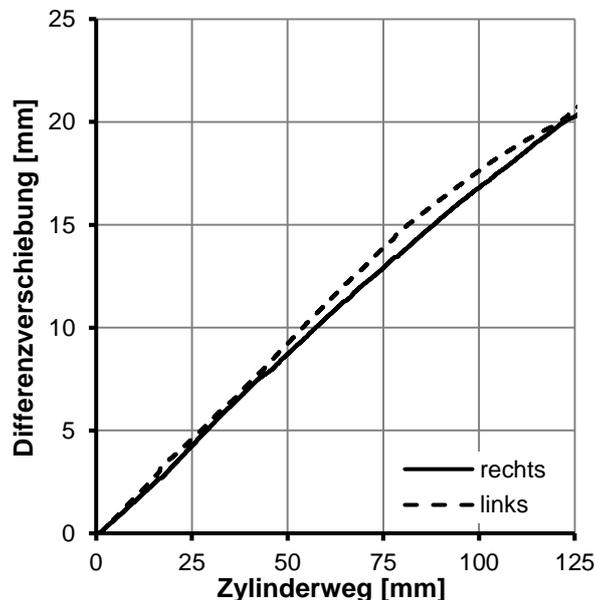


Abbildung 84: Exemplarische Darstellung der Differenzverschiebung zwischen Vorsatz- und Tragschale Serie 1-2.

In Abbildung 85 ist das Zusammendrücken des Mineralschaums im Bereich der Lasteinleitung exemplarisch dargestellt. Es treten maximale Verformungen von 0,5 mm auf. Für die

Ableitung eines Ingenieurmodells können diese als vernachlässigbar gering eingestuft werden.

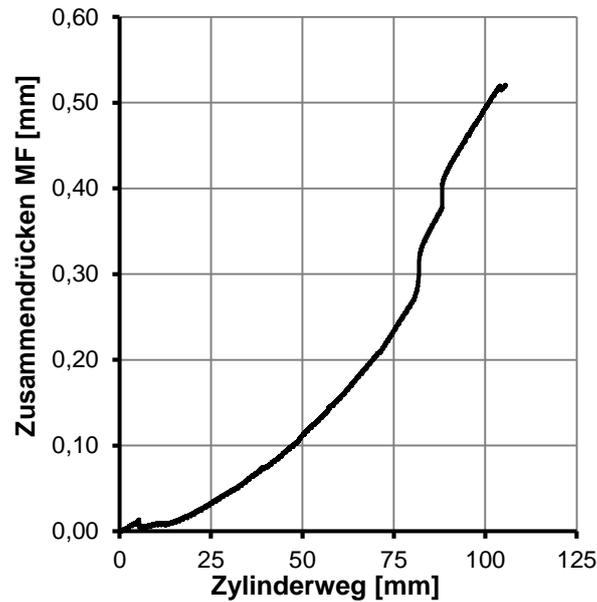


Abbildung 85: Exemplarische Darstellung des Zusammendrückens des Mineralschaums während des Versuchs Serie 1-2.

Abbildung 86 zeigt die Last-Verformungskurven der 4-Punkt-Biegeversuche der Versuchsserie 2. Im Vergleich zu 1 können die Tragfähigkeit aber insbesondere auch die Steifigkeit des Sandwichelementes deutlich gesteigert werden.

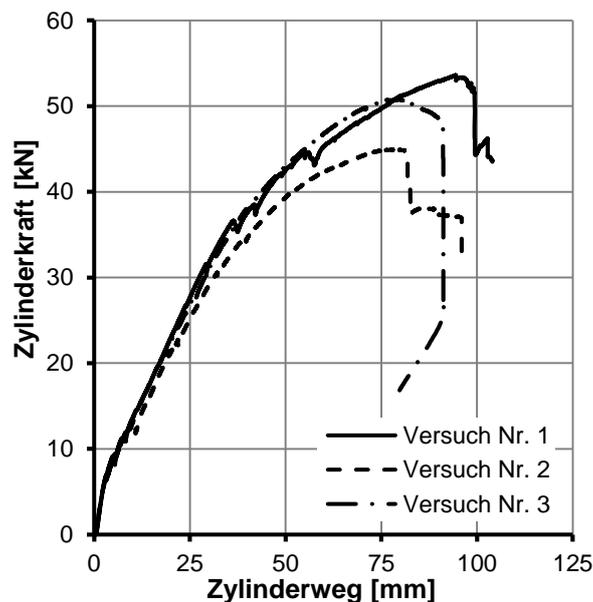


Abbildung 86: Last-Verformungsdiagramm der Serie 2.

Als Ergebnis der 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumdämmung kann festgehalten werden, dass der Mineralschaum als Dämmstoff grundlegend geeignet ist. Die Tragfähigkeit und Steifigkeit der Sandwichelemente wird maßgebend durch die Biegesteifigkeit der Betondeckschichten bestimmt.

4.7 Entwicklung eines Bemessungsmodells für die Praxis

Die Beschreibung des Trag- und Verformungsverhaltens der Kernschicht des untersuchten Sandwichelementes erfolgt mittels Schubfedermodellen. Das nachfolgend dargestellte Schubfedermodell betrachtet dabei den baupraktischen Bereich bis maximal 5 mm Differenzverformung zwischen den Betondeckschichten Δu .

$$F_i = c_i \cdot \Delta u$$

Das Trag- und Verformungsverhalten des Verbindungsmittels kann dabei durch die nachfolgende Gleichung beschrieben werden.

$$F_{VM} = \left(2 \cdot \frac{4 \cdot \beta^3 \cdot E_{VM} \cdot I_{VM}}{2 + \beta \cdot h_{KS}} + \frac{2 \cdot \beta^2 \cdot E_{VM,b} \cdot I_{VM}}{\beta \cdot h_{KS}^2 - h_{KS}} + \frac{G_{VM} \cdot A_{VM} \cdot \alpha_s}{h_{KS}} + \frac{12 \cdot E_{VM,b} \cdot I_{VM}}{h_{KS}^3} \right) \cdot \Delta u$$

Dabei ist

F_{VM}	die Kraft im Verbindungsmittel,
E_{VM}	das Elastizitätsmodul des Verbindungsmittels,
I_{VM}	das Flächenträgheitsmoment 2. Ordnung des Verbindungsmittels,
β	die relative Steifigkeit des vom Beton umschlossenen Stabes,
h_{KS}	die Dämmstoffdicke des Sandwichelementes,
G_{VM}	das Schubmodul des Verbindungsmittels,
A_{VM}	die Querschnittsfläche des Verbindungsmittels,
α_s	der Schubkorrekturfaktor, bei einer Kreisfläche 0,875 sowie
Δu	die Differenzverschiebung zwischen den Betondeckschichten.

Die relative Steifigkeit des vom Beton umschlossenen Stabes kann für den hier betrachteten Fall mittels der folgenden Gleichung beschrieben werden.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_0 \cdot \varnothing_{VM}}{4 \cdot E_{VM,b} \cdot I_{VM}}}$$

Dabei ist

K_0	das Bettungsmodul des Betonauflegers, hier 400 N/mm ³ und
\varnothing_{VM}	der Durchmesser des Verbindungsmittels.

Für den betrachteten Sandwichquerschnitt kann das Tragverhalten des Mineralschaums nach folgender Gleichung beschrieben werden. Die Schädigung des Haftverbundes zwischen dem Mineralschaum und der Betondeckschicht wird durch einen empirisch ermittelten Vorfaktor berücksichtigt.

$$F_{MF} = \mu \cdot E_D \cdot A_A \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)^2$$

Dabei ist

μ	der Gleitreibungskoeffizient zwischen Mineralschaum und Beton,
E_D	der Druckelastizitätsmodul des Mineralschaums,
A_A	das Ankerraster des Sandwichelementes und

α der Winkel der Differenzverschiebung zwischen den Betondeckschichten.

Die Ermittlung der Schnitt- und Verformungsgrößen am Sandwichelement erfolgt mittels der Differentialgleichungsmethode [25]. Die Differentialgleichungsmethode kann auf das |2CO2|sandwich angewendet werden, da die in Kapitel 4.6 dargestellten Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen einen linearen Zusammenhang zwischen der Differenzverschiebung zwischen Vorsatz- und Tragschale und der Durchbiegung aufweisen und weiterhin die Kernschicht nicht maßgeblich zusammengedrückt wird.

In [26] sind die Gleichungen der Differentialgleichungsmethode für Sandwichelemente für die einzelnen Lastfälle zusammengestellt.

4.8 Recycling der entwickelten Sandwichelemente

Für den Fall, dass der Mineralschaum nicht vom Stahlbeton getrennt werden soll, werden die Wandelemente analog dem Recycling von Stahlbetonbauteilen bearbeitet. Hierzu werden die Werkstoffe Betonstahl und Beton mittels einer Abbruchschere mechanisch getrennt. Die mineralischen Werkstoffe werden anschließend z. B. mittels Backenbrecher zerkleinert und durch Siebanlagen in unterschiedliche Gesteinskörnungen sortiert.

Falls der Mineralschaum vom Stahlbeton getrennt werden soll, muss eine andere Methode angewendet werden. Für das Recycling des Sandwichelements werden im Folgenden zwei mögliche Herangehensweisen vorgestellt.

In einer ersten Methode wird die Vorsatzschale durch ein Abtrennen der Verbindungsmittel abgelöst und mittels Kranen versetzt. Nun liegt der Mineralschaum frei und kann sortenrein getrennt werden. Dies erfolgt analog zur Trennung alternativer Dämmstoffarten.

Eine weitere Methode ist die Entfernung des Mineralschaums ohne vorheriger Trennung der Schalen. Hierbei kann der Mineralschaum seitlich zwischen den zwei Betonschalen herausgeschabt werden oder abgesaugt werden. Auch eine Kombination der Methoden ist möglich, um den Mineralschaum sortenrein zu trennen.



Abbildung 87: Kombination aus Trennen und Absaugen.

5 Ganzheitliche Analyse

Der übergreifende Rahmen des Forschungsvorhabens bildet eine begleitende ganzheitliche umweltbezogene Analyse. Diese bezieht sich auf die Integration von ökonomischen und ökologischen im gesamten Projektverlauf. Die Analyse umfasst zudem die simultane Modellierung der Stoffkreisläufe, welche auch die Untersuchung von Materialausfallströmungen Innovationen, Risiko und Relevanz beinhaltet. Ein weiterer Fokus liegt auf der ganzheitlichen Analyse des Reduktionspotentials der CO₂-Bilanz, welches in dem vorliegenden Forschungsvorhaben von herausragender Bedeutung ist. Die Analyse wird im Rahmen einer Ökobilanzierung (LCA) durchgeführt.

5.1 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

Das Ziel der Ökobilanzstudie nach DIN EN 14040/14044[C] des 2CO₂-Sandwichelementes ist die Quantifizierung der Umweltauswirkungen des Bauteils mit Schwerpunkt auf CO₂-Emissionsvermeidung und CO₂-Sequestrierung im Laufe des gesamten Bauteillebenszyklus. Als Referenzsubstanz für die Ökobilanz wird das Treibhausgas CO₂ gewählt.

Ökobilanzen können konsequenzorientiert (consequential) und beschreibend (attributio-
nal) sein. Im Falle des 2CO₂-Sandwichelementes handelt es sich um verschiedene, neuartige Ansätze, weswegen die Ökobilanz konsequenzorientierte und beschreibende Elemente enthält. Konsequenzorientiert werden Prozesse im Bauteillebenszyklus beschrieben, die neuartig und auf das 2CO₂-Sandwichelement abgestimmt sind. Beschreibend werden Prozesse behandelt, die mit konventionellen produkt-/material- und verfahrensähnlichen Prozessen verglichen werden können, um den Einfluss des 2CO₂-Sandwichelementes auf die Umwelt anschließend bewerten und diskutieren zu können.

Die Umweltproduktdeklaration, auf Englisch Environmental Product Declaration (EPD), ist eine standardisierte Form, Umweltauswirkungen in Bezug auf verschiedene Aspekte quantitativ zu beschreiben.[28] Die Vergleichbarkeit der EPD-Werte ist gegeben, wenn die EPD-Daten aus den EPD-Datensätzen nach DIN EN 15804 erstellt wurden und u.a. produktspezifische Leistungsmerkmale berücksichtigt werden.

Für die Quantifizierung der Wirkungsabschätzungsergebnisse der Ökobilanz der 2CO₂-Sandwichelementes werden folgende EPD-Datensätze des Informationszentrums Beton GmbH verwendet:

- Umwelt-Produktdeklaration: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30
- Umwelt-Produktdeklaration: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 35/45
- Umwelt-Produktdeklaration: Cavipor® FTX 1
- Umwelt-Produktdeklaration: Bauschutt-Aufbereitung
- Umwelt-Produktdeklaration: Bauschutt-Deponierung
- Umwelt-Produktdeklaration: Zement
- Prozess-Datensatz: Betonfertigteil Wand 40cm (de)

5.2 LCA: Stoffkreislauf 2CO₂-Sandwichelement

Die Produktsysteme des 2CO₂-Sandwichelementes werden als geschlossene Stoffkreisläufe modelliert. Der gesamte Bauteillebenszyklus des 2CO₂-Sandwichelementes wird durch drei geschlossene Stoffkreisläufe dargestellt. Der Stoffkreislauf des 2CO₂-Sandwichelementes beschreibt die Prozesseinheiten (PE), die für den RC-Beton und den mineralischen Dämmschaum identisch sind. Aus der Herstellung des 2CO₂-Sandwichelementes folgen die geschlossenen Stoffkreisläufe des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums.

Die funktionelle Einheit ist ein Quadratmeter 2CO₂-Sandwichelement. In Tabelle 16 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Tabelle 16: Funktionelle Einheit 2CO₂-Sandwichelement

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m ²
Umrechnungsfaktor 1m ³ RC-Beton auf 1m ³ Sandwichelement	0,56	-
Umrechnungsfaktor 1m ³ MSB auf 1m ³ Sandwichelement	0,44	-
Umrechnungsfaktor von 1m ³ 2CO ₂ -Sandwichelement auf 1m ² 2CO ₂ -Sandwichelement	0,365	-

Typ der EPD: Cradle-to-Cradle mit Optionen.

Der geschlossene Stoffkreislauf des 2CO₂-Sandwichelementes berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, die nachhaltige Konzeptionierung im Nutzungsstadium des Bauteils und die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der RC-Gesteinskörnung und von Zementrezyklaten. Einzelne Prozesseinheiten werden in der Modellierung der Stoffkreisläufe des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums detailliert erläutert.

Der Stoffkreislauf des 2CO₂-Sandwichelementes beinhaltet die Prozesseinheiten, die für den RC-Beton und für den mineralisierten Dämmschaum identisch sind. In Abbildung 88 ist der geschlossene Stoffkreislauf des 2CO₂-Sandwichelementes dargestellt und anschließend erläutert. Zu den Prozesseinheiten gehört die Herstellung des 2CO₂-Sandwichelementes (PE 0), der Einbau der Fertigteile (PE A), die Nutzung (PE B) und das Bereitstellen von Sekundärrohstoffen (PE C).



Abbildung 88: Stoffkreislauf 2CO2-Sandwichelement.

Prozesseinheit A: Einbau des Fertigteils

Die Einzelprozesse sind der Transport zur Baustelle (A1) und der Einbau des Fertigteils (A2).

A1: Verwendet wird ein gewichteter Mittelwert für den Transport zur Baustelle. Bei bekannten Transportentfernungen sind diese anzugeben.

A2: Die Umwelteinwirkungen für den konventionellen Einbau von Fertigteilen auf der Baustelle aus dem gewichteten Mittelwert des Einbaus von Transportbeton und des Einbaus von Fertigteilen. Die Betonfertigteile werden mittels Autokran oder Turmdrehkran auf der Baustelle montiert.

Prozesseinheit B: Nutzung

Die Einzelprozesse sind die Karbonatisierung während der Nutzungsdauer (B1) und Instands- und Reparaturmaßnahmen (B2).

B1: Die Karbonatisierung des Betons während der Nutzungsphase eines Bauteils wird als negatives Treibhauspotential mit 10 kg CO₂e pro Kubikmeter Beton in der Ökobilanz angenommen.

B2: Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen für Betonbauteile während der Referenznutzungsdauer von 50 Jahren. In der Regel fallen keine Umweltlasten an.

Prozesseinheit C: Bereitstellen der Sekundärrohstoffe

Die Einzelprozesse sind der Rückbau/ Abbruch von Betonbauteilen (C1) und der Transport des Abbruchmaterials zur Aufbereitung (C2).

C1: Der Rückbau erfolgt durch Longfrontbaggern mit Abbruchzangen unter Einleitung von Druckkraft („Pressschneiden“).

C2: Transport des groben Betonabbruchmaterial zur Brecheranlage am Fertigteilwerk.

Abschneidekriterien

Es werden die Energien für das Mischen, die Verdichtung, die Wärmebehandlung im Betonfertigteilwerk und interne Transporte berücksichtigt.

5.3 LCA: Stoffkreislauf RC-Beton

Die funktionelle Einheit ist 1 m³ bewehrter Konstruktionsbeton im Hochbau, Tief- oder Ingenieurbau. In Tabelle 17 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Tabelle 17: Funktionelle Einheit RC-Beton

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m ³
Dichte (Mittelwert)	2,5	kg/m ³
Umrechnungsfaktor auf 1 m ² 2CO ₂ -Sandwichelement	0,56	-

Typ der EPD: Cradle-to-Gate mit Optionen.

Der geschlossene Stoffkreislauf des RC-Betons berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des RC-Betons unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, sowie die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der RC-Gesteinskörnung.

In Abbildung 89 ist das Produktsystem des RC-Betons als geschlossener Kreislauf dargestellt und anschließend erläutert.



Abbildung 89: Stoffkreislauf RC-Beton.

Prozesseinheit D: Bereitstellen der RC-Gesteinskörnung

Brechen des Altbetons und Abfallbehandlung (Abschneide) (D)

D: Der Betonabbruch/Altbeton wird in einer stationären Brecheranlage des Fertigteilwerkes SHW zerkleinert und in den zwei nachgeschalteten Siebanlagen in einzelne Kornfraktionen getrennt. Manuelle und maschinelle Sortierbereiche ermöglichen eine fremdstofffreie Gesteinskörnung. Magnetabscheider sortieren Eisenmetalle aus.

Prozesseinheit E: Auslagerung der RC-Gesteinskörnung zur gezielten CO₂-Sequestrierung
Bauschuttdeponierung (E1) und CO₂-Sequestrierung durch Auslagerung (E2).

E1: Die Deponierung von 1 kg Bauschutt in einer Deponie mit einer Höhe von 30 Meter und einem Gelände von 40 000 m² und einer Lagerungsdauer von 100 Jahren.

E2: Die Ergebnisse der TGA zeigen, dass durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung gezielt CO₂ aufgenommen und im Zementstein der RC-Gesteinskörnung dauerhaft gebunden wird. In der Ökobilanz des 2CO₂-Sandwichelementes wird diese CO₂-Aufnahme als Gutschrift durch ein negatives Treibhauspotential angerechnet. Es wird ein Wert von 0,315 kg CO₂ pro Kubikmeter RC-Beton angerechnet.

Prozesseinheit F: RC-Betonherstellung im Fertigteilwerk

Gewinnung und Aufbereitung der Betonausgangsstoffe (F1), Transport der Rohstoffe zum Fertigteilwerk und interne Transporte (F2), Betonherstellung im Fertigteilwerk (F3) und Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch (F4).

F4: Die Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch bezieht sich auf die in der DAfStb-Richtlinie festgelegten Grenzen zur Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Beton abhängig der Expositionsklassen. Im vorliegenden RC-Beton wird ein 100 prozentiger Zuschlag an RC-Gesteinskörnung verwendet, welches deutlich höher ist als in der DAfStb-Richtlinie festgelegten Grenze von 35 % Zuschlag an RC-Gesteinskörnung für die Expositionsklasse XC4. Die Einzelprozesse F1 und F2 haben ebenfalls Einfluss auf die Gutschrift, da sowohl die Gewinnung und Aufbereitung der Betonausgangsstoffe als auch der Transport der Rohstoffe durch den hohen Rezyklatanteil des RC-Betons deutlich weniger CO₂-Emissionen verursachen. Um eine Vergleichbarkeit der EPD-Werte zu gewährleisten werden die EPD-Werte der Einzelprozesse F1 und F2 aus produktähnlichen Datensätzen beibehalten und die Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch mit dem Faktor 2,0 multipliziert.

Abschneidekriterien

Für die Berechnung der EPD-Werte werden Zusatzmittel (0,1 M.-%) und Zusatzstoffe (2,6 M.-%) beim Mischungsentwurf des RC-Betons berücksichtigt. Diese Abschätzungen

und Annahmen sind von Deutsche Bauchemie (DBC) auf Grundlage umfassender Datensätzen aus der Bauindustrie samt Marktanteilen getroffen worden.

Vernachlässigt werden die Umweltlasten aus der Herstellung und Nutzung der Schalung, da diese weniger als 1 % der Gesamtwerte für die Betonherstellung der eingesetzten Ressourcen und der eingesetzten Primärenergie betragen.

Der Bewehrungsanteil wird mit 0,002375 m³ pro Quadratmeter 2CO₂-Sandwichelement angenommen. Die Verbindungsmittel Schöck Isolink TA H haben einen Durchmesser von 13,5 mm. In einem Quadratmeter 2CO₂-Sandwichelement sind sechs Verbindungsmittel, woraus sich ein Anteil von 0,003435 m³ ergibt. Für die Berechnung der Ökobilanz wird ein durchschnittlicher Bewehrungsgehalt angenommen.

5.4 LCA: Stoffkreislauf des mineralisierten Dämmschaum

Die funktionelle Einheit ist ein Kubikmeter mineralisierter und unbewehrter Dämmschaum. In

Tabelle 18 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Tabelle 18: Funktionelle Einheit MSB

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m ³
Angestrebte Rohdichte (Mittelwert)	160	kg/m ³
Rohdichte Zement	3100	kg/m ³
Umrechnungsfaktor von 1 t auf 1 kg	0,001	-
Umrechnungsfaktor Bindemittelanteil auf 1 m ³ MSB	0,0835	-
Umrechnungsfaktor auf 1 m ² 2CO ₂ -Sandwichelement	0,44	-

Typ der EPD: Cradle-to-Gate mit Optionen.

Der geschlossene Stoffkreislauf des MSBs berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des Schaumbetons unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, sowie die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der Wiederverwendung von Rezyklaten bei der Zementherstellung. In Abbildung 90 ist das Produktsystem des RC-Betons als geschlossener Stoffkreislauf dargestellt und anschließend erläutert.

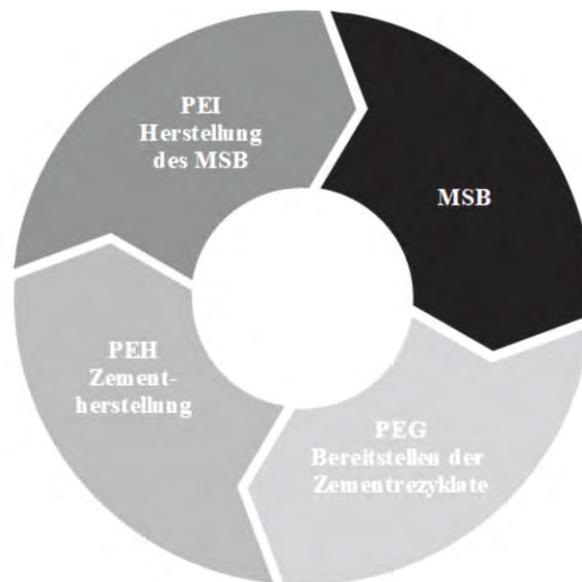


Abbildung 90: Stoffkreislauf MSB.

Prozesseinheit G: Bereitstellen der Rezyklate für die Zementherstellung

Brechen und Mahlen des Schaumbetons (G).

Prozesseinheit H: Zementherstellung

Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen (H1), Transport der Rohstoffe zum Werkstor und interne Transporte (H2), Zementherstellung (H3) und Gutschrift für die Verwendung von Zementrezyklaten (H4).

H4: Die Wiederverwendung von Zementrezyklaten durch Klinkersubstitution wird in der Ökobilanz als negatives Treibhauspotential angerechnet. Es wird ein Wert von 11,97 kg CO₂ pro Tonne Zement angerechnet.

Prozesseinheit I: Herstellung des mineralisierten Dämmschaumes

Herstellung von Metakaolin (I1) und Herstellung des mineralisierten Dämmschaumes und Installation (I2).

I1: Die Herstellung von synthetischem Metakaolin mit einem Anteil von 11,8 kg/m³ wird dem Zementgehalt als Bindemittelgehalt auf der sicheren Seite angerechnet. Der rechnerische Gesamtbindemittelgehalt des mineralischen Dämmschaums beträgt 83,5 kg/m³.

I2: Berücksichtigt sind Mischen der Komponenten mit Wasser, Applikation, Reinigung und Verpackungsentsorgung. Der Schaumbeton ist selbstverdichtend und wird mit Hilfe von drei Pumpen und Druckluft hergestellt.

Abschneidekriterien

Energie- und Stoffströme, die kleiner als ein Prozent der Gesamtmenge ausmachen, werden bei der Installation des Schaumes nicht berücksichtigt.

5.5 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung des 2CO₂-Sandwichelementes betrachtet die Wirkungskategorie „anthropogener Treibhauseffekt“, die Wirkung der Wirkungskategorie ist der Treibhauseffekt. Der Wirkungsindikator ist das Treibhauspotential, auf Englisch Global Warming Potential. In den EPD-Datensätzen wird der Wirkungsindikator Treibhauspotential als Globales Erwärmungspotential mit der Abkürzung GWP bezeichnet. Die Wirkung bezieht sich auf die Referenzsubstanz CO₂. Der typische Charakterisierungsfaktor bzw. die Einheit des Wirkungsindikators ist kg CO₂-Äquivalente. Relevante Stoffströme sind die CO₂-Emissionen im Laufe des Bauteillebenszyklus und die CO₂-Sequestrierung durch die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung. Die quantitativen Werte der Wirkungsabschätzungsergebnisse werden unter Berücksichtigung der gewählten Datensätze, aller in der Sachbilanz getroffenen Annahmen, berechneter Umrechnungsfaktoren in Bezug auf die funktionelle Einheit der LCA und unter Berücksichtigung aller in dieser Arbeit ausgearbeiteten und aus der Auswertung der Versuchsergebnisse gewonnenen Daten berechnet. (X = in Ökobilanz enthalten; ND = Nicht Deklariert)

Bereitstellen der RC-GK	Auslagerung der RC-GK und CO ₂ -Sequestrierung		RC-Betonherstellung im Fertigteilwerk	
Brechen des Altbetons und Abfallbehandlung	Bauschuttdeponierung	CO ₂ -Sequestrierung	Betonherstellung im Fertigteilwerk	Gutschrift für Verwendung von Betonabbruch
D	E1	E2	F1	F2
X	X	X	X	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m³ RC-BETON

Parameter	Einheit	D	E1	E2	F1	F2
GWP	[kg CO ₂ e]	6,01	0.01364	-0,785	244	-42,8

Abbildung 91: Ergebnisse RC-Beton.

Bereitstellen der Zementrezyklate	Zementherstellung				Herstellung des MSB	
	Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen	Transport der Rohstoffe zum Werkstor und interne Transporte	Zementherstellung	Gutschrift für die Verwendung von Zementrezyklaten	Herstellung von Metakaolin	Installation
Brechen und Mahlen des Schaumbetons						
G	H1	H2	H3	H4	I1	I2
X	X	X	X	X	ND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m³ MSB

Parameter	Einheit	G	H1-H3	H4	I2
GWP	[kg CO ₂ e]	5,05	49,10	-0,86	4,45

Abbildung 92: Ergebnisse mineralisierter Schaumbeton.

Herstellung		Einbau des Fertigteils		Nutzung		Bereitstellen der Sekundärrohstoffe	
RC-Beton	MSB	Transport zur Baustelle	Einbau des Fertigteils	Karbonatisierung während der Nutzungsphase	Instands- und Reparaturmaßnahmen	Rückbau/Abbruch der Betonbauteile	Transport des Abbruchmaterials zur Aufbereitung
RC	MSB	A1	A2	B1	B2	C1	C2
X	X	X	X	X	ND	X	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m² 2CO₂-SANDWICHELEMENT

Parameter	Einheit	RC	MSB	A1	A2	B1	B2	C1	C2
GWP	[kg CO ₂ e]	59,69	9,39	3,32	0,39	-3,65	ND	1,13	4,38

Abbildung 93: Ergebnisse Sandwichelement.

5.6 Auswertung der Ökobilanzierung

In Abbildung 94 ist das globale Erwärmungspotential (GWP) der einzelnen Prozesse aus dem Stoffkreislauf und den Ergebnissen der Ökobilanz für die Herstellung von 1 m² 2CO₂-Sandwichelement in Prozent anteilig dargestellt. Die Gutschrift aus der Karbonatisierung des Betons während der Nutzungsphase (PE B) wird der Herstellung des RC-Betons angerechnet.

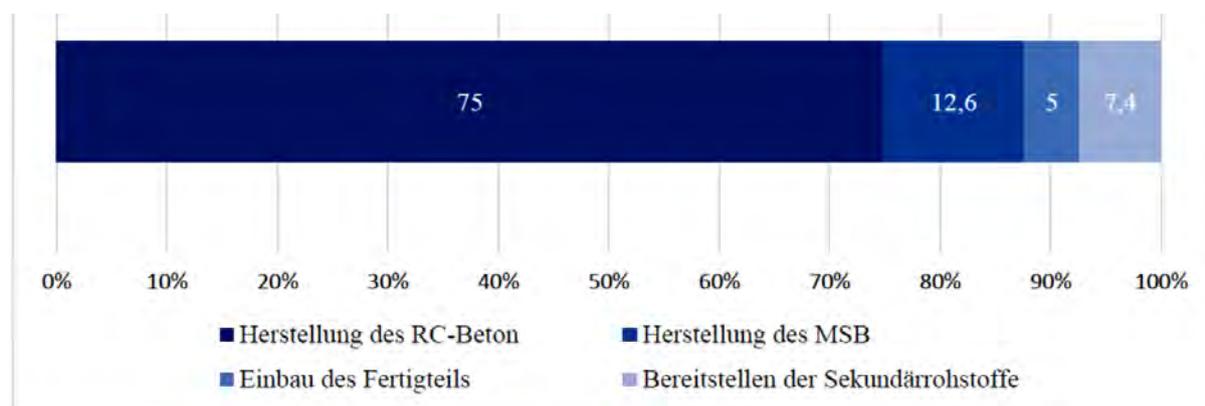


Abbildung 94: GWP-Anteile [%] der Prozesse für die Herstellung von 1m² 2CO₂-Sandwichelement in Prozent.

Die Herstellung des RC-Betons ist für 75 % des GWP des 2CO₂-Sandwichelementes verantwortlich. Es folgt eine Diskussion verschiedener Aspekte:

Das GWP der Herstellung von handelsüblichen Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45 wird von der Zementherstellung mit einem Anteil von 84,5 % am gesamten GWP stark dominiert. In der Betrachtung des GWP für das 2CO₂-Sandwichelement lässt sich diese Dominanz in der Herstellung des RC-Betons mit einem Anteil von 75 % am GWP wiederfinden.

Die Schichtdicke des MSB liegt bei 16 cm, die Schichtdicke des RC-Betons liegt bei 20,5 cm (Summe aus der Trag- und Deckschicht). Obwohl die Schichtdicken nahe beieinander liegen, ist die Herstellung des RC-Betons für das sechsfache des GWP des 2CO₂-Sandwichelementes verantwortlich. Das liegt u. a. daran, dass der mineralische Dämmschaum recyclingfreundlich konzipiert und mit einer hohen Rohdichte entworfen ist. Der geringe Bindemittelgehalt führt zu einer deutlich besseren Ökobilanz. Im Vergleich zum Mischungsentwurf eines handelsüblichen Betons mit einem w/z-Wert von 0,54 liegt der Bindemittelanteil des mineralischen Dämmschaums bei nur 20 %. Es resultiert eine positive Wirkung auf das GWP des 2CO₂-Sandwichelementes.

Zur Einordnung der Ökobilanz des 2CO₂-Sandwichelementes wird das GWP der Herstellung von 1 m² 2CO₂-Sandwichelement dem GWP der Herstellung von 1 m² einer handelsüblichen Betonfertigteilwand der Dicke 40 cm [29] (Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25 und Bewehrungsstahl) in Abbildung 13 gegenübergestellt. Der Typ der EPD ist

Cradle-to-Gate. Daraus folgend ist das berechnete GWP für das 2CO₂-Sandwichelement die Summe aus den Prozesseinheiten PE RC, PE MSB, PE C.

Aus Abbildung 95 folgt eine Einsparung von etwa 55 kg-CO_{2e} pro Quadratmeter Fertigteilwand durch das 2CO₂-Sandwichelement. Das entspricht einer Reduktion von 42 % kg-CO_{2e} verglichen mit dem Gesamt-GWP einer handelsüblichen Betonfertigteilwand.

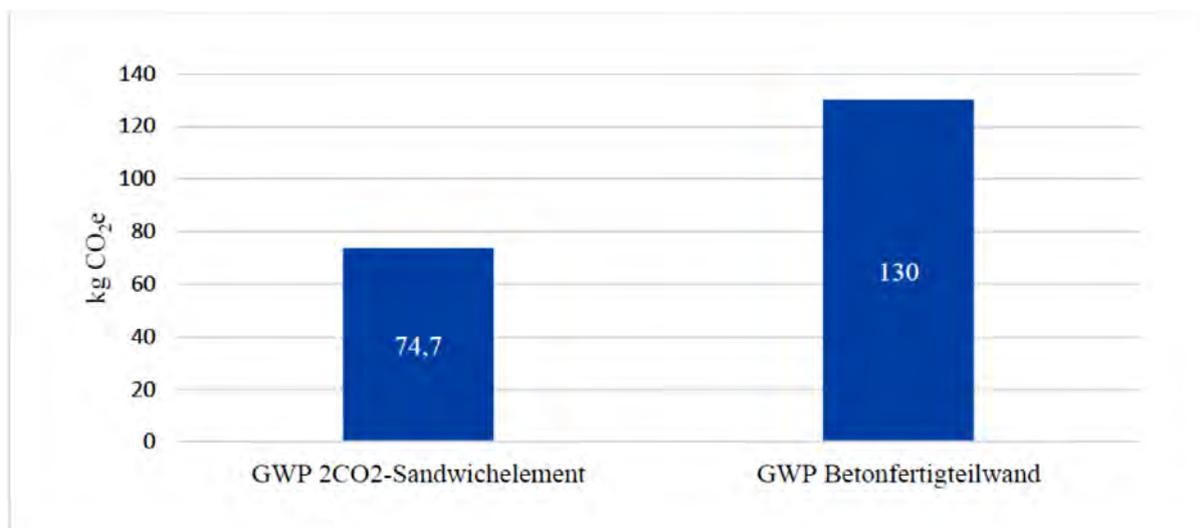


Abbildung 95: Gegenüberstellung des GWP von 1m² 2CO₂-Sandwichelement zu 1m² Betonfertigteilwand.

Für das Jahr 2018 liegen die CO₂-Emissionen in Deutschland bei 755 Mio, t CO₂. [30] Der Gesamtbedarf an Gesteinskörnungen im Jahr 2016 betrug 566 Mio t Gesteinskörnung, von denen 12,7 % aus Recycling-Baustoffen gewonnen wurden. Daraus ergibt sich eine Menge von 71,9 Mio t verwendeter RC-Gesteinskörnung. Allein durch die Anwendung der Auslagerungstechnik können bei einem Karbonatisierungspotential 0,315 kg CO₂ pro kg RC-Gesteinskörnung etwa 22 Mio t CO₂ von der RC-Gesteinskörnung dauerhaft gebunden werden. Das ergibt eine CO₂-Emissionseinsparung von über 3 % der Gesamt-CO₂-Emissionen in Deutschland.

Die Klimaschutzziele Deutschlands sehen bis 2020 eine Senkung von 40 % der Gesamt-CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 vor. Bis 2030 wird eine Senkung von 55 % der CO₂-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 angestrebt. [30] Im Vergleich zum Jahr 1990 sind die CO₂-Emissionen im Jahr um 35,7 % gesunken. Das ergibt eine (negative) Differenz von lediglich 4,3 % der CO₂-Emissionen im Jahr 2019 zum angestrebten Klimaschutzziel im Jahr 2020. Durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung könnte mit Hilfe der gezielte CO₂-Sequestrierung bereits jetzt über 3 % der Gesamt-CO₂-Emissionen in Deutschland eingespart und somit ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und somit zur Eindämmung des anthropogenen Treibhauseffektes geleistet werden.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Statista, "Produktion von Zement nach den wichtigsten Ländern im Jahr 2017 | Statistik." <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/153695/umfrage/produktion-von-zement-nach-laendern/> (accessed Aug. 14, 2018).
- [2] F. Xi, "Substantial global carbon uptake by cement carbonation," *Nat. Geosci.*, vol. 12, p. 880, 2016.
- [3] FR.de, "Bau: Darum ist die Zement-Produktion so klimaschädlich | FR.de." <http://www.fr.de/wissen/klimawandel/klimawandel/bau-darum-ist-die-zement-produktion-so-klimaschaedlich-a-1360448> (accessed Aug. 14, 2018).
- [4] FAZ, "Deponie-Mangel: Kein Platz mehr für den Müll." FAZ.NET.
- [5] FAZ, "Wohin mit dem Abfall?: Nach China gelangt nur noch halb so viel Müll wie bisher." FAZ.NET.
- [6] D. Hoornweg, P. Bhada-Tata, and C. Kennedy, "Environment: Waste production must peak this century," *Nat. News*, vol. 7473, p. 615, 2013.
- [7] H. F. Taylor, *Cement chemistry*. Thomas Telford, 1997.
- [8] D. Herfort, G. k. Moir, V. Johansen, F. Sorrentino, and A. H. B., "The chemistry of Portland cement clinker," *Adv. Cem. Res.*, vol. 22, no. 4, 2010.
- [9] K. K. Aligizaki, *Pore Structure of Cement-Based Materials*. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [10] K. Scrivener, R. Snellings, and B. Lothenbach, *A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials*. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [11] J. Stark and B. Wicht, *Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff*. Basel: Birkhäuser Verlag, 2000.
- [12] R. Keeling and C. Keeling, "Atmospheric Monthly In Situ CO₂ Data - Mauna Loa Observatory, Hawaii," 2017.
- [13] C. Gehlen, *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton 510, 2000.
- [14] B. Lagerblad, *Carbon Dioxide Uptake during Concrete Life Cycle: State of the Art*. Stockholm: Cement och Betong Institutet, 2005.
- [15] V. Papadakis, V. C., and F. M., "Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation," *ACI Mater. J.* 88, 1991.

- [16] E. Koelliker, Die Carbonatisierung von Stahlbeton - Ein Überblick. Beton- Und Stahlbetonbau 85, 1990.
- [17] B. für Wasserbau, "BAW-Merkblatt - Frostprüfung von Beton (MFB)," Karlsruhe, 2012.
- [18] C. Nobis and A. Vollpracht, Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand. Aachen: IBAC Institut für Bauforschung Aachen, 2015.
- [19] B. Kerkhoff and E. Siebel, Einfluß von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [20] E. Siebel, B. Kerkhoff, R. Haase, and W. Aue, "Aspekte der Dauerhaftigkeit bei Beton mit rezykliertem Zuschlag," DAFStB-Forschungskolloquium Fachtagung - Bet. mit rezykliertem Zuschlag für Konstr. nach DIN 1045-1, 1999.
- [21] C. Gehlen, T. Mayer, and A. Schießl-Pecka, Schutz und Instandsetzung von Betonbauten, Dauerhaftigkeitsbemessung in Handbuch für Bauingenieure. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2019.
- [22] T. Richter, M. Peck, and R. Pickhardt, Bauteilkatalog Planungshilfe für dauerhafte Betonbauteile. Erkrath: Verlag Bau + Technik GmbH, 2016.
- [23] F. Hunkeler and L. Lammar, "Anforderung an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen," Ittigen, 2012.
- [24] A. Rahimi, "Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung," München, 2016.
- [25] Stamm, K.; Witte, H.: Sandwichkonstruktionen - Berechnung, Fertigung, Ausführung. In: Sattler, K.; Stein, P.: Ingenieurbauten 3 - Theorie und Praxis. Springer-Verlag, 1974.
- [26] Pahn, M.; Schnell, J.: Einfluss der Verbundtragwirkung bei mehrschichtigen Stahlbetonwandtafeln mit innen liegender Wärmedämmung. In: Beton- und Stahlbetonbau 106, 2011, Heft 8, S. 551-560.
- [28] Beton, "Umweltproduktdeklarationen (EPD)." <https://www.beton.org/wissen/nachhaltigkeit/umweltproduktdeklarationen/> (accessed Jun. 20, 2020).
- [29] Ökobaudat, "Prozess-Datensatz: Betonfertigteile Wand 40cm (de)," 2017. https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=3470c523-ffcd-48df-93ff-dedfde86572a&stock=OBD_2020_II&lang=de,Stand: (accessed Jun. 21, 2020).

[30] Umweltbundesamt, "Treibhausgas-Emissionen in Deutschland," 2020. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung-1990-bis-2018> (accessed Jul. 20, 2020).

7 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Temperaturbereinigter Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen (Quelle: Statistisches Bundesamt).....	4
Abbildung 2: Abfallaufkommen in Deutschland (Quelle: Statistisches Bundesamt).	4
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Lösungskonzeptes.	5
Abbildung 4: Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Aufnahme des mineralisierten Schaums (R3); rechts mit Zielrohddichte von 100 kg/m ³	7
Abbildung 5: Anlage zur Herstellung des mineralisierten Dämmschaums.	8
Abbildung 6: Herstellung des mineralisierten Schaums (Zufuhr von Zementleim und Schaum) (links), Mineralisierter Schaum (rechts).....	8
Abbildung 7: Links: Versuchsaufbau eines Druckversuches an ultraleichtem Mineralschaum in Anlehnung an DIN EN 826; Rechts: Exemplarischer Druckspannungs-Dehnungsverlauf des betrachteten Mineralschaums.	9
Abbildung 8: Versuchsaufbau für Scherversuche an Doppelprobekörpern in Anlehnung an DIN EN 12090.	10
Abbildung 9: Sandwichwand.	11
Abbildung 10: Trennung.	11
Abbildung 11: Thermogravimetrische Analyse des hydratisierten Zementsteins und dem konventionellen Rohmehl.	13
Abbildung 12: DSC-Analyse während des Erhitzens (links) und Abkühlens (rechts) von Zementhydrat und konventionellem Rohmehl.....	14
Abbildung 13: Qualitative Röntgenbeugungsanalyse für die durch Brennen bei 1450 °C erhaltene synthetische Klinkerprobe (oben rechts: ungemahlener Klinker).....	14
Abbildung 14: Betonproben (1/2).....	16
Abbildung 15: Betonproben (2/2).....	16
Abbildung 16: Abbruch der Brückenkappe.	17
Abbildung 17: Anlage SHW Messel.	18
Abbildung 18: Korngruppen 0/2 (links), 2/8 (Mitte) und 8/16 (rechts).....	18
Abbildung 19: Siebturm.	19
Abbildung 20: Lagerung in Salzsäure.	20
Abbildung 21: Pascal 140 & Pascal 440.....	22
Abbildung 22: MIP für RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.	22
Abbildung 23: Phenolphthaleintest der frisch gebrochenen RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.	24
Abbildung 24: Lageplan SHW Messel.	31

Abbildung 25: Tool für den Mischungsentwurf M-Norm.....	34
Abbildung 26: Bedingungen für den Solver (M-Norm).....	34
Abbildung 27 : Mischungsentwurf M-Norm für die Brückenkappe.....	35
Abbildung 28: Sieblinie.....	36
Abbildung 29: Mischungsentwurf für M-RC Beton.....	36
Abbildung 30: Herstellung der Probekörper an der TU Darmstadt.....	37
Abbildung 31: Bestimmung des Ausbreitmaßes.....	38
Abbildung 32: Frischbetonversuche Brückenkappenbeton.....	38
Abbildung 33: Druckfestigkeit Brücken-Beton.	39
Abbildung 34: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Referenzbeton.	40
Abbildung 35: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Grenzwert.	40
Abbildung 36: Massenzunahme der Probekörper nach Sättigung.	41
Abbildung 37: Zusammenhang Abwitterung und kapillare Flüssigkeitsaufnahme -14 Frost- Tau-Wechsel (li.), 28 Frost-Tau-Wechsel (re.).....	41
Abbildung 38: Gegenüberstellung - Prüfflächen der Probekörper für CDF-Prüfung.....	41
Abbildung 39: Gegenüberstellung - abgewittertes Material nach 28 Frost-Tau-Wechseln.....	42
Abbildung 40: Gegenüberstellung – Wassereindringtiefe.....	43
Abbildung 41: Gegenüberstellung - Wassereindringtiefe an Probekörpern.....	43
Abbildung 42: Gegenüberstellung - Karbonatisierungsgeschwindigkeit bzw. –koeffizient.	44
Abbildung 43: Gegenüberstellung – Zeitl. Verlauf d. Karbonatisierungstiefe (li.), Karbonatisierungstiefe nach Expositionsdauer (re.).....	45
Abbildung 44: Abweichung des Karbonatisierungsfortschritts gegenüber Referenzbeton.	45
Abbildung 45: Chlorideindringwiderstand.	46
Abbildung 46: Gegenüberstellung - Chlorideindringwiderstand.....	46
Abbildung 47: Gegenüberstellung – Chlorideindringtiefe an Probekörpern.....	47
Abbildung 48: Sandwichelement im Querschnitt und Grundriss.....	48
Abbildung 49: Expositionsklassen Sandwichelement.	48
Abbildung 50: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung.....	49
Abbildung 51: Graph. Modellieren der Dauerhaftigkeit – Karbonatisierung.....	49
Abbildung 52: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung bei $C_s = 0,5$ M.- %/Zementgehalt.....	50
Abbildung 53: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung bei $C_s = 0,75$ M.- %/Zementgehalt.....	51

Abbildung 54: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei $C_s = 0,5$ M.-%/Zement.	51
Abbildung 55: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei $C_s = 0,75$ M.-%/Zement.	51
Abbildung 56: Zusammenfassung der Dauerhaftigkeits-Ergebnisse.....	53
Abbildung 57: Abgleiten von Schichten bei fehlender Verbindungstechnik.....	56
Abbildung 58: Querschnitt einer Betonsandwichwand aus DAfStb Heft 615.....	57
Abbildung 59: Übersicht über Verbindungsmittel für Betonsandwich-Elemente.....	58
Abbildung 60: Auszugversuche am Isolink-Verbindungsmittel – Versuchsaufbau (links); typisches Versagensbild Betonausbruch (rechts).	59
Abbildung 61: Auszugkraft der Isolink-Verbindungsmittel in Abhängigkeit der Einbindetiefe.	59
Abbildung 62: Projektteam bei dem ersten Herstellungstermin der Sandwich-Elemente bei der Firma Zuber in Crailsheim.	62
Abbildung 63: Sandwich-Element mit 160 mm mineralisierter Dämmschaum-Schicht.	63
Abbildung 64: Schalungen auf dem Rütteltisch.	64
Abbildung 65: Bewehrung der Vorsatzschicht.	64
Abbildung 66: Betonage der Vorsatzschicht mit Betonierkübel.....	65
Abbildung 67: Einbringen des mineralisierten Dämmschaums.....	65
Abbildung 68: Eingebrachter mineralisierter Dämmschaum.	65
Abbildung 69: Abzug des mineralisierten Dämmschaums.....	65
Abbildung 70: Abgezogene Oberfläche des mineralisierten Dämmschaums.	65
Abbildung 71: Einbringen der Verbindungsmittel.....	65
Abbildung 72: Bewehrung der Tragschicht.....	66
Abbildung 73: Rd-Anker 16 mm.....	66
Abbildung 74: Betonage der Tragschicht mit Betonierkübel.	66
Abbildung 75: Verdichtung mit Rüttelflasche.	66
Abbildung 76: 30 hergestellte Sandwich-Elemente.....	67
Abbildung 77: Versuchsaufbau für statische Scherversuche an Sandwichelementen mit einer Kernschicht aus Mineralschaum; 1: Servo-hydraulischer Prüfzylinder; 2: Verankerung des Probekörpers an Reaktionswand; 3: Probekörper; 4: Induktive Wegaufnehmer.....	68
Abbildung 78: Last-Verformungsdiagramms der statischen Scherversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumkern und einer Dämmstoffdicke von 160 mm. ...	69
Abbildung 79: Ergebnisse der Kriechversuche an Sandwichelementen mit einem Kern aus expandiertem Polystyrol (EPS) bzw. Mineralschaum (MF).....	69
Abbildung 80: Geometrie der Probekörper für 4-Punkt-Biegeversuche.	71

Abbildung 81: Schematischer Versuchsaufbau für 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichelementen.....	71
Abbildung 82: Versuchsaufbau für 4-Punkt-Biegeversuche an Sandwichelementen mit Mineralschaumdämmung im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau.....	72
Abbildung 83: Links: Last-Verformungskurven der Serie 1; rechts: Detail der Lastverformungskurve im Bereich des Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	73
Abbildung 84: Exemplarische Darstellung der Differenzverschiebung zwischen Vorsatz- und Tragschale Serie 1-2.	73
Abbildung 85: Exemplarische Darstellung des Zusammendrückens des Mineralschaums während des Versuchs Serie 1-2.....	74
Abbildung 86: Last-Verformungsdiagramm der Serie 2.....	74
Abbildung 87: Kombination aus Trennen und Absaugen.	77
Abbildung 88: Stoffkreislauf 2CO ₂ -Sandwichelement.	80
Abbildung 89: Stoffkreislauf RC-Beton.	81
Abbildung 90: Stoffkreislauf MSB.	84
Abbildung 91: Ergebnisse RC-Beton.....	85
Abbildung 92: Ergebnisse mineralisierter Schaumbeton.	86
Abbildung 93: Ergebnisse Sandwichelement.	86
Abbildung 94: GWP-Anteile [%] der Prozesse für die Herstellung von 1m ² 2CO ₂ -Sandwichelement in Prozent.....	87
Abbildung 95: Gegenüberstellung des GWP von 1m ² 2CO ₂ -Sandwichelement zu 1m ² Betonfertigteilwand.	88

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Exemplarische Übersicht über ausgewählte Mischungszusammensetzungen	6
Tabelle 2: Finale Mischungszusammensetzung mineralisierter Dämmschaum	7
Tabelle 3: Druckfestigkeit des Mineralschaums und Druckspannung bei 10 %-Stauchung	9
Tabelle 4: Elastizitätsmodul des Mineralschaums unter Druckbelastung.....	10
Tabelle 5: Mineralogische Zusammensetzung des gemahlten Schaumbetons und konventionellem Rohmehl für die Klinkerherstellung	12
Tabelle 6: Massenverlust durch Säurelagerung (Brückenkappe)	20
Tabelle 7: Wasseranspruch und Rohdichte (Brückenkappe)	21
Tabelle 8: Ca(OH) ₂ - und CaCO ₃ -Gehalt, 65%RH, Lagerungsdauer null, vier und acht Wochen	26
Tabelle 9: Ca(OH) ₂ - und CaCO ₃ -Gehalt, 75 %RH, Lagerungsdauer null, vier und acht Wochen	27
Tabelle 10: Massenunterschiede Ca(OH) ₂ und CaCO ₃ , 65 %RH.....	27
Tabelle 11: Massenunterschiede Ca(OH) ₂ und CaCO ₃ , 75 %RH.....	27
Tabelle 12: Berechnungsgrößen Karbonatisierungspotential	29
Tabelle 13: Kenngrößen von Kunststoffverbindungsmitteln.....	58
Tabelle 14: Versuchsprogramm für 4-Punkt-Biegeversuche an großformatigen Sandwichelementen.....	70
Tabelle 15: Funktionelle Einheit 2CO ₂ -Sandwichelement	79
Tabelle 16: Funktionelle Einheit RC-Beton.....	81
Tabelle 17: Funktionelle Einheit MSB	83

9 Anhang

Sieblinien

Gesamt-Trockenmasse	Probe 0,1/0,5			
M1 [g]				
293,00				
Sieb-Nummer	Maschenweite	Rückstand		Durchgang
	d [mm]	Ri [g]	100 x Ri/M1 [%]	100 - $\sum(100 \times Ri/M1)$ [%]
1	63,00	0,00	0,00	100,00
2	31,50	0,00	0,00	100,00
3	16,00	0,00	0,00	100,00
4	8,00	0,00	0,00	100,00
5	4,00	0,00	0,00	100,00
6	2,00	0,00	0,00	100,00
7	1,00	0,00	0,00	100,00
8	0,50	5,00	1,71	98,29
9	0,25	226,00	77,13	21,16
Auffangkasten P	0,00	62,00	21,16	0,00
	Σ	293,00	100,00	

Gesamt-Trockenmasse	Probe 0,5/1			
M1 [g]				
451,00				
Sieb-Nummer	Maschenweite	Rückstand		Durchgang
	d [mm]	Ri [g]	100 x Ri/M1 [%]	100 - $\sum(100 \times Ri/M1)$ [%]
1	63,00	0,00	0,00	100,00
2	31,50	0,00	0,00	100,00
3	16,00	0,00	0,00	100,00
4	8,00	0,00	0,00	100,00
5	4,00	0,00	0,00	100,00
6	2,00	0,00	0,00	100,00
7	1,00	3,00	0,67	99,33
8	0,50	436,00	96,67	2,66
9	0,25	9,00	2,00	0,67
Auffangkasten P	0,00	3,00	0,67	0,00
	Σ	451,00	100,00	

Gesamt-Trockenmasse	Probe 2/8			
M1 [g]				
505,00				
Sieb-Nummer	Maschenweite	Rückstand		Durchgang
	d [mm]	Ri [g]	100 x Ri/M1 [%]	100 - $\sum(100 \times Ri/M1)$ [%]
1	63,00	0,00	0,00	100,00
2	31,50	0,00	0,00	100,00
3	16,00	0,00	0,00	100,00
4	8,00	38,00	7,52	92,48
5	4,00	282,00	55,84	36,63
6	2,00	179,00	35,45	1,19
7	1,00	3,00	0,59	0,59
8	0,50	0,00	0,00	0,59
9	0,25	1,00	0,20	0,40
Auffangkasten P	0,00	2,00	0,40	0,00
	Σ	505,00	100,00	

Gesamt-Trockenmasse	Probe 1/2			
	M1 [g]			
237,00				
Sieb-Nummer	Maschenweite	Rückstand		Durchgang
	d [mm]	Ri [g]	100 x Ri/M1 [%]	100 - $\sum(100 \times Ri/M1)$ [%]
1	63,00	0,00	0,00	100,00
2	31,50	0,00	0,00	100,00
3	16,00	0,00	0,00	100,00
4	8,00	0,00	0,00	100,00
5	4,00	0,00	0,00	100,00
6	2,00	23,00	9,70	90,30
7	1,00	206,00	86,92	3,38
8	0,50	7,00	2,95	0,42
9	0,25	1,00	0,42	0,00
Auffangkasten P	0,00	0,00	0,00	0,00
	Σ	237,00	100,00	

Gesamt-Trockenmasse	Probe 0/2			
	M1 [g]			
581,00				
Sieb-Nummer	Maschenweite	Rückstand		Durchgang
	d [mm]	Ri [g]	100 x Ri/M1 [%]	100 - $\sum(100 \times Ri/M1)$ [%]
1	63,00	0,00	0,00	100,00
2	31,50	0,00	0,00	100,00
3	16,00	0,00	0,00	100,00
4	8,00	0,00	0,00	100,00
5	4,00	0,00	0,00	100,00
6	2,00	25,00	4,30	95,70
7	1,00	187,00	32,19	63,51
8	0,50	182,00	31,33	32,19
9	0,25	114,00	19,62	12,56
Auffangkasten P	0,00	73,00	12,56	0,00
	Σ	581,00	100,00	

Ergebnisse der TGA

- Calciumhydroxid und Calciumcarbonat in Gramm pro 100 Gramm einer Probe, RH 65%, Lagerungsdauer 4 Wochen

Probe RH-i	Ca(OH) ₂			CaCO ₃		
	[g/ 100 g einer Probe]			[g/ 100 g einer Probe]		
Einheit	0	4	8	0	4	8
Lagerungsdauer in Wochen						
65-1	1,1	0,7	0,78	1,22	5,26	1,89
65-2	0,92	0,69	0,95	1,37	5,3	2,56
65-3	1,14	0,57	0,69	1,31	4,06	2,00
65-4	0,92	0,61	0,69	1,04	5,67	2,75

- Calciumhydroxid und Calciumcarbonat in Gramm pro 100 Gramm einer Probe, RH 75%, Lagerungsdauer 4 Wochen

Probe RH-i	Ca(OH) ₂		CaCO ₃	
Einheit	[g/ 100 g einer Probe]		[g/ 100 g einer Probe]	
Lagerungsdauer in Wochen	0	4	0	4
75-1	1,1	0,57	1,22	1,95
75-2	0,92	0,64	1,37	2,79
75-3	1,14	0,61	1,31	2,02
75-4	0,92	0,35	1,04	2,23

Mischungsentwürfe

- RC N

Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00	
Durchgang [Vol.-%]	3,31	14,84	52,50	64,16	77,82	97,37	100,00	100,00	100,00	
Rückstand [Vol.-%]	96,69	85,16	47,50	35,84	22,18	2,63	0,00	0,00	0,00	
k = $\sum R/100$	2,90	AB = 3,63	BB = 2,90	CB = 2,27						
Anteile	Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
0,1/0,5	Durchgang [Vol.-%]	21,16	98,29	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,79	Rückstand [Vol.-%]	78,84	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5/1	Durchgang [Vol.-%]	0,67	2,66	99,33	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
38,32	Rückstand [Vol.-%]	99,33	97,34	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	Durchgang [Vol.-%]	0,00	0,42	3,38	90,30	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
12,89	Rückstand [Vol.-%]	100,00	99,58	96,62	9,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2/8	Durchgang [Vol.-%]	0,40	0,59	0,59	1,19	36,63	92,48	100,00	100,00	100,00
35,00	Rückstand [Vol.-%]	99,60	99,41	99,41	98,81	63,37	7,52	0,00	0,00	0,00
Summe										
100,00	Vol.-%									

Mischungsentwurf					
Ausgangsstoffe	Zement	52,5 R CEM I			
		Druckfestigkeit	C30/37		
		Konsistenz	F3		
		ρ_c	3,10	kg/dm ³	
Wasser	ρ_w	1,00	kg/dm ³		
	w/z	0,54			
Gesteinskörnung	$\rho_{g,0,1/0,5}$	2,65	kg/dm ³	→	13,79
	$\rho_{g,0,5/1}$	2,65	kg/dm ³	→	38,32
	$\rho_{g,1/2}$	2,65	kg/dm ³	→	12,89
	$\rho_{g,2/8}$	2,76	kg/dm ³	→	35,00
Anteile	k	2,90			
	w	225,00	kg/m ³		
	z	416,67	kg/m ³		
	p	5,50	Vol.-%		
	$1000\text{dm}^3/\text{m}^3 = z/\rho_c + w/\rho_w + g/\rho_g + p$			→	$g/\rho_g = 1000\text{dm}^3/\text{m}^3 \cdot (z/\rho_c + w/\rho_w + p)$
	g/ρ_g	585,59	kg/m ³		
	$g_{0,1/0,5}$	214,00	kg/m ³		
	$g_{0,5/1}$	594,65	kg/m ³		
	$g_{1/2}$	200,03	kg/m ³		
	$g_{2/8}$	565,68	kg/m ³		
Massen	Menge	0,50	m ³	→	500,00
	w	112499,99	g	→	112,50
	z	208333,31	g	→	208,33
	$g_{0,1/0,5}$	107000,32	g	→	107,00
	$g_{0,5/1}$	297327,41	g	→	297,33
	$g_{1/2}$	100012,89	g	→	100,01
	$g_{2/8}$	282840,66	g	→	282,84
	Zusatzwasser				
	$w_{z/g}$	7,44	kg	→	2,63
					%

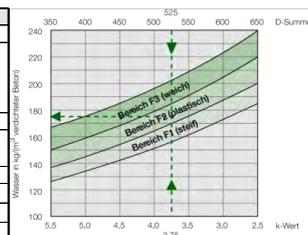
Substanz	Körnung	Niedrige Wasseranspruch			Hohe Wasseranspruch		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
A63	6,15	120x15	145x10	160x10	95x15	125x10	140x10
A32	5,48	130x15	155x10	175x10	105x15	135x10	150x10
A16	4,00	140x20	170x15	190x10	120x20	155x15	175x10
AW	3,63	155x20	190x15	220x10	150x20	185x15	205x10
B1	4,02	130x15	160x10	180x10	115x15	145x10	165x10
B2	4,00	140x20	175x15	195x10	130x20	165x15	185x10
B16	3,66	150x20	185x15	205x10	140x20	180x15	200x10
BB	2,90	175x20	205x15	225x10	170x20	200x15	220x10
CB	3,72	145x20	180x15	200x10	135x20	175x15	195x10
CB	3,00	160x20	200x15	220x10	160x20	195x15	215x10
C16	2,75	185x20	215x15	235x10	175x20	205x15	225x10
CB	2,27	200x20	230x15	250x10	185x20	215x15	235x10

$$y = y_1 + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot (x - x_1)$$

• RC 100

Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00	
Durchgang [Vol.-%]	8,37	21,30	41,84	63,00	78,08	97,40	100,00	100,00	100,00	
Rückstand [Vol.-%]	91,63	78,70	58,16	37,00	21,92	2,60	0,00	0,00	0,00	
$k = \sum R/100$		2,90	A8 = 3,63 B8 = 2,90 C8 = 2,27							
Anteile	Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,00
0/2	Durchgang [Vol.-%]	12,56	32,19	63,51	95,70	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
65,55	Vol.-%	87,44	67,81	36,49	4,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2/8	Durchgang [Vol.-%]	0,40	0,60	0,60	0,80	36,38	92,45	100,00	100,00	100,00
34,45	Vol.-%	99,60	99,40	99,40	99,20	63,62	7,55	0,00	0,00	0,00
Summe										
100,00	Vol.-%									

Mischungsentwurf					
Ausgangsstoffe		52,5 R CEM I			
Zement	Druckfestigkeit	C30/37			
	Konsistenz	F3			
Wasser	ρ_w	1,00	kg/dm ³		
	w/z	0,54			
Gesteinskörnung	$\rho_{g,0/2}$	2,66	kg/dm ³ → 65,5508411 Vol.-%		
	$\rho_{g,2/8}$	2,76	kg/dm ³ → 34,4491589 Vol.-%		
Anteile		k=	2,90		
	w=	225,00	kg/m ³		
	z=	416,67	kg/m ³		
	p=	5,50	Vol.-%		
1000dm ³ /m ³ = z/ρ _z + w/ρ _w + g/ρ _g + p		→ g/ρ _g = 1000dm ³ /m ³ · (z/ρ _z + w/ρ _w + p)			
	g/ρ _g	585,59	kg/m ³		
	g _{0/2} /ρ _g	1021,07	kg/m ³		
	g _{2/8} /ρ _g	556,78	kg/m ³		
Massen		Menge=	0,50	m ³	→ 500,00 Liter
	w=	112500,00	g → 112,50 kg		
	z=	208333,33	g → 208,33 kg		
	g _{0/2}	510533,92	g → 510,53 kg		
	g _{2/8}	278389,21	g → 278,39 kg		
Zusatzwasser		w _{0/2}	26,29	kg	→ 5,15 %
	w _{2/8}	7,32	kg	→ 2,63 %	



Gesteinskörnung	Körnungsziffer	... hohem Wasseranspruch			... niedrigem Wasseranspruch		
		F1	F2	F3	F1	F2	F3
A0/3	6,35	100x15	140x10	160x10	90x15	120x10	140x10
A0/2	5,48	120x15	150x10	170x10	100x15	130x10	150x10
A1/6	4,00	140x20	170x15	190x10	120x20	150x15	170x10
A0	3,63	150x20	180x15	210x10	130x20	160x15	200x10
A0/3	4,00	120x15	160x10	180x10	115x15	145x10	165x10
A0/2	4,50	140x20	175x15	195x10	125x20	155x15	185x10
A1/6	3,66	150x20	185x15	200x10	140x20	165x15	200x10
A0	2,90	170x20	200x15	220x10	170x20	200x15	220x10
A0/3	3,73	140x20	180x15	200x10	130x20	170x15	190x10
A0/2	3,30	160x20	200x15	220x10	160x20	190x15	210x10
A1/6	2,75	180x20	210x15	230x10	170x20	200x15	220x10
A0	2,27	200x20	230x15	250x10	180x20	210x15	230x10

$$y = y_1 + \frac{(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)} \cdot (x - x_1)$$

• RC 50/50

Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50
Durchgang [Vol.-%]	3,31	14,84	52,50	64,16	77,82	97,37	100,00	100,00
Rückstand [Vol.-%]	96,69	85,16	47,50	35,84	22,18	2,63	0,00	0,00
$k = \sum R/100$		2,90	A8 = 3,63 B8 = 2,90 C8 = 2,27	$k_{\text{rest}} = 2,9$				
Anteile	Maschenweite [mm]	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00
0,1/0,5	Durchgang [Vol.-%]	21,16	98,29	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
13,79032	Vol.-%	78,84	1,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5/1	Durchgang [Vol.-%]	0,67	2,66	99,33	100,00	100,00	100,00	100,00
38,3199	Vol.-%	99,33	97,34	0,67	0,00	0,00	0,00	0,00
1/2	Durchgang [Vol.-%]	0,00	0,42	3,38	90,30	100,00	100,00	100,00
12,88978	Vol.-%	100,00	99,58	96,62	9,70	0,00	0,00	0,00
2/8	Durchgang [Vol.-%]	0,40	0,59	0,59	1,19	36,63	92,48	100,00
35	Vol.-%	99,60	99,41	99,41	98,81	63,37	7,52	0,00
Summe								
100	Vol.-%							

Mischungsentwurf RC 50/50			
Mörtel			
Zement	52,5 R CEM I		
	Druckfestigkeit	C30/37	
	Konsistenz	F3	
	$\rho_z =$	3,10 kg/dm ³	
Wasser			
	$\rho_w =$	1,00 kg/dm ³	
	w/z =	0,54	
Gesteinskörnung			
0,1/0,5	$\rho_{g,0,1/0,5} =$	2,65 kg/dm ³	13,7903245 Vol.-%
0,5/1	$\rho_{g,0,5/1} =$	2,65 kg/dm ³	38,319899 Vol.-%
1/2	$\rho_{g,1/2} =$	2,65 kg/dm ³	12,8897765 Vol.-%
2/8	$\rho_{g,2/8} =$	2,74 kg/dm ³	35 Vol.-%
Massen			
	k =	2,90	
	w =	225,00 kg/m ³	
	z =	416,67 kg/m ³	
	p =	5,50 Vol.-%	
	$1000\text{dm}^3/\text{m}^3 = z/\rho_z + w/\rho_w + g/\rho_g + p$		
	$g/\rho_g =$	585,59 kg/m ³	
	$g_{0,1/0,5} =$	214,00 kg/m ³	
	$g_{0,5/1} =$	594,65	
	$g_{1/2} =$	200,03 kg/m ³	
	$g_{2/8} =$	565,68 kg/m ³	

Prüfung der Druckfestigkeit; Bestimmung der Festbetonrohddichte

- Probekörper - RC 100

Würfel	Abmessungen [mm]			Fläche A _c [mm ²]	Volumen V [dm ³]	Masse m [kg]	Dichte ρ [kg/dm ³]
	l	h	b				
1	150,00	149,94	150,35	22500	3,382	6,877	2,03
2	149,06	149,83	149,75	22500	3,344	6,909	2,07
3	148,41	150,05	149,59	22500	3,331	6,776	2,03

- Probekörper - RC 50/50

Würfel	Abmessungen [mm]			Fläche A _c [mm ²]	Volumen V [dm ³]	Masse m [kg]	Dichte ρ [kg/dm ³]
	l	h	b				
1	150,00	149,76	150,08	22500	3,371	7,132	2,12
2	149,60	149,65	150,10	22500	3,360	7,214	2,15
3	150,40	150,15	150,25	22500	3,393	7,181	2,12

- Probekörper - RC N

Würfel	Abmessungen [mm]			Fläche A _c [mm ²]	Volumen V [dm ³]	Masse m [kg]	Dichte ρ [kg/dm ³]
	l	h	b				
1	150,20	149,80	150,00	22500	3,375	7,506	2,22
2	149,70	150,00	150,10	22500	3,370	7,408	2,20
3	150,00	149,60	149,90	22500	3,364	7,440	2,21

- Prüfung der Druckfestigkeit - RC 100

Betonalter bei Prüfung [d]	Würfel	Bruchkraft [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]		
			f _{c,cube}	f _{c,cube,dry}	f _{cm}
28	1	792.000	35,2	32,4	33,2
	2	838.000	37,2	34,3	
	3	806.000	35,8	33,0	

- Prüfung der Druckfestigkeit - RC 50/50

Betonalter bei Prüfung [d]	Würfel	Bruchkraft [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]		
			f _{c,cube}	f _{c,cube,dry}	f _{cm}
28	1	1.004.000	44,6	41,1	38,1
	2	941.000	41,8	38,5	
	3	853.000	37,9	34,9	

- Prüfung der Druckfestigkeit - RC N

Betonalter bei Prüfung [d]	Würfel	Bruchkraft [N]	Druckfestigkeit [N/mm ²]		
			f _{c,cube}	f _{c,cube,dry}	f _{cm}
28	1	1.049.000	46,6	42,9	42,9
	2	1.027.000	45,6	42,0	
	3	1.068.000	47,5	43,7	

- Konformität: Zuordnung Druckfestigkeitsklasse - RC 100

Konformität DIN EN 206-1	Druckfestigkeitsklasse C 20/25		
Kriterium 1: f _{cm} ≥ f _{ck} + 4	f _{cm} [N/mm ²]	f _{ck} + 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	33,2	29,0	ja
Kriterium 2: f _{ci} ≥ f _{ck} - 4	f _{ci} [N/mm ²]	f _{ck} - 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	32,4	21,0	ja
	34,3		ja
	33,0		ja

- Konformität: Zuordnung Druckfestigkeitsklasse - RC 50/50

Konformität DIN EN 206-1	Druckfestigkeitsklasse C 25/30		
Kriterium 1: f _{cm} ≥ f _{ck} + 4	f _{cm} [N/mm ²]	f _{ck} + 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	38,1	34,0	ja
Kriterium 2: f _{ci} ≥ f _{ck} - 4	f _{ci} [N/mm ²]	f _{ck} - 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	41,1	26,0	ja
	38,5		ja
	34,9		ja

- Konformität: Zuordnung Druckfestigkeitsklasse - RC N

Konformität DIN EN 206-1	Druckfestigkeitsklasse C 30/37		
Kriterium 1: f _{cm} ≥ f _{ck} + 4	f _{cm} [N/mm ²]	f _{ck} + 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	42,9	41,0	ja
Kriterium 2: f _{ci} ≥ f _{ck} - 4	f _{ci} [N/mm ²]	f _{ck} - 4 [N/mm ²]	erfüllt?
	42,9	33,0	ja
	42,0		ja
	43,7		ja

Prüfung der Wassereindringtiefe unter Druck

- Prüfung Wassereindringtiefe - RC 100

Würfel	d_{max} [mm]	Mittelwert d_{max} [mm]
1	19,0	20,3
2	21,0	
3	21,0	

- Prüfung Wassereindringtiefe - RC 50/50

Würfel	d_{max} [mm]	Mittelwert d_{max} [mm]
1	22,0	17,0
2	11,0	
3	18,0	

- Prüfung der Wassereindringtiefe - RC N

Würfel	d_{max} [mm]	Mittelwert d_{max} [mm]
1	23,0	16,0
2	11,0	
3	14,0	

Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 7 d - RC 100

7 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	3,55	3,60	2,60	3,10	3,90	4,10	3,90	2,70	3,00	3,10
Fläche 2	3,40	3,20	3,20	3,50	3,00	2,95	2,60	3,40	3,30	3,60
Fläche 3	4,60	4,60	3,50	3,10	3,00	3,50	2,50	4,90	3,20	3,50
Fläche 4	4,10	4,20	3,90	3,80	8,30	4,00	4,90	3,70	2,00	3,10

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 28 d - RC 100

28 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	7,90	6,55	8,05	6,90	8,50	11,10	8,95	11,15	10,00	10,20
Fläche 2	8,00	6,60	8,50	6,35	7,80	9,10	7,40	7,20	7,60	8,20
Fläche 3	7,55	8,10	7,60	7,35	7,80	10,50	8,10	8,80	9,85	10,85
Fläche 4	8,90	8,20	9,60	6,80	8,70	10,65	8,25	8,40	7,75	9,10

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 42 d - RC 100

42 d	Würfel 1				
	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]
Fläche 1	12,75	11,20	11,30	10,70	13,65
Fläche 2	10,20	10,10	10,10	9,60	10,95
Fläche 3	10,50	11,10	12,10	11,35	14,20
Fläche 4	11,40	9,80	10,65	9,40	12,40

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 7 d - RC 50/50

7 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	3,20	3,55	4,40	4,20	3,85	3,40	3,10	3,80	4,00	3,90
Fläche 2	4,00	4,70	4,20	3,80	3,20	3,80	4,60	3,80	3,80	4,80
Fläche 3	4,00	3,60	3,00	3,10	3,35	3,90	3,90	5,30	4,60	3,20
Fläche 4	3,75	3,70	4,40	3,90	3,60	3,30	2,90	3,60	3,65	3,00

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 28 d – RC 50/50

28 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	7,35	7,40	6,50	7,40	7,80	7,25	5,85	6,00	7,25	6,65
Fläche 2	8,45	8,70	7,70	7,20	7,65	6,35	5,95	5,85	7,70	7,90
Fläche 3	8,10	9,00	7,05	6,45	8,90	8,40	8,05	8,10	6,15	7,85
Fläche 4	7,05	8,85	7,45	7,00	7,25	8,30	7,00	6,30	7,00	7,15

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 42 d – RC 50/50

42 d	Würfel 1				
	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]
Fläche 1	8,00	8,25	9,15	8,95	9,00
Fläche 2	9,30	10,25	11,35	11,05	8,75
Fläche 3	12,45	11,50	10,25	9,70	9,20
Fläche 4	11,90	13,60	9,75	8,30	10,00

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 7 d – RC N

7 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	2,40	3,00	5,25	2,15	2,30	3,40	2,90	2,90	4,90	2,85
Fläche 2	2,45	2,50	4,65	3,10	4,35	3,50	2,80	3,20	2,40	2,75
Fläche 3	4,10	3,55	3,35	3,20	2,65	2,70	2,90	4,70	2,80	3,00
Fläche 4	1,55	2,70	4,00	3,10	2,30	3,10	5,65	2,40	2,10	2,90

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 28 d – RC N

28 d	Würfel 1					Würfel 2				
	$d_{k,point}$ [mm]									
Fläche 1	5,95	4,95	5,95	6,60	5,50	4,60	5,40	4,30	5,00	5,35
Fläche 2	4,90	4,90	5,10	5,50	5,15	5,40	6,00	5,70	5,10	5,45
Fläche 3	5,50	5,05	4,10	3,90	4,50	5,35	5,30	5,10	5,10	6,30
Fläche 4	5,50	7,10	6,30	6,00	5,70	6,35	4,50	6,40	4,40	6,50

- Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes: Messung d_k nach 42 d – RC N

42 d	Würfel 1				
	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]	$d_{k,point}$ [mm]
Fläche 1	6,30	8,25	5,30	8,75	7,70
Fläche 2	8,60	8,80	8,20	9,00	8,55
Fläche 3	7,15	5,70	4,40	5,10	5,50
Fläche 4	5,70	7,90	8,30	7,60	5,80

Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes – Abwitterung

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes: Massenzunahme nach 7 d Sättigung – RC 100

Probekörper Nr.	$m_{\text{Probekörper, vor}}$ [kg]	$m_{\text{Probekörper, nach}}$ [kg]	$\Delta m_{\text{Sättigung}}$ [g]
1	3,257	3,284	26,9
2	3,313	3,339	25,9
3	3,302	3,325	22,9
4	3,352	3,371	18,9
5	3,317	3,334	16,9

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes - Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln - RC 100

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	0,00	22,31	3,65	18,66	22500	0,829
2	0,00	16,61	3,75	12,86	22500	0,572
3	0,00	15,51	3,76	11,75	22500	0,522
4	0,00	16,26	3,76	12,50	22500	0,556
5	0,00	14,43	3,68	10,75	22500	0,478

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes - Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln - RC 100

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	18,66	15,90	3,66	30,90	22500	1,373
2	12,86	16,23	3,77	25,32	22500	1,125
3	11,75	23,10	3,59	31,26	22500	1,389
4	12,50	16,15	3,73	24,92	22500	1,108
5	10,75	21,78	3,63	28,90	22500	1,284

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes: Massenzunahme nach 7 d Sättigung - RC 50/50

Probekörper Nr.	$m_{\text{Probekörper, vor}}$ [kg]	$m_{\text{Probekörper, nach}}$ [kg]	$\Delta m_{\text{Sättigung}}$ [g]
1	3,388	3,399	11,00
2	3,431	3,446	15,00
3	3,442	3,453	11,00
4	3,392	3,412	20,00
5	3,345	3,361	16,00

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes - Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln - RC 50/50

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	0,00	11,57	3,89	7,68	22500	0,341
2	0,00	14,52	3,62	10,90	22500	0,484
3	0,00	12,05	3,82	8,23	22500	0,366
4	0,00	12,87	3,70	9,17	22500	0,408
5	0,00	12,21	3,70	8,51	22500	0,378

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes - Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln - RC 50/50

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	7,68	28,55	3,68	32,55	22500	1,447
2	10,90	32,20	3,71	39,39	22500	1,751
3	8,23	35,40	3,62	40,01	22500	1,778
4	9,17	33,68	3,76	39,09	22500	1,737
5	8,51	29,33	3,75	34,09	22500	1,515

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes: Massenzunahme nach 7 d Sättigung – RC N

Probekörper Nr.	$m_{\text{Probekörper, vor}}$ [kg]	$m_{\text{Probekörper, nach}}$ [kg]	$\Delta m_{\text{Sättigung}}$ [g]
1	3,566	3,575	9,00
2	3,632	3,643	11,00
3	3,613	3,623	10,00
4	3,524	3,531	7,00
5	3,595	3,605	10,00

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes – Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln – RC N

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	0,00	7,19	3,57	3,62	22500	0,161
2	0,00	6,96	3,75	3,21	22500	0,143
3	0,00	7,45	3,65	3,80	22500	0,169
4	0,00	8,58	3,69	4,89	22500	0,217
5	0,00	7,73	3,62	4,11	22500	0,183

- Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes – Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln – RC N

Probekörper Nr.	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	A [mm ²]	S_n [kg/m ²]
1	3,62	16,03	3,79	15,86	22500	0,705
2	3,21	16,73	3,69	16,25	22500	0,722
3	3,80	15,32	3,70	15,42	22500	0,685
4	4,89	17,13	3,77	18,25	22500	0,811
5	4,11	14,04	3,66	14,49	22500	0,644

Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Prüfdaten – RC 100

Probekörper Nr. d=100 mm h = 50 mm	Stromstärke I [mA]			Spannung U [V]		Prüfdauer [h]	mittlere Temperatur der Prüflösungen [°C]	
	Beginn	während	Ende	Beginn	Prüf- spannung		Anolyt	Katholyt
1	269	78	65	30	10	24	18	18
2	244	69	59					
3	246	69	59					

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Messen der Chlorideindringtiefe – RC 100

Probekörper Nr.	X _{d1} [mm]	X _{d2} [mm]	X _{d3} [mm]	X _{d4} [mm]	X _{d5} [mm]	X _{d6} [mm]	X _{d7} [mm]	X _{d8} [mm]	X _{d9} [mm]	X _d [mm]
1	10,20	10,90	11,50	12,10	11,10	11,80	11,50	12,90	12,20	11,58
2	11,80	12,60	13,00	13,80	12,80	13,20	12,20	15,70	12,90	12,79
3	16,80	10,90	11,40	9,35	11,40	11,20	11,50	12,00	11,50	11,16

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Prüfdaten – RC 50/50

Probekörper Nr d=100 mm h = 50 mm	Stromstärke I [mA]			Spannung U [V]		Prüfdauer [h]	mittlere Temperatur der Prüflösungen [°C]	
	Beginn	während	Ende	Beginn	Prüf- spannung		Anolyt	Katholyt
1	238	65	55	30	10	24	18	18
2	229	62	53					
3	225	62	53					

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Messen der Chlorideindringtiefe – RC 50/50

Probekörper Nr.	X _{d1} [mm]	X _{d2} [mm]	X _{d3} [mm]	X _{d4} [mm]	X _{d5} [mm]	X _{d6} [mm]	X _{d7} [mm]	X _{d8} [mm]	X _{d9} [mm]	X _d [mm]
1	11,00	11,00	12,85	11,60	10,20	10,10	6,60	6,80	10,40	10,06
2	9,90	9,90	10,90	9,40	9,05	8,90	9,45	9,50	9,50	9,61
3	9,50	9,60	9,65	9,80	9,00	9,80	9,45	9,70	11,10	9,73

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Prüfdaten – RC N

Probekörper Nr d=100 mm h = 50 mm	Stromstärke I [mA]			Spannung U [V]		Prüfdauer [h]	mittlere Temperatur der Prüflösungen [°C]	
	Beginn	während	Ende	Beginn	Prüf- spannung		Anolyt	Katholyt
1	152	71	53	30	15	24	20	20
2	149	67	53					
3	145	67	51					

- Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten: Messen der Chlorideindringtiefe – RC N

Probekörper Nr.	X _{d1} [mm]	X _{d2} [mm]	X _{d3} [mm]	X _{d4} [mm]	X _{d5} [mm]	X _{d6} [mm]	X _{d7} [mm]	X _{d8} [mm]	X _{d9} [mm]	X _d [mm]
1	11,55	12,05	10,40	12,30	10,25	12,20	10,20	10,45	10,50	11,10
2	9,30	10,00	8,70	10,20	10,10	9,80	10,55	11,30	10,70	10,07
3	11,10	9,80	12,50	10,25	11,15	10,80	12,10	15,60	15,15	11,10

Modellieren der Dauerhaftigkeit

- Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung: Berechnungsergebnisse

t [a]	d _k [mm]		
	RC 100	RC 50/50	RC N
1	3,55	3,10	2,19
5	7,94	6,92	4,89
10	11,22	9,79	6,92
15	13,75	11,99	8,47
20	15,87	13,84	9,78
25	17,75	15,48	10,94
30	19,44	16,95	11,98
35	21,00	18,31	12,94
40	22,45	19,58	13,83
45	23,81	20,76	14,67
50	25,10	21,89	15,47
55	26,32	22,96	16,22
60	27,49	23,98	16,94
65	28,62	24,96	17,64
70	29,70	25,90	18,30
75	30,74	26,81	18,94
80		27,69	19,56
85		28,54	20,17
90		29,37	20,75
95		30,17	21,32
100			21,87
105			22,41
110			22,94
115			23,46
120			23,96
125			24,46
130			24,94
135			25,42
140			25,88
145			26,34
150			26,79
155			27,23
160			27,67
165			28,10
170			28,52
175			28,94
180			29,35
185			29,75
190			30,15

- Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung: CS = 0,75 M.-%/Zement

t [a]	D _{app} (t) [x 10 ⁻¹² m ² /s]			C(x,t) [M.-%/Zement]		
	RC 100	RC 50/50	RC N	RC 100	RC 50/50	RC N
1	7,656	6,152	4,536	0,129	0,096	0,057
5	4,724	3,796	2,799	0,328	0,289	0,234
10	3,837	3,083	2,273	0,406	0,372	0,321
15	3,398	2,730	2,013	0,448	0,416	0,369
20	3,117	2,504	1,847	0,474	0,445	0,401
25	2,915	2,342	1,727	0,494	0,466	0,424
30	2,760	2,217	1,635	0,509	0,482	0,442
35	2,635	2,117	1,561	0,521	0,496	0,457
40	2,531	2,034	1,500	0,531	0,507	0,469
45	2,444	1,963	1,448	0,539	0,516	0,480
50	2,368	1,902	1,403	0,546	0,524	0,489

- Modellieren der Dauerhaftigkeit - Chlorideindringung: CS = 0,50 M.-%/Zement

t [a]	D _{app} (t) [x 10 ⁻¹² m ² /s]			C(x,t) [M.-%/Zement]		
	RC 100	RC 50/50	RC N	RC 100	RC 50/50	RC N
1	7,656	6,152	4,536	0,086	0,064	0,038
5	4,724	3,796	2,799	0,219	0,193	0,156
10	3,837	3,083	2,273	0,271	0,248	0,214
15	3,398	2,730	2,013	0,298	0,277	0,246
20	3,117	2,504	1,847	0,316	0,297	0,267
25	2,915	2,342	1,727	0,329	0,311	0,283
30	2,760	2,217	1,635	0,339	0,322	0,295
35	2,635	2,117	1,561	0,347	0,330	0,305
40	2,531	2,034	1,500	0,354	0,338	0,313
45	2,444	1,963	1,448	0,359	0,344	0,320
50	2,368	1,902	1,403	0,364	0,349	0,326
55	2,301	1,849	1,363	0,369	0,354	0,331
60	2,241	1,801	1,328	0,372	0,358	0,336
65	2,188	1,758	1,297	0,376	0,362	0,340
70	2,140	1,720	1,268	0,379	0,365	0,344
75	2,096	1,684	1,242	0,382	0,368	0,348
80	2,056	1,652	1,218	0,384	0,371	0,351
85	2,019	1,622	1,196	0,387	0,374	0,354
90	1,985	1,595	1,176	0,389	0,376	0,357
95	1,953	1,569	1,157	0,391	0,379	0,359
100	1,923	1,545	1,140	0,393	0,381	0,362
105	1,895	1,523	1,122	0,394	0,383	0,364
110	1,869	1,502	1,107	0,396	0,384	0,366
115	1,844	1,482	1,092	0,398	0,386	0,368
120	1,821	1,463	1,079	0,399	0,388	0,370
125	1,799	1,445	1,066	0,401	0,389	0,372
130		1,428	1,053		0,391	0,373
135		1,412	1,041		0,392	0,375
140		1,397	1,030		0,394	0,377
145		1,382	1,019		0,395	0,378
150		1,368	1,009		0,396	0,379
155		1,355	0,999		0,397	0,381
160		1,342	0,990		0,398	0,382
165		1,330	0,980		0,399	0,383
170		1,318	0,972		0,400	0,384
175		1,306	0,963		0,401	0,386
180			0,955			0,387
185			0,947			0,388
190			0,940			0,389
195			0,933			0,390

Berechnung der Wirkungsabschätzungsergebnisse

- Wirkungsabschätzungsergebnisse 1m³ RC-Beton

PE	Referenzgröße	Umrechnungsfaktor(en)	Wert [kg CO _{2e}]
D	6,01	1	6,01
E1	0,01364	1	0,01364
E2	-0,315	2,5	-0,785
F1	244	1	244,00
F4	-21,4	2	42,8
Summe			292,04

- Wirkungsabschätzungsergebnisse 1m³ MSB

PE	Referenzgröße	Umrechnungsfaktor(en)	Wert [kg CO _{2e}]
G	587	0,12, 0,0835	5,85
H1-H3	587	0,0835	49,01
H4	-11,97	0,0717	-0,86
I2	4,45	1	4,45
Summe			58,45

- Wirkungsabschätzungsergebnisse 1m² 2CO₂-Sandwichelement

PE	Referenzgröße	Umrechnungsfaktor(en)	Wert [kg CO _{2e}]
RC	292,04	0,56, 0,365	59,69
MSB	58,45	0,44, 0,365	9,39
A1	9,1	0,365	3,32
A2	1,08	0,365	0,39
B1	-10,00	0,365	-3,65
C1	3,10	0,365	1,13
C2	12,00	0,365	4,38
Summe			74,65

Berechnung des Zementanteils der EPD von Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45

- Berechnungsgrößen Zementanteil in Beton C35/45

<i>Berechnungsgröße</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Einheit</i>	<i>Wert</i>
<i>Zementanteil</i>	<i>z</i>	<i>M.-%</i>	14,0-15,1
<i>w/z-Wert</i>	-	-	0,48
<i>Dichte Zement</i>	<i>ρ_z</i>	<i>kg/m³</i>	2400
<i>GWP von einer Tonne Zement¹⁶⁵</i>	<i>GWP_z</i>	<i>kg CO_{2e}</i>	587
<i>Gesamt-GWP Produktionsstadium</i>	<i>g_{2,8}</i>	<i>kg/m³</i>	544,67

Berechnung der potentiellen Gesamt-CO₂-Emissionseinsparung bei Anwendung der Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung

- Berechnungsgrößen potentielle CO₂-Einsparung durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung

Berechnungsgrößen	Einheit	Wert
<i>CO₂-Emissionen (Jahr 2018)</i>	Mio t CO ₂	755,362 ¹⁶⁶
<i>CO₂-Emissionen (Jahr 2016)</i>	Mio t CO ₂	800.510 ¹⁶⁷
<i>Gesamtbedarf an Gesteinskörnung (Jahr 2016)</i>	Mio t	566 ¹⁶⁸
<i>Anteil der RC-Gesteinskörnung am Gesamtbedarf der Gesteinskörnung (Jahr 2016)</i>	%	12,7 ¹⁶⁹
<i>Theoretisches Karbonatisierungspotential der RC-Gesteinskörnung</i>	kg CO ₂ pro kg RC-Gesteinskörnung	0,315