

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gGmbH**

**Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen
für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau
– innovative Verwertungslösungen für gemischten
Mauerwerkabbruch**

Phase 2

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33674/02-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Min. Michael Bach

Weimar, Oktober 2020

**IAB - Institut für Angewandte Bauforschung
Weimar gGmbH**

**Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen
für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau
– innovative Verwertungslösungen für gemischten
Mauerwerkabbruch**

Phase 2

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 33674/02-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Min. Michael Bach

Weimar, Oktober 2020

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	33674/02-23	Referat	Fördersumme	279.530 €
----	--------------------	---------	-------------	------------------

Antragstitel **Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau – innovative Verwertungslösungen für gemischten Mauerwerkabbruch**

Stichworte

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
24 Monate	14.10.2018	13.10.2020	2

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Büscher GmbH & Co.KG Bült 54 48619 Heek	Tel	02568/388140
		Bearbeiter	Jürgen Büscher

Kooperationspartner IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH
Über der Nonnenwiese 1
99428 Weimar

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die wachsenden Anforderungen an die Recyclingfähigkeit und damit die Verwertung am Nutzungsende von Bauprodukten sowie die Frage der Ressourceneffizienz steht im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen Ressourceneffizienzprogramms. So soll die Einsatzquote von Recycling-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung bis 2030 deutlich erhöht werden.

Dementsprechend hat dieses Vorhaben folgende Ziele:

- Entwicklung von ressourceneffizienten Wandelementen auf der Basis von Mauerwerksbruch für tragende und nichttragende Innenbauteile, innovative Werkstoffentwicklung
- Entwicklung Low-Cost-Bausystem für den kostengünstigen Wohnungsbau
- Nutzung von Mauerwerksbruch als Rohstoffkomponente, Einsparung von nichterneuerbaren Rohstoffressourcen wie natürliche Gesteine
- Schutz der Umwelt durch Ressourceneinsparung und Schließung von Stoffkreisläufen

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Die Phase 2 dieses Projektes zur innovativen Verwertung von gemischtem Mauerwerkabbruch in Fertigteil-Bausystemen für den seriellen Wohnungsbau beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Untersuchungen Schwindverhalten, Gipseinflüsse
- Optimierung Recyclingverfahren
- Modifikation der Rezepturen im Labormaßstab
- Erprobung zweistufiger Mischverfahren
- Übertragen der Laborergebnisse auf die Werksfertigung, Erarbeitung Werksrezepturen
- Herstellung Funktionsmuster Fertigteilelemente
- Beurteilung der Bauteileigenschaften
- Erarbeitung von Gebäudeentwürfen
- Erprobung Mineralschaumdämmung

Ergebnisse und Diskussion

In diesem Projekt wird die Möglichkeit einer Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Fertigteilen aus Beton für den seriellen Wohnungsbau untersucht, d.h., auch in Mengenanteilen, die über das in den derzeit geltenden Vorschriften zulässige Maß hinausgehen.

Verwendet wurde dafür eine durch die Fa. Büscher hergestellte RC-Gesteinskörnung aus gemischtem Beton- und Mauerwerksabbruch.

In dieser Projektphase wurden die in Phase 1 ermittelten Betonrezepturen optimiert und in Werksrezepturen überführt.

Begleitend wurde ein möglicher schädigender Einfluss von Gips in der RC-Gesteinskörnung auf die Dauerhaftigkeit untersucht und ein alternatives Mischverfahren (Suspensionsmischtechnik) im Labormaßstab erprobt.

Basierend auf den Werksrezepturen wurden Fertigteil-Funktionsmuster hergestellt und auf ausgewählte Bauteileigenschaften hin untersucht.

Es wurde ein serielles Low-cost Bausystem erarbeitet, Detail- und Elementplanungen vorgenommen sowie ein Raummodul Funktionsmuster gefertigt.

Folgendes wurde im Rahmen der Untersuchungen festgestellt:

Eine Begrenzung des RC-Anteils auf 75 % vermindert das Schwinden deutlich

Es konnte kein schädigender Einfluss durch Gipsgehalte bis 5 M.-% nachgewiesen werden

Der Einsatz der Suspensionsmischtechnik erhöht die Frühfestigkeit, verschlechtert aber die Verarbeitbarkeit und rechtfertigt damit nicht den hohen gerätetechnischen Aufwand

An den Fertigteil-Funktionsmustern konnte nachgewiesen werden, dass der RC-Beton hinsichtlich Schalldämmung und das Last-Verformungsverhalten einem Referenzbeton mit natürlicher Gesteinskörnung gleichwertig ist.

Die durchgeführten Versuche zeigen, dass sich auch bei vollständigem Ersatz der Gesteinskörnung durch RC-Material ein Beton entsprechend DIN EN 206-1 produzieren lässt, der die gestellten Anforderungen erfüllt.

Ein Raummodul-Funktionsmuster konnte erfolgreich hergestellt werden.

Vorbehaltlich einer entsprechenden bauaufsichtlichen Zulassung ist es möglich, Betone mit >50 % RC-Gesteinskörnung herzustellen und im seriellen Wohnungsbau einzusetzen.

Aus umwelttechnischer Sicht können somit folgende Ziele erreicht werden:

- Einsparung von natürlichen Gesteinen als nichterneuerbare Rohstoffressource,
- Entlastung der Umwelt durch verminderten CO₂ Ausstoß infolge geringeren Transportaufwandes, da Abbruchmaterial in der näheren Umgebung verfügbar ist.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Für das ressourceneffiziente Bausystem, basierend auf Betonelementen aus gemischtem Mauerwerksbruch wird eine Zulassung vom DiBT angestrebt. Es erfolgte bereits eine Vorstellung der Projektidee beim Bundesministerium für Umwelt und Bauen in Berlin unter Anwesenheit vom DiBT. Die notwendigen Schritte für eine Zulassung wurden besprochen.

Das Raummodul-Funktionsmuster ist auf dem Gelände der Fa. Büscher zu besichtigen.

Fazit

Es ist möglich, einen qualitätsgerechten Beton auch mit höheren Gehalten an recycelter Gesteinskörnung herzustellen als derzeit zulässig.

Fertigteile aus dem untersuchten RC-Beton erfüllen die konstruktiven Anforderungen für einen Einsatz im kostengünstigen seriellen Wohnungsbau. Dabei können wertvolle Ressourcen eingespart werden.

Inhalt

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen	6
Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen	8
Zusammenfassung	9
Einleitung	10
Hauptteil	11
Untersuchungen und Ergebnisse	11
1 Optimierung Recyclingverfahren	11
1.1 Entwicklung Verfahrensanweisung	11
1.2 Erprobung sensorgestützte Sortierverfahren.....	13
1.2.1 Prinzip der sensorgestützten Sortierung	13
1.2.2 NIR- Spektrenaufnahme und hyperspektrale Erkennung im Labormaßstab.....	14
1.2.3 Erprobung am Praxisgemischen	15
1.2.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	16
2 Betonentwicklung.....	16
2.1 Untersuchungen Schwindverhalten, Gipseinflüsse	16
2.1.1 Schwinden	16
2.1.2 Wärmedehnung	17
2.1.3 Gipseinfluss	19
2.2 Modifikation der Rezepturen im Labormaßstab.....	22
2.2.1 Frischbetoneigenschaften	22
2.2.2 Festbetoneigenschaften	22
2.3 Untersuchungen zum Einsatz von Fasern	25
2.4 Fazit	25
2.5 Erprobung zweistufiger Mischverfahren	25
2.5.1 Grundlagen Suspensionsmischtechnik	25
2.5.2 Untersuchungen	26
2.5.3 Fazit	28
2.6 Übertragen der Laborergebnisse auf die Werksfertigung, Erarbeitung Werksrezepturen	29
3 Herstellung Funktionsmuster Fertigteilelemente	30
3.1 Herstellung Funktionsmuster	30
3.2 Beurteilung der Bauteileigenschaften	32
3.2.1 Schalldämmung	32
3.2.2 Bauteilprüfung	35
4 Entwicklung, Fertigung und Erprobung serielles Low-cost Bausystem	38
4.1 Entwicklung Raummodul-Funktionsmuster	38
4.2 Fertigung und Erprobung – Raummodul-Funktionsmuster.....	41
5 Erprobung Mineralschaumdämmung im Labormaßstab	43
5.1 Entwurf Sandwich-Element.....	43
5.2 Mineralschaumentwicklung.....	44
5.3 Funktionsmuster	45
5.3.1 Fertigung Sandwichelemente	45
5.3.2 Schaumversuche an den Funktionsmustern	46

5.3.3	Untersuchungen zur Dämmwirkung der Sandwichwand	48
5.4	Sandwichelemente aus RC-Beton	48
	Fazit und Ausblick.....	49
	Literaturverzeichnis	50

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Grafiken und Tabellen

Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Prinzip der Sensorgestützten Sortierung	14
Bild 2:	Bandsortieranlage am IAB	14
Bild 3:	Mittelwertspektren sortenreiner Baustoffe (NIR).....	15
Bild 4:	Schwindmessung	17
Bild 5:	Schwindmessung	20
Bild 6:	Klimaschrank.....	20
Bild 7:	Dehnungsverlauf	21
Bild 8:	Druckfestigkeit und E-Modul mit Gips.....	21
Bild 9:	Druckfestigkeit.....	23
Bild 10:	Schwinden.....	23
Bild 11:	Schädigungsverlauf	24
Bild 12:	geschädigter Probekörper.....	24
Bild 13:	geschädigter Probekörper.....	24
Bild 14:	ungeschädigter Probekörper.....	24
Bild 15:	Prinzipskizze 2-stufiges Mischverfahren mit separatem Suspensionsmischer	26
Bild 16:	Laborsuspensionsmischer der Fa. Sommer im IAB Weimar	27
Bild 17:	Druckfestigkeitentwicklung.....	28
Bild 18:	Schalung Wandelement.....	30
Bild 19:	RC-Baustoffgemisch	30
Bild 20:	gefüllter Mischer.....	30
Bild 21:	Betonage Komplett-Wand.....	31
Bild 22:	Prüfung Ausbreitmaß	31
Bild 23:	Probekörper	31
Bild 24:	Prinzipdarstellung Schallprüfstand.....	32
Bild 25:	Schallprüfstand am IAB	32
Bild 26:	Frequenzverlauf Sorte 109	34
Bild 27:	Frequenzverlauf Sorte 3	34
Bild 28:	Funktionsmuster im Prüfstand	35
Bild 29:	Sensor zur Erfassung der Durchbiegung.....	35
Bild 30:	Maschinenprotokoll mit Traversenweg	36
Bild 31:	Maschinenprotokoll mit mittiger Durchbiegung.....	37
Bild 32:	Raummodul-Funktionsmuster – Anschlussdetail Wand-Decke (BÜ)	38
Bild 33:	Raummodul-Funktionsmuster – Anschlussdetail Wand-Wand-Kraftschluss.....	39
Bild 34:	Raummodul-Funktionsmuster – Kraftschlüssige Verbindung Wand-Boden durch Anschlussbewehrung.....	39
Bild 35:	Raummodul-Funktionsmuster – Detail Transportanker (BÜ)	40
Bild 36:	Raummodul-Funktionsmuster – Konstruktive Durchbildung	40
Bild 37:	Raummodul-Funktionsmuster – Fertigung der Demonstrationselemente	41
Bild 38:	Raummodul-Funktionsmuster (Außenansicht)	42
Bild 39:	Raummodul-Funktionsmuster (Innenansicht).....	42
Bild 40:	Sandwich-Element - Prinzipieller Aufbau.....	43
Bild 41:	Funktionsmuster Sandwichelemente	46
Bild 42:	Versuchsaufbau zur Befüllung der Musterelemente.....	46
Bild 43:	Befüllung der kleinen Musterelemente mit mineralischem Dämmschaum	47
Bild 44:	Musterelemente nach dem Entschalen	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Ergebnis der Sortierung	16
Tabelle 2:	Mischungszusammensetzung.....	18
Tabelle 3:	Wärmedehnkoeffizienten	18
Tabelle 4:	Mischungszusammensetzung.....	22
Tabelle 5:	Abwitterung	24
Tabelle 6:	Verarbeitbarkeit.....	28
Tabelle 7:	Druckfestigkeitsentwicklung.....	28
Tabelle 8:	Werksrezepturen.....	29
Tabelle 9:	Druckfestigkeiten Werksversuch.....	31
Tabelle 10:	Schalldämm-Maß.....	33
Tabelle 11:	Wärmeleitfähigkeit Sandwichelement.....	48

Verzeichnis von Begriffen, Abkürzungen und Definitionen

$R'w$	bewertetes Schalldämm-Maß in dB
ρ_d	Rohdichte in kg/m^3
XC1 bis XC4	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Karbonatisierung
XF1 bis XF4	Expositionsklassen für Gefahr von Frostangriff mit oder ohne Taumittel
$\varepsilon_{s,t}$	Schwindmaß zum Zeitpunkt t
Gesteinskörnung:	für die Verwendung in Beton geeigneter gekörnter, mineralischer Stoff, der natürlich, künstlich, wiedergewonnen oder recycelt sein kann
recycelte Gesteinskörnung:	Gesteinskörnung, die durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen wird
Betonzusatzmittel:	Stoff, der während des Mischvorgangs des Betons in kleinen Mengen, bezogen auf den Zementgehalt, zugegeben wird, um die Eigenschaften des Frischbetons oder Festbetons zu verändern
Korngruppe:	Bezeichnung einer Gesteinskörnung mittels unterer (d) und oberer (D) Siebgröße, angegeben als d/D
Frischbeton:	Beton, der fertig gemischt ist, sich noch in einem verarbeitbaren Zustand befindet und durch das gewählte Verfahren verdichtet werden kann
Wasserzementwert:	auch w/z-Wert; Masseverhältnis des wirksamen Wassergehaltes zum Zementgehalt im Frischbeton
Schwinden:	Längenänderung einer Betonprobe durch Feuchtigkeitsabgabe
Schwindmaß	auf die Messlänge bezogene Längenänderung des Betons
E-Modul:	Materialkennwert für das elastische Verformungsverhalten eines durch Druck oder Zug beanspruchten Werkstoffs

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wurde die Möglichkeit einer Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Fertigteilen aus Beton für den seriellen Wohnungsbau untersucht.

In dieser Projektphase wurden folgende Arbeiten ausgeführt:

Zur Optimierung des Recyclingverfahrens wurde durch die Fa. Büscher eine Verfahrensweisung für die Annahme und Aufbereitung der recycelten Materialien aufgestellt und implementiert.

Durch das IAB Weimar wurden die in der Projektphase 1 entwickelten Rezepturen weiter optimiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf einer Reduktion des Schwindens.

Weiterhin wurden die möglichen schädlichen Einflüsse von Gipsgehalten bis zu 5 M.-% auf die Dauerhaftigkeit des Betons sowie ein zweistufiges Mischverfahren (Suspensionsmischverfahren) untersucht.

Basierend auf dieser Mischungsoptimierung wurden Werkrezepturen aufgestellt und in das Sortenverzeichnis der Mischanlage der Fa. Büscher übernommen.

Aus einer ausgewählten Rezeptur wurden im Fertigteilwerk Büscher Funktionsmuster hergestellt. An diesen wurden im IAB Weimar als relevante Bauteileigenschaften die Schalldämmung und das Last-Verformungsverhalten bestimmt.

Durch die Fa. Büscher wurde ein statisch-konstruktives Konzept für ein serielles Low-cost Bausystem erarbeitet, Detail- und Elementplanungen vorgenommen. Darauf basierend wurde ein Raummodul Funktionsmuster gefertigt.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

Bereits eine Reduktion des RC-Gehaltes um 25 M.-% verringert das Schwinden signifikant. Ein schädigender Einfluss von Gipspartikeln konnte bei der untersuchten Exposition nicht nachgewiesen werden. Die Verwendung von Fasern, als Bewehrung sowie der Einsatz eines zweistufigen Mischverfahrens, erwiesen sich als nicht zielführend.

Die Bauteilprüfung der hergestellten Funktionsmuster zeigte, dass Wandelemente aus RC-Beton hinsichtlich Schalldämmung und das Last-Verformungsverhalten annähernd gleichwertig sind.

Ein Raummodul Funktionsmuster konnte erfolgreich erstellt werden.

Die Herstellung von Sandwichelementen mit Mineralschaumdämmung aus RC-Beton ist nur bedingt möglich.

Aus umwelttechnischer Sicht können somit folgende Ziele erreicht werden:

- Einsparung von natürlichen Gesteinen als nichterneuerbare Rohstoffressource,
- Entlastung der Umwelt durch verminderten CO₂ Ausstoß infolge geringeren Transportaufwandes, insofern Abbruchmaterial in der näheren Umgebung verfügbar ist.

Zur Realisierung des Projekts haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

Büscher GmbH & Co.KG mit dem Teilvorhaben 1 „Entwicklung und Fertigung serieller Bausysteme aus gemischtem Mauerwerksbruch“,

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH mit dem Teilvorhaben 2 „Werkstoffuntersuchungen, Bauteiluntersuchungen“.

Das Projekt wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 33674/02-23).

Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Recyclingfähigkeit und damit die Verwertung am Nutzungsende von Bauprodukten sowie die Frage der Ressourceneffizienz steht im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen Ressourceneffizienzprogramms. So soll die Einsatzquote von Recycling-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung bis 2030 deutlich erhöht werden.

Um die nachhaltige und effiziente Materialverwendung in der Entwicklung von Betonfertigteilen durchsetzen zu können, müssen die technischen Voraussetzungen für die Anwendung der Abfallstoffe geschaffen werden. Dazu gehören die Entwicklung von Aufbereitungstechnologien des gemischten Bauschuttes, die Entwicklung von Betonrezepturen auf der Basis von Recyclingmaterial als Substitut für natürliche Gesteinskörnungen, einschließlich der notwendigen Performanceuntersuchungen mit dem Ziel der nachhaltigen Verbesserung der Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Eine Verwertung ist aus umweltpolitischer und wirtschaftlicher Sicht dringend erforderlich.

Ziel dieses von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts war die Entwicklung von Fertigteil-Bausystemen unter Verwendung von Recyclingmaterial als innovative Verwertungsmöglichkeit für Beton- und Mauerwerksabbruch.

In Hinsicht auf eine hohe Ressourceneffizienz sollten auch Rezepturen mit Gehalten an Recyclingmaterial außerhalb des derzeit normativ zulässigen Bereichs untersucht werden.

Dementsprechend hatte dieses Vorhaben folgende konkreten Ziele:

- Entwicklung von ressourceneffizienten Wandelementen auf der Basis von Mauerwerksbruch für tragende- und nichttragende Innenbauteile, innovative Werkstoffentwicklung,
- Entwicklung Low-Cost-Bausystem für den kostengünstigen Wohnungsbau,
- Nutzung von Mauerwerksbruch als Rohstoffkomponente, Einsparung von nichterneuerbaren Rohstoffressourcen wie natürliche Gesteine,
- Schutz der Umwelt durch Ressourceneinsparung und Schließung von Stoffkreisläufen.

Zur Realisierung dieses Ziels haben sich die folgenden Partner aus Industrie und Forschung zusammengeschlossen:

Büscher GmbH & Co.KG

Teilvorhaben 1: Entwicklung und Fertigung serieller Bausysteme aus gemischtem Mauerwerksbruch

IAB - Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH

Teilvorhaben 2: Werkstoffuntersuchungen, Bauteiluntersuchungen

Die in diesem Bericht behandelte zweite Projektphase mit einer Laufzeit vom 14.10.2018 bis 13.10.2020 umfasst im Wesentlichen folgende Arbeiten:

- Optimierung der in Phase 1 untersuchten Rezepturen,
- Optimierung des Recyclingverfahrens,
- Erstellung von Werksrezepturen, Fertigung und Prüfung von Funktionsmustern,
- Erarbeitung von Gebäudeentwürfen.

Hauptteil

Untersuchungen und Ergebnisse

Für die Realisierung des Entwicklungsziels „Entwicklung von ressourceneffizienten Bausystemen für den seriellen und kostengünstigen Wohnungsbau – innovative Verwertungslösungen für gemischten Mauerwerkabbruch“ ist folgender Lösungsansatz vorgesehen:

Betonentwicklung:

- Entwicklung Recyclingwerkstoff auf der Basis von aufbereitetem Bauschutt,
- Sichere Aussortierung schädlicher Bestandteile wie Gips,
- Dauerhaftigkeit für Innenbauteile in Performanceuntersuchungen nachgewiesen.

Wandelemente:

- Fertigung als tragende/nichttragende Innenwände aus hydraulisch gebundenem Mauerwerksbruch (Mauerwerksersatz),
- hohe Oberflächenqualität (spachtel- / tapezierfähig).

Bausystem:

- Entwicklung serielles Bausystem auf der Basis horizontal und vertikal kombinierter Raummodule,
- Low-Cost Bausystem für den sozialen Wohnungsbau.

1 Optimierung Recyclingverfahren

1.1 Entwicklung Verfahrensanweisung

Die nachstehende Verfahrensanweisung für die Annahme und Aufbereitung der recycelten Materialien stellt einen Auszug aus der Verfahrensanweisung „Herstellung von Büscher-Wänden nach „allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung“ (abZ)“ der Fa. Büscher dar.



- Das Unternehmen Büscher verfügt über eine Genehmigung für den Betrieb einer Abfallbehandlungs-/Bauschuttzubereitungsanlage nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) Aktenzeichen 63-00555.
- Es wird ausschließlich Material recycelt, welches die LAGA Klasse Z.0 bis Z.1.0 erfüllt.
- Zugelassene Abfallschlüssel für das Recycling sind:
AVV 17 01 01 Beton
AVV 17 01 02 Ziegel
AVV 17 01 03 Fliesen und Keramik
AVV 17 01 07 Gemische aus Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik
- Menge, Abfallschlüssel, Anfallstelle/Herkunft und Abfallerzeuger werden in der Warenwirtschaftssoftware dokumentiert und archiviert (ID).
- Die Mengenermittlung erfolgt über eine geeichte Waage, dokumentiert auf einem Wägeschein.
- Die Annahme unterliegt hinsichtlich der Zusammensetzung einer visuellen Kontrolle per Kameratechnik (ID).
- Bauschutt für die Verwendung in Büscher-Wänden wird separat von Bauschutt für anderweitige Verwendung eingelagert.
- Beim/Nach dem Abkippen auf dem Gelände erfolgt eine optische Sichtkontrolle durch den Platzmeister (PM). Werden Abweichungen zu den Angaben auf dem Wägeschein festgestellt, wie z. B. Verunreinigungen, Fremdstoffe, wird dieses auf dem Wägeschein dokumentiert und die Lieferung ins Rohstofflager für die anderweitige Verwendung verfahren.

1.1.2 Klassifizierung für den Einsatz in Büscher-Wand

- In einer Vorsortierung werden Stör- und Fremdstoffe mit einem Sortiergreifer aussortiert und dem jeweiligen Verwertungsverfahren zugeführt (PM)
- Folgende Anlieferungen sind für den Brechvorgang für den Einsatz in Büscher-Wänden gesperrt und werden ins Rohstofflager für die anderweitige Verwendung verfahren:
 - Asphalt, Bitumen (erlaubter Anteil $\leq 5\%$)
 - gipshaltige Materialien (erlaubter Anteil $\leq 1\%$)
 - Humus/Böden
 - Schadstoffe
 - undefinierbare Fremdstoffe
 - bei Zweifel

1.1.3. Aufbereitung

- Der Bruch erfolgt per Brechanlage mit zugeschaltetem Magneten zur Entfernung von Metall/Eisen, sowie einem Windsichter zur Entfernung von leichten Störstoffen (z. B. Papier/Folienstückchen).
- Zum Einsatz kommen hier geeignete Fachunternehmen mit geprüfter Anlagentechnik.
- Stand Juli 2020 wird das Material aus dem Rohstofflager aufbereitet, sobald die Mengenschwelle von ca. 3.000 Tonnen erreicht ist.
- Die Aufbereitungsdauer liegt bei ca. 4-7 Tagen.
- Die Mengenerfassung der Aufbereitung ist in der Software Mitan dokumentiert.
- Die Siebanlage ist der Brechanlage nachgeschaltet.
- Die speziellen Siebe werden geräteabhängig eingesetzt mit dem Ziel, aus den gesiebten Korngruppen den in der abZ angegebenen zulässigen Körnungsaufbau der recycelten Gesteinskörnungen (Sieblinienbereich: AB 0-22) zu erreichen.
- Es werden mindestens 2 Korngruppen hergestellt.
- Damit die Materialprüfungen Ergebnisse über den gesamten Aufbereitungszeitraum darstellen, ist folgende Probeentnahme festgelegt: Alle 2 Stunden werden ca. 3 kg recycelte Gesteinskörnung pro Korngröße aus dem Siebgut entnommen und in Big-Bags für die Probeentnahme der Materialprüfungen gesammelt.
- Sichtkontrolle der Korngröße und Abgleich mit Rückstellproben.
- Das Überkorn $> 22\text{ mm}$ wird in den Brechvorgang zurückgeführt.

1.1.4 Einlagerung

Mit dem Radlader werden die verschiedenen Korngrößen in das jeweilige Zwischenlager gefahren, welches für die Verwendung in der Produktion gesperrt ist, und dort mit der Radladerschaufel homogenisiert. Die Kennzeichnung des Sperrlagers erfolgt durch den Platzmeister (PM).

1.1.5 Rohstoffprüfungen der recycelten Gesteinskörnung

- Die Prüfungen erfolgen auf
 - stoffliche Zusammensetzung (Der Gipsanteil in der Gruppe X wird zusätzlich ermittelt.)
 - Kornaufbau/Sieblinie der einzelnen Korngruppen
 - Wasseraufnahme nach 10 Minuten und 24 Stunden
 - Rohdichte
- Die Prüfungen erfolgen an dem unter Punkt 1.1.3. beschriebenen, über den Bruchprozess gesammelten Rohstoffe und werden von einem zugelassenen externen Prüfinstitut aus der Probeentnahme durchgeführt. (Stand 7/2020 Roxeler Ingenieurgesellschaft).

1.1.6 Freigabe für den Einsatz in der Produktion

- Die Freigabe der aufbereiteten Charge für die Verwendung in der Produktion für Büscher-Wände erfolgt schriftlich durch die Qualitätssicherung, nach vorliegenden positiven Ergebnissen der Materialprüfung (QS).
- Gesperrte Chargen werden aus dem Sperrlager in gesonderte Rohstofflager für anderweitige Verwendungen transportiert (PM).

1.2 Erprobung sensorgestützte Sortierverfahren

1.2.1 Prinzip der sensorgestützten Sortierung

Sensorgestützte Sortierverfahren beruhen auf der Reflexionsmessung. Dabei wird das aufgegebene Material unter einer Strahlungsquelle (Emitter) hindurch geführt. Die Oberfläche der Probe reflektiert einen Teil der Strahlung, der von der Kamera (Spektrograph) aufgezeichnet wird. Abhängig vom Kameratyp und Materialart ergibt sich für jeden Aufnahmepunkt ein charakteristisches Spektrum entsprechend der chemisch-mineralogischen Eigenschaften des Materials im betrachteten Wellenlängenbereich.

Diese Spektren werden den betrachteten Materialien zugeordnet und in einer Datenbank hinterlegt. Sie bilden die Grundlage für spätere Sortieraufgaben. bei denen die Spektren des Sortiergutes nach bestimmten Kriterien mit den hinterlegten Spektren abgeglichen werden. Entspricht das Sortiergut der gewählten Charakteristik, wird es mittels Druckluft vom übrigen Material getrennt. (Bild 1)

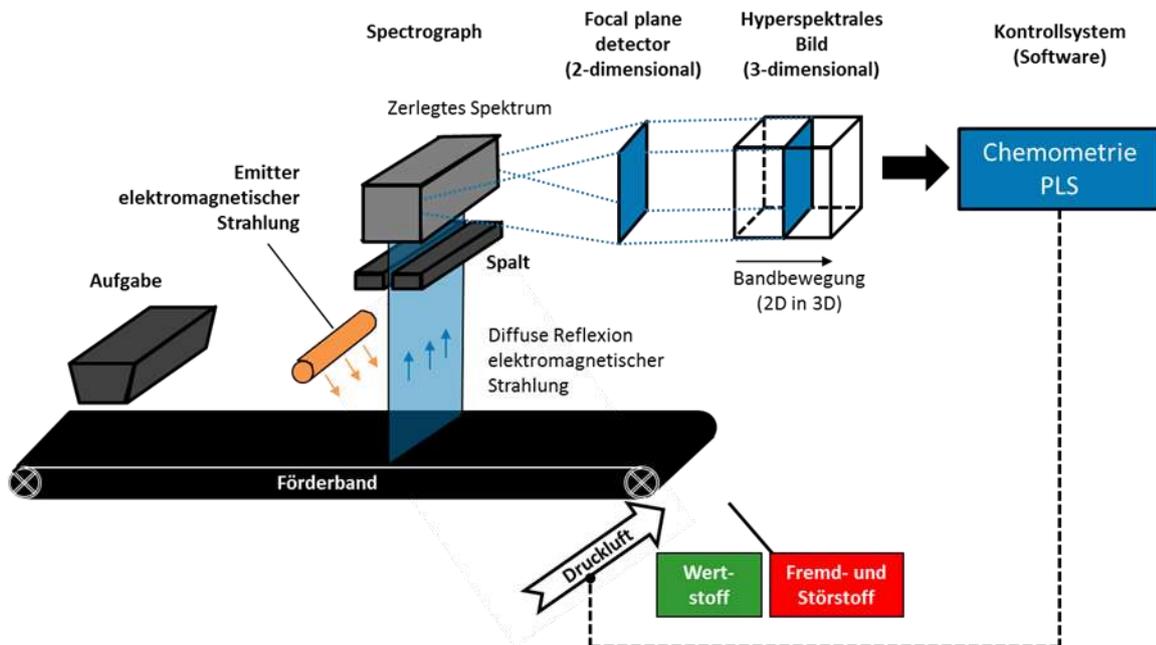


Bild 1: Prinzip der Sensorgestützten Sortierung

1.2.2 NIR- Spektrenaufnahme und hyperspektrale Erkennung im Labormaßstab

1.2.2.1 NIR-Spektrenaufnahme

Am IAB existiert eine Baustoffsammlung aus sortenreinem Gummi-, Holz-, Porenbeton-, Kalksandstein-, Ziegel-, Polystyrol-, Normalbeton-, Leichtbeton- Kunststoff-, Bitumen-, Keramik- und Gipsmaterial in gebrochenem Zustand (Bild 2). Diese diente zur Erstellung einer Baustoffbibliothek, in der die physikalische und chemisch-mineralogische Charakterisierung der Baustoffe erfasst ist. Mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Technik (Bandsortierer S+S, Bild 2) und Software (KUSTA_belt, KUSTA_spec) wurden von den einzelnen Baustoffen NIR-Spektren aufgenommen. Diese liegen der künftigen Erkennung zugrunde.



Bild 2: Bandsortieranlage am IAB

Aus der Baustoffsammlung wurden Modellgemische hergestellt, an denen die entwickelten Analyseprogramme erprobt und optimiert wurden. Ausgangspunkt für die zu erstellenden Analyseprogramme bildeten die aus den von Hintergrundeinflüssen bereinigten NIR-Aufnahmen der sortenreinen Baustoffe gewonnenen Mittelwertspektren (Bild 3). Die Analyseprogramme wurden theoretisch und praktisch erprobt.

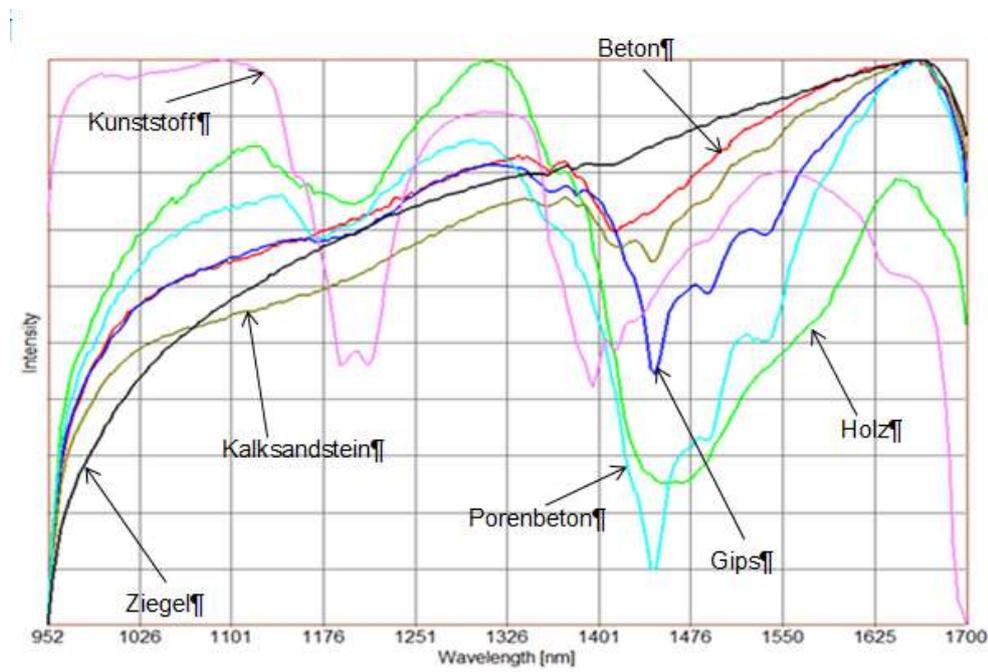


Bild 3: Mittelwertspektren sortenreiner Baustoffe (NIR)

Amorphe und schwarze Stoffe, wie z.B. bitumenhaltige Materialien und Asphalt, können aufgrund der fehlenden Reflexion im NIR-Bereich nicht erkannt werden. Farblose transparente Stoffe können weder mit NIR-, noch mit Farbspektren erkannt werden. Letzteres betrifft z.B. Weißglas.

1.2.3 Erprobung am Praxisgemischen

Für die Untersuchung wurde das RC-Baustoffgemisch der Fa. Büscher, welches auch für alle anderen im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Versuche verwendet wurde, eingesetzt. Das Gemisch bestand im Lieferzustand augenscheinlich hauptsächlich aus Betonbruch und Gesteinskörnung mit geringen Anteilen an Ziegel, Kalksandstein, Steinzeug und Asphalt. Da der Gipsanteil im Originalgemisch mit 0,2 M.-% sehr gering war, wurden den zu untersuchenden Fraktionen weitere 3 M.-% Gips (aus gebrochenen Stuckelementen) zugegeben. Die Sortierung erfolgte mittels NIR-Analyse, wobei Holz- und Gipspartikel ausgetragen wurden. Untersucht wurden die Fraktion > 16 mm und die Fraktion 8 - 16 mm.

Ziel war, durch die Sortierung ein Recyclingmaterial zu gewinnen, das den Forderungen der DIN 4226-101 für RC-Gesteinskörnung entspricht und als solche verwendet werden kann. Dafür sollten möglichst alle Störstoffe aus dem Aufgabematerial ausgetragen werden.

Die prozentuale Zusammensetzung des Nichtaustrags nach Stufensortierung wurde für beide Fraktionen ermittelt und mit den Grenzwerten für RC-Gesteinskörnung nach DIN 4226-101 verglichen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Der Störstoff Gips wurde aus beiden untersuchten Fraktionen 8/16 und 16/22 zielsicher ausgetragen.

Schwankungen in den Massenanteilen der übrigen Inhaltsstoffe vor und nach Sortierung sind zum einen auf den Austrag des Gipses aber auch auf Fehlausträge von insbesondere Beton und Gesteinskörnung zurückzuführen.

Tabelle 1: Ergebnis der Sortierung

Bestandteile		8/16		16/22		Grenzwerte DIN 4226			
		vor Sortierung M.-%	nach Sortierung M.-%	vor Sortierung M.-%	nach Sortierung M.-%	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Ungebundene Gesteinskörnung	R_u	15,6	16,1	11,2	11,1				
Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton	R_c	70,5	72,8	73,8	76,0				
	R_u+R_c	86,2	88,9	84,9	87,1	≥ 90 M.-%	≥ 70 M.-%	≤ 20 M.-%	
Ziegel-Mauersteine (nicht porosiert), Klinker, Mauer- und Dachziegel	R_b	5,2	5,4	3,9	4,2				$R_{cu}+R_b$ ≥ 80 M.-%
Kalksandstein-Mauersteine, Leichtbeton, nicht schwimmender Porenbeton		2,9	3,0	4,5	4,9				
Steinzeug		1,5	1,6	2,6	2,8				
	ΣR_b	9,7	10,0	11,0	11,8	≤ 10 M.-%	≤ 30 M.-%	≥ 80 M.-%	
Bitumenhaltige Materialien, Asphalt	R_a	0,9	0,9	0,9	1,0	≤ 1 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 20 M.-%
Glas	R_g	0,1	0,1	0,0	0,0				
verschiedene sonstige Materialien: Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips	X	3,2	0,1	3,2	0,1				
	R_g+X	3,3	0,1	3,2	0,1	≤ 1 M.-%	≤ 2 M.-%	≤ 2 M.-%	≤ 2 M.-%
schwimmendes Material	FL	0,1	0,0	0,0	0,1	≤ 2 Vol.-%	≤ 2 Vol.-%	≤ 2 Vol.-%	≤ 5 Vol.-%

1.2.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Praxismaterial kann bei entsprechender Sauberkeit (Siebung, Windsichtung, Waschung etc.) erfolgreich sortiert werden. Gipspartikel und organische Bestandteile können im NIR-Bereich mit hohem Erkennungsgrad sortiert werden. Die Sortierrate für Gips mittels NIR-Erkennung erreichte > 98 %.

Teilweise sind Verbundpartikel vorhanden, deren Erkennung erschwert wird, da bei den optischen Verfahren nur die Partikeloberfläche aus einer Richtung erfasst wird. Je mehr Verbundpartikel im Sortiergut enthalten sind, desto mehr anhaftende Fremdstoffe (z. B. Putz) sind im Zielmaterial enthalten. Der Anteil der Verbundpartikel im Sortiergut sinkt mit steigendem Aufschlussgrad. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit der Erkennung. Allerdings nimmt die Partikelgröße mit steigendem Aufschlussgrad ab. Partikelgrößen unter 8 mm können mit den gewählten Verfahren derzeit nicht ausreichend sortiert werden.

2 Betonentwicklung

2.1 Untersuchungen Schwindverhalten, Gipseinflüsse

2.1.1 Schwinden

Um die Auswirkungen der Zusammensetzung des RC-Baustoffgemischs auf das Schwindverhalten des Betons zu ermitteln, wurden Versuchsmischungen mit wechselnden Gehalten an Beton, Ziegel und Kalksandstein untersucht.

Die Messung des Schwindens der untersuchten Betonmischungen erfolgte auf Grundlage von DIN 1048-5 und DAfStb Heft 422 "Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048". Das Schwinden innerhalb der ersten Tage bleibt unberücksichtigt.

Als Probekörper wurden Prismen mit den Abmessungen 360 mm x 100 mm x 100 mm hergestellt (IAB).

Das Schwindmaß errechnet sich aus der Längenänderung über den Messzeitraum.

Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt.

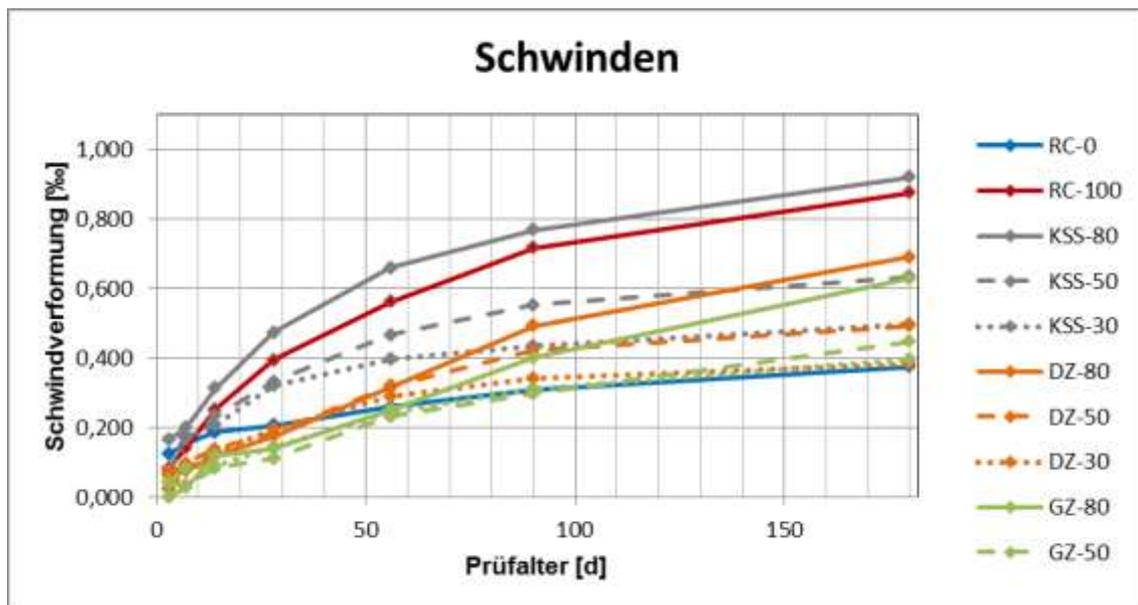


Bild 4: Schwindmessung

Hinsichtlich des Einflusses der untersuchten Komponenten auf das Schwindverhalten des Betons war Folgendes festzustellen:

- Beton-RC:** bis 30 % Substitution keine signifikante Erhöhung des Schwindmaßes,
bis 75 % Substitution geringfügige Erhöhung des Schwindmaßes um ca. 20-30 %,
starke Erhöhung des Schwindmaßes bis Faktor 2,5 bei 100 % Anteil,
- Kalksandstein:** starke Erhöhung des Schwindmaßes bis Faktor 2,5 bei 80 % Anteil,
- Dachziegel/
Mauerwerkshochlochziegel:** bis 30 % Substitution keine signifikante Erhöhung des Schwindmaßes,
bis 50 % Substitution geringfügige Erhöhung des Schwindmaßes um ca. 20-30 %,
bei 80 % Substitution deutliche Erhöhung des Schwindmaßes um ca. 70-80 %.

Das Schwinden der Mischungen mit Ziegelanteilen ab 50 % ist gegenüber der Referenz- sowie den Beton-RC und Kalksandstein-Mischungen zunächst verzögert. Erst ab einem Probalter von 56 Tagen zeigt sich die Erhöhung des Schwindmaßes gegenüber der Referenz.

2.1.2 Wärmedehnung

2.1.2.1 Mischungszusammensetzung

Insgesamt wurden 12 Probemischungen unterschiedlicher Zusammensetzung ausgeführt. Die Zusammensetzung der Mischungen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Mischungszusammensetzung

Mischung Nr.	Bezeichnung	natürl. GK	RC-Material	Kalksandstein	Dachziegel	Gitterziegel
		Vol.-%		Vol.-%	Vol.-%	Vol.-%
18/003	RC-0	100	0	0	0	0
18/004	RC-50	50	50	0	0	0
18/005	RC-100	0	100	0	0	0
18/006	KSS-25	75	0	25	0	0
18/007	KSS-50	50	0	50	0	0
18/008	KSS-100	0	0	100	0	0
18/009	DZ-25	75	0	0	25	0
18/010	DZ-50	50	0	0	50	0
18/011	DZ-100	0	0	0	100	0
18/012	GZ-25	75	0	0	0	25
18/013	GZ-50	50	0	0	0	50
18/014	GZ-100	0	0	0	0	100

Für alle Mischungen einheitlich wurden ein Zementgehalt von 300 kg/m³ und ein w/z-Wert von 0,60 gewählt.

Aus jeder Mischung wurden 3 prismatische Probekörper mit den Abmessungen 360 x 100 x 100 mm hergestellt. In diese wurden an den beiden Längsenden Messzapfen zu Längenmessung einbetoniert.

Die Messung der Wärmedehnung erfolgte in einem Gestell zur Längenmessung mit digitaler Erfassung von Länge und Temperatur im Bereich von 20 °C bis 80 °C.

Tabelle 3: Wärmedehnkoeffizienten

Probemischung	Wärmedehnkoeffizient [K ⁻¹]
Referenz	7,69E-06
RC-50	8,85E-06
RC-100	1,11E-05
KSS-25	7,05E-06
KSS-50	8,30E-06
KSS-100	1,02E-05
DZ-25	7,17E-06
DZ-50	7,31E-06
DZ-100	8,44E-06
GZ-25	7,06E-06
GZ-50	7,63E-06
GZ-100	8,12E-06

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten aller untersuchten Mischungen liegen relativ nah beieinander mit einer maximalen Abweichung von 15 % vom Referenzwert. Lediglich die Mischungen RC-100 und KSS-100 zeigen etwas erhöhte Wärmeausdehnungskoeffizienten von ca. 40 % über dem Referenzwert.

Alle gemessenen Werte liegen aber im gemäß Fachliteratur für Beton üblichen Bereich von 6x10⁻⁶ bis 1,4x10⁻⁵.

2.1.3 Gipseinfluss

2.1.3.1 Schädigungsmechanismus

Beim Sulfatangriff auf Beton erfolgt die Schädigung des erhärteten Betons durch die Einwirkung von Sulfationen auf den Zementstein. In Gegenwart von Feuchtigkeit können Sulfationen mit Hydratationsprodukten des Zements bzw. noch vorhandenen mineralischen Zementbestandteilen unter Bildung neuer Sulfatminerale reagieren. Diese verändern das Gefüge des Zementsteins und beeinflussen damit dessen Festigkeit und Dauerhaftigkeit negativ. Als schädigende Neubildungen kommen die Minerale Ettringit, Gips und Thaumasit in Betracht.

Der Schädigungsmechanismus kann lösender oder treibender Art sein.

Bei lösendem Angriff bedingt eine Sulfatzufuhr von aussen, welche beim vorgesehenen Verwendungszweck des RC-Betons nahezu ausgeschlossen werden kann. Bei treibendem Angriff entstehen Sulfatminerale, die im Vergleich zu den Ausgangsphasen ein größeres Volumen einnehmen (Sulfatreiben). Der bei der Bildung der voluminösen Minerale auftretende Kristallisationsdruck verursacht Dehnungen und Spannungen im Betongefüge, die bei lokaler Überschreitung der Zugfestigkeit des Zementsteins zur Rissbildung und Zerstörung des Betons führen. Ein treibender Angriff ist vor allem bei der Bildung von Ettringit oder Gips zu erwarten.

Ein äußerer Sulfatangriff auf Beton erfolgt über sulfathaltige mineralische Säuren, Sulfate oder Sulfide, die in angrenzenden Wässern und Böden enthalten sind.

Im Gegensatz dazu tritt ein innerer Sulfatangriff i. d. R. nur auf, wenn im Beton erst nach der Erhärtung Sulfationen, z. B. aus schwerlöslichen Sulfaten wie Anhydrit oder aus Sulfonaten oberflächenaktiver Betonzusatzmittel, freigesetzt werden. Da in diesem Fall das Sulfatpotential im Beton begrenzt ist, nimmt die Geschwindigkeit der Betonschädigung mit der Zeit ab.

Das Potential zur Ettringitbildung im erhärteten Beton und das tatsächliche Auslösen des Mechanismus werden durch verschiedene stoffliche, technologische und nutzungsbedingte Faktoren beeinflusst. Wichtigste Grundelemente für eine Ettringitbildung im erhärteten Beton sind eine verspätet verfügbare Sulfatquelle, Mikrorisse im Gefüge und die Einwirkung von Wasser. Ist eine dieser Voraussetzungen nicht erfüllt, kann eine Schädigung durch Ettringitbildung nicht stattfinden, so dass durch Eliminieren eines Faktors theoretisch der Schadensmechanismus verhindert wird.

Die Ettringitbildung läuft bevorzugt bei niedrigen Temperaturen ab.

Schäden im Zusammenhang mit Ettringitbildung im erhärteten Beton, treten meist erst nach mehrjähriger Nutzung in feuchter Umgebung auf. Anfangs bilden sich netzförmige Haarrisse, die sich im Laufe der Zeit erweitern. Im fortgeschrittenen Stadium und unter Einwirkung von Witterungseinflüssen, statischen sowie dynamischen Belastungen werden diese Risse grober und daher deutlich sichtbar. Die Rissbildung geht mit z.T. extremen Längenänderungen (Betondehnungen) einher. Die Folge sind deutliche Beeinträchtigungen der Festbetoneigenschaften: erhöhte Durchlässigkeit des Gefüges, sinkende Festigkeiten (vor allem Biegezugfestigkeit) und ein stark abfallender E-Modul.

2.1.3.2 Untersuchungen

Die Wirkung aggressiver Medien auf Beton kann nachgewiesen werden durch/als

- Dehnungsmessung,
- Volumenverlust,
- Festigkeitsverlust,
- Veränderung des E-Moduls.

Bis auf den Volumenverlust wurden alle diese Parameter bei der Untersuchung des Einflusses von Gips im RC-Baustoffgemisch auf die Dauerhaftigkeit des daraus hergestellten Betons betrachtet.

Versuchsmischungen:

Es wurden drei Versuchsmischungen basierend auf einer Rezeptur mit 100 % RC-Gesteinskörnung hergestellt.

Eine der Rezepturen enthielt nur den im Anlieferungszustand vorhandenen sehr geringen Gipsgehalt von 0,2 M.-%.

Den anderen beiden Rezepturen wurden 3 M.-% bzw. 5 M.-% Gips in Form von gebrochenem Stück der Korngröße 8/16 zugesetzt.

Alle Mischungen zeigten bei den Frischbetoneigenschaften keine signifikanten Unterschiede.

Probekörper:

Als Probekörper wurden aus jeder Mischung 3 Prismen mit den Abmessungen 360 mm x 100 mm x 100 mm hergestellt.

2.1.3.3 Untersuchungsergebnisse

Dehnungsmessung

Die Messung der Dehnung der untersuchten Betonmischungen erfolgte in Anlehnung an die Messung des Schwindens auf Grundlage von DIN 1048-5 und DAfStb Heft 422 "Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048".

Während des gesamten Prüfzeitraums von 7 Monaten wurden die Probekörper bei einer sehr hohen Luftfeuchtigkeit von 95% und einer niedrigen Temperatur von 10 °C im Klimaschrank gelagert, um die Voraussetzungen für eine eventuelle Bildung von schädigendem Ettringit zu schaffen.



Bild 5: Schwindmessung



Bild 6: Klimaschrank

Die Dehnungsmessungen erfolgten nach 7, 14 und 28 Tagen sowie danach nach jeweils 1 Monat.

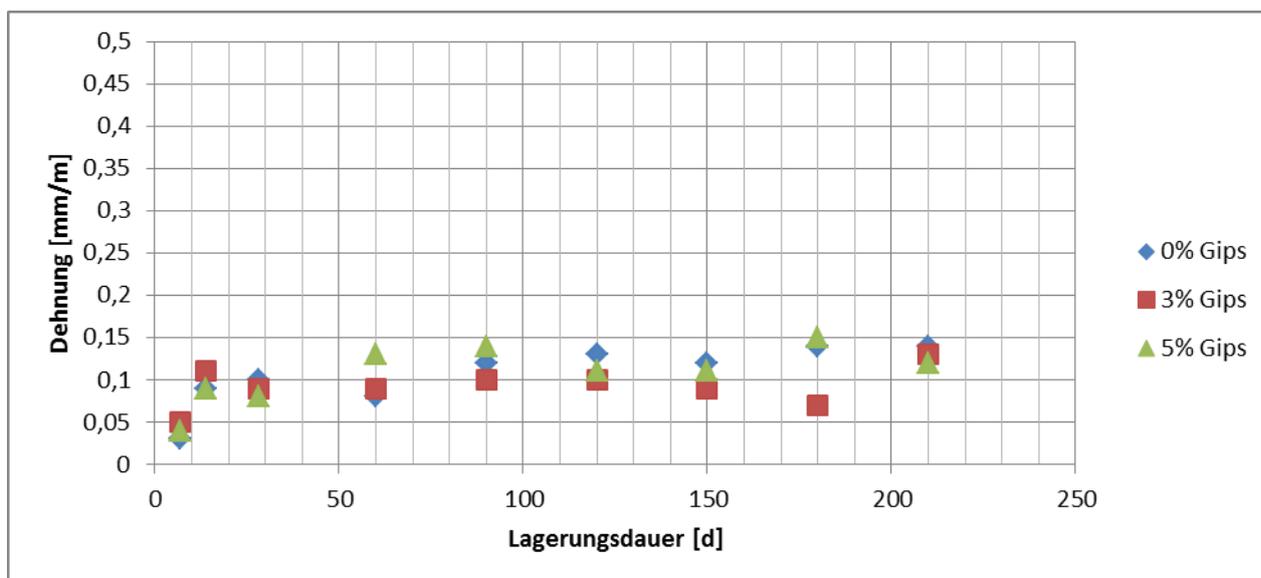


Bild 7: Dehnungsverlauf

In Bild 7 ist zu sehen, dass die Dehnungen im Untersuchungszeitraum gering sind. Sie liegen deutlich unter dem Grenzwert von 0,5 mm/m, ab dem eine Schädigung des Betons möglich ist. Des Weiteren hat der Gehalt von bis zu 5 % Gips im RC-Material keinen erkennbaren Einfluss auf das Dehnverhalten des Betons. Ein Trend zu zunehmender Dehnung mit der Zeit ist ebenfalls für keine der untersuchten Proben zu erkennen.

Druckfestigkeit und E-Modul

Eine eventuelle Schädigung des Betons infolge späterer Ettringitbildung ist ebenfalls an einer Abnahme der Druckfestigkeit und/oder des E-Moduls zu erkennen.

Zu diesem Zweck wurden nach Ablauf der 7-monatigen Klimalagerung beide Parameter geprüft und mit den zuvor nach 28 Tagen an Vergleichsprobekörpern aus den gleichen Mischungen bestimmten Werten verglichen.

Für die Bestimmung des E-Moduls wurden die Probekörper der Dehnungsmessung verwendet, da diese die erforderlichen Abmessungen aufweisen.

Für die Prüfung der Druckfestigkeit wurde anschließend aus jedem dieser Probekörper ein Würfel mit 100 mm Kantenlänge herausgesägt.

Bild 8 zeigt die Ergebnisse dieser Prüfungen.

Mischung Nr.	Gipsgehalt	Druckfestigkeit		E-Modul	
		28 d	210 d	28 d	210 d
Nr.	[M.-%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
19/013	0	39,4	42,2	28300	29400
19/014	3	40,1	43,0	27000	27900
19/015	5	38,5	41,9	27500	28800

Bild 8: Druckfestigkeit und E-Modul mit Gips

Auch hier lassen sich keine Anzeichen für eine Schädigung des Betons erkennen. Im Gegenteil, die Werte der Druckfestigkeit und des E-Moduls sind nach Ende der Klimalagerung sogar leicht höher. Dieses ist auf die normale Nacherhärtung des Betons auch nach dem Norm-Prüfalter von 28 Tagen zurückzuführen.

2.2 Modifikation der Rezepturen im Labormaßstab

Zur Optimierung der Frisch- und Festbetoneigenschaften, insbesondere des Schwindens, wurden alternative Mischungszusammensetzungen untersucht.

Hierbei wurde das Baustoff-RC in verschiedenen Korngrößen und Mengen durch natürliche Gesteinskörnung ersetzt.

Tabelle 4: Mischungszusammensetzung

Mischung Nr.	Bezeichnung	natürl. GK				RC-Material			
		0/2	2/8	8/16	16/22	0/8	2/8	4/8	8/22
17/001	RC-0	30	20	30	20	0	0	0	0
19/007	RC-25	22,5	15	22,5	15	12,5	0	0	12,5
19/003	RC-50	15	10	15	10	25	0	0	25
19/001	RC-50 (8/22)	30	20	0	0	0	0	0	50
19/002	RC-50 (0/8)	0	0	30	20	50	0	0	0
19/008	RC-65 (4/22)	35	0	0	0	0	0	15	50
19/004	RC-75	7,5	5	7,5	5	37,5	0	0	37,5
19/006	RC-75 (25% 0/8)	15	10	0	0	25	0	0	50
19/005	RC-75 (2/22)	25	0	0	100	0	25	0	50
17/002	RC-100	75	0	0	0	25	25	25	25

Als Zielkonsistenz wurde F4 (Ausbreitmaß 490-550 mm) angestrebt. Zur Steuerung der Konsistenz wurde die Fließmitteldosierung variiert. Die erforderliche Dosierung lag zwischen 0,4 M.-% v. Zement für die Referenzmischung RC-0 und 1,0 M.-% v. Zement für die Mischungen mit 75-100 % RC-Gehalt.

2.2.1 Frischbetoneigenschaften

Alle Mischungen haben einen guten Zusammenhalt und lassen sich gut verarbeiten.

Allerdings zeigt sich mit zunehmendem RC-Gehalt eine Tendenz zum Rücksteifen des Betons insbesondere bei höheren Gehalten an feinem RC-Sand (< 2 mm).

Dieses kann nur bedingt auf ein Wassereinsaugen der Zuschläge zurückgeführt werden. Da diese 30 min vor Mischbeginn vorgegässt wurden.

2.2.2 Festbetoneigenschaften

2.2.2.1 Druckfestigkeit

Alle Mischungen erreichen die für die Festigkeitsklasse C25/30 erforderliche Festigkeit.

Tendenziell erreichen Mischungen mit geringeren RC-Gehalten und bei gleichem RC-Gehalt mit geringeren Gehalten an RC-Sand etwas bessere Festigkeiten. Da dieses mit der Verarbeitbarkeit korreliert ist hier die Ursache wahrscheinlich das unterschiedliche Verdichtungsverhalten.

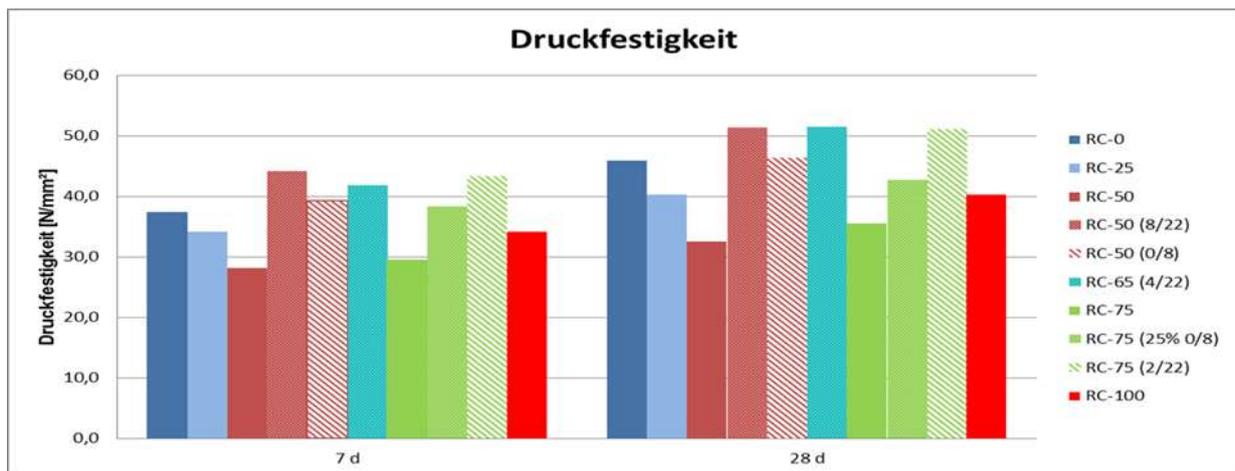


Bild 9: Druckfestigkeit

2.2.2.2 Schwinden

Die Schwindmessungen zeigen, dass bereits eine Verringerung des RC-Gehalts um 25 % eine deutliche Verringerung der Schwindneigung bewirkt. Hierbei spielt die Korngröße des RC-Materials eine untergeordnete Rolle.

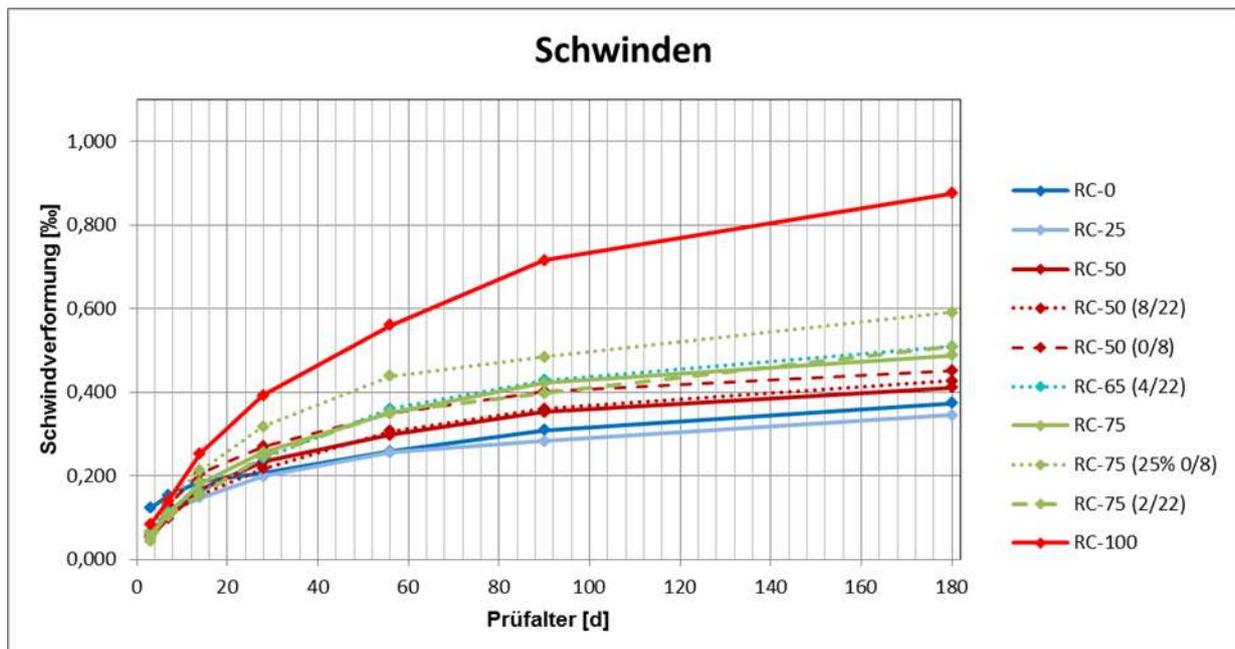


Bild 10: Schwinden

2.2.2.3 Frostbeständigkeit

Zur Bestimmung der Frostbeständigkeit wurden die Probemischungen einem Frost-Tausalz-Versuch im CDF-Verfahren mit 56 Frost-Tau Wechseln unterzogen.

Tabelle 5: Abwitterung

Mischung			Abwitterung nach x FTW			
			14	28	42	56
Nr.	Typ	Herstellung	g/m ²	g/m ²	g/m ²	g/m ²
19/001	RC-50 (8/22)	21.01.2019	31,5	65,3	125,3	300,6
19/002	RC-50 (0/8)	21.01.2019	179,5	318,7	448,5	606,8
19/008	RC-65 (4/22)	04.02.2019	32,9	56,3	83,8	120,6
19/006	RC-75 (25% 0/8)	28.01.2019	17,2	50,2	132,1	255,5
19/005	RC-75 (2/22)	28.01.2019	27,9	38,2	53,9	76,4

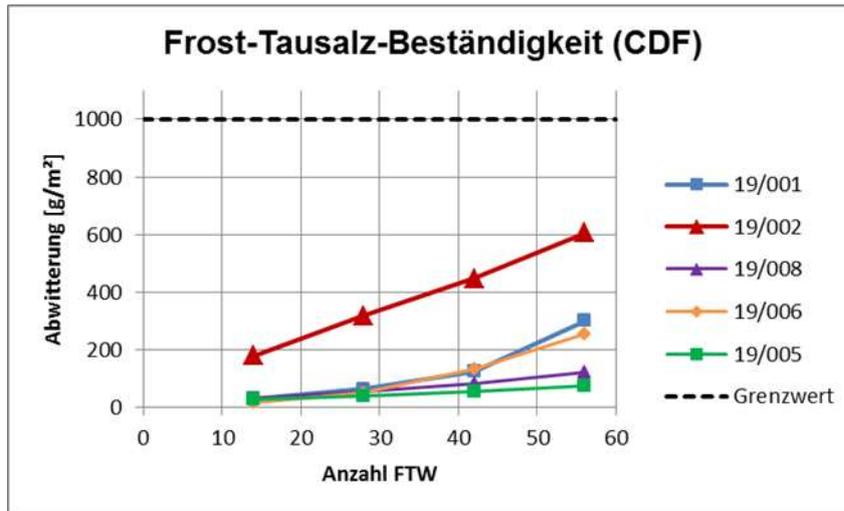


Bild 11: Schädigungsverlauf



Bild 12: geschädigter Probekörper



Bild 13: geschädigter Probekörper



Bild 14: ungeschädigter Probekörper

Obwohl der Grenzwert der Abwitterung von 1000 g/m² [11] von allen Proben noch eingehalten wird, sind diese nur teilweise als frostbeständig anzusehen.

Neben der oberflächlichen Abwitterung tritt auch eine innere Schädigung auf teilweise bis zur Bildung deutlicher Risse wie bei der Probe 19/001 (siehe Bild 13).

Der Schädigungsverlauf ist progressiv.

Der Zusammenhang zwischen Probenzusammensetzung und Frostschädigung ist nicht ganz eindeutig. Ein höherer Anteil an RC-Sand führt in der Regel zu einer stärkeren Abwitterung. Die Ursache der starken Gefügestörung der Probe 19/001 ist durch zusätzliche Versuche zu klären.

2.3 Untersuchungen zum Einsatz von Fasern

Versuche zum Einsatz von Fasern zur Reduktion der Bewehrung mussten bereits in einem frühen Stadium aufgegeben werden.

Die Zugabe von Fasern führt zu einer deutlichen (Stahlfasern) bis starken (Kunststofffasern) Verringerung der Verarbeitbarkeit, welche auch durch Erhöhung der Fließmittelzugabe nicht vollständig kompensiert werden konnte.

In Kombination mit dem ohnehin ausgeprägten Ansteifen der RC-Betone mit der Zeit verblieb ein Verarbeitungszeitfenster von <10 Minuten, was für eine sachgerechte Herstellung von Fertigteilen als unzureichend anzusehen ist.

2.4 Fazit

Die Untersuchungen zur Optimierung der Mischungszusammensetzung führten zu folgenden Erkenntnissen:

- 1) Die stoffliche Zusammensetzung des RC-Gemischs hat keine signifikante Auswirkung auf das Wärmedehnverhalten.
- 2) Eine Verringerung des RC-Gehaltes, insbesondere des feinen RC-Sandes verbessert die Verarbeitbarkeit des Frischbetons und in Folge dessen die Druckfestigkeit.
- 3) Eine Verringerung des RC-Gehaltes führt zu einem deutlichen Rückgang des Schwindens.
- 4) Die Frost-Tausalz-Beständigkeit der RC-Mischungen ist nur bedingt gegeben.
- 5) Der Einsatz von Faserbewehrung erwies sich als nicht praktikabel.

2.5 Erprobung zweistufiger Mischverfahren

Stand der Technik der Betonproduktion ist der einstufige Mischprozess, bei dem alle Komponenten in ein und demselben Mischer vermengt werden. Bei den Mixern handelt es sich um sogenannte Feststoffmischer.

Einen weiteren Ansatz bilden die 2-stufigen Mischverfahren. Hierbei wird die Bindemittelsuspension in einem separaten Vorgang hergestellt und in einem nachfolgenden Prozess die Gesteinskörnung hinzugemischt.

2.5.1 Grundlagen Suspensionsmischtechnik

Für die getrennte Herstellung der Bindemittelsuspension innerhalb 2-stufiger Mischverfahren stehen zwei Ansätze zur Verfügung:

- I. Herstellung der Bindemittelsuspension in einem Feststoffmischer, wobei in einem zweiten Schritt die Gesteinskörnungen zugegeben werden (Ansatz 1),
- II. Herstellung der Bindemittelsuspension in einem separaten Suspensionsmischer, wobei die Suspension mit der Gesteinskörnung innerhalb eines Nassmischvorgangs in einem Feststoffmischer zusammen vermengt wird (Ansatz 2).

Ein zweistufiger Mischprozess unter Verwendung eines Suspensionsmischers zur getrennten Herstellung des Bindemittels gliedert sich in drei Abschnitte:

1. Suspensionsmischen der Bindemittelmatrix in einem hierfür optimierten Suspensionsmischer zur Dispergierung der feindispersen Bindemittelpartikel mit der kontinuierlichen Phase Wasser, unter Verwendung hochwirksamer Fließmittel,
2. Trockenmischen im konventionellen Mischer zur Homogenisierung der Gesteinskörnung und Feuchtemessung durch geeignete Feuchtemessverfahren,
3. Nassmischen im Feststoffmischer zum Untermischen der Suspension in die bereits homogenisierte Gesteinskörnung.

Die Hauptmischzeit bildet bei einem zweistufigen Mischablauf unter Verwendung eines Suspensionsmischers nicht mehr die Nassmischzeit sondern die Suspensionsmischzeit (Hauptmischzeit = Suspensionsmischzeit). Die wesentlichen Eigenschaften des Betongemenges werden durch das Bindemittel bestimmt, welches im Suspensionsmischer vorgemischt wird. Das Nassmischen dient nur noch dem Homogenisieren aller Bestandteile.

Für die Suspensionsmischzeit stehen im technologischen Ablauf die Transportzeit der Gesteinskörnung zum Feststoffmischer und der Feuchtemessvorgang der Gesteinskörnung, inklusive Homogenisierungszeit zur Verfügung. D. h. während die Gesteinskörnungen dosiert, gefördert und im Feststoffmischer homogenisiert werden, kann die Suspension im Suspensionsmischer hergestellt werden.

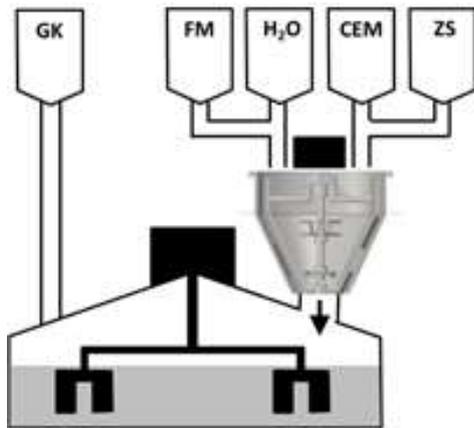


Bild 15: Prinzipskizze 2-stufiges Mischverfahren mit separatem Suspensionsmischer

Da Suspensionsmischverfahren im industriellen Betrieb bei der Betonherstellung derzeit nur selten zu finden sind, existieren kaum Erfahrungen für eine optimale Gestaltung im Sinne einer wirtschaftlich, praktikablen Umsetzung. Ansätze werden in [13] beschrieben. Die Autoren berichten über die praktische Umsetzung einer 2-stufigen Mischtechnologie in einem hierfür optimierten Suspensionsmischer, mit denen Zement- und Bindemittelleime unter Verwendung weiterer Zusatzstoffe mit einer höheren Umfangsgeschwindigkeit der Mischwerkzeuge intensiv vorgemischt werden. Nach den Autoren ist durch die Anwendung eines zwei-stufigen Mischverfahrens eine Reduktion des Zementgehaltes bei gleichen angestrebten Betonfestigkeiten möglich, was auf eine „Zementaktivierung“ zurückgeführt wird. Hierdurch ist damit zu rechnen, dass der Hydratationsgrad erhöht wird und höhere Frühfestigkeiten zu erwarten sind. Die Festigkeitsentwicklung wird von der Rotationsgeschwindigkeit des Mischwerkzeugs sowie der Mischzeit beeinflusst.

2.5.2 Untersuchungen

Als Vorteile einer zweistufigen Mischverfahrensweise bei der Produktion von Betonen werden in der Fachliteratur [13] die schnellere Verfestigung und eine mögliche verbesserte Verarbeitbarkeit benannt.

Beide Aspekte sind im Betonwerk interessant.

Eine schnellere Verfestigung könnte insbesondere im Bereich der Fertigteilverfertigung, zu kürzeren Ausschallfristen führen, was sowohl technologische als auch ökonomische Vorteile bietet. Alternativ bietet sich ein Potential zur Einsparung von Zement, was neben einer Kostenersparnis auch zur Verringerung von CO₂-Emissionen führt.

Gleichwohl von Interesse ist speziell für RC-Betone eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit. Wenn es gelingt, das für RC-Betone typische schnelle Ansteifen durch den Einsatz des Suspensionsmischverfahrens zu verhindern oder zumindest zu verringern, würde sich das Zeitfenster für eine qualitätsgerechte Verarbeitung des Betons deutlich vergrößern. Weiterhin könnte Verdichtungsarbeit eingespart werden.

Schwerpunkt bildete in den eigenen Untersuchungen der Ansatz 2 unter Verwendung eines hierfür optimierten Suspensionsmischers.

2.5.2.1 Betonausgangsstoffe und Rezepturen

Für die Versuchsmischungen zum Vergleich der Mischverfahren wurde eine Rezeptur mit 100 % RC-Gesteinskörnung verwendet. Diese ist analog der Referenzrezeptur bei der Untersuchung des Gipseinflusses.

Die Zielfestigkeitsklasse dieser Rezeptur ist C25/30 und das angestrebte Ausbreitmaß betrug 550 mm (F4).

Die detaillierte Zusammensetzung ist in Tabelle 8: Werksrezepturen in Variante 3 angegeben.

2.5.2.2 Mischer und Mischregime

Die Bindemittelkomponenten wurden im Labor-Suspensionsmischer Bild 1 gemischt und anschließend in einem Ringtellermischer innerhalb eines zweistufigen Mischverfahrens vermengt.



Bild 16: Laborsuspensionsmischer der Fa. Sommer im IAB Weimar

Die zuvor genannte Rezeptur wurde je zwei Mal im einstufigen und zweistufigen Mischverfahren gemischt.

2.5.2.3 Ergebnisse

Die nachfolgend angeführten Prüfergebnisse stellen jeweils den Mittelwert aus zwei Mischungen dar.

Verarbeitbarkeit

Die Verarbeitbarkeit des Betons wurde beurteilt über das Ausbreitmaß gemessen 5 min, 30 min und 45 min nach Beendigung des Mischvorgangs.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Verarbeitbarkeit

Mischverfahren	Ausbreitmaß nach			LP-Gehalt [Vol.-%]
	5 min [mm]	30 min [mm]	45 min [mm]	
1-stufig	550	450	340	2,4
2-stufig	560	410	280	3,1

Unmittelbar nach dem Mischen wird mit beiden Mischverfahren ein vergleichbares Ausbreitmaß erreicht, welches den Zielvorgaben entspricht.

Der erhoffte Effekt eines verminderten Ansteifens des Betons mit der Zeit wurde allerdings nicht erreicht. Im Gegenteil zeigt sich sogar eine verstärkte Abnahme des Ausbreitmaßes. Dieses ist wahrscheinlich auf die durch den erhöhten Energieeintrag während des Suspensionsmischens um ca. 3°C erhöhte Frischbetontemperatur zurückzuführen.

Außerdem wurde beobachtet, dass das Suspensionsmischverfahren zu etwas erhöhten Luftporengehalten führt.

Festigkeitsentwicklung

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsentwicklung sind in Tabelle 7 und Bild 17 dargestellt.

Tabelle 7: Druckfestigkeitsentwicklung

Mischverfahren	Druckfestigkeit			
	1 d [N/mm ²]	2 d [N/mm ²]	7 d [N/mm ²]	28 d [N/mm ²]
1-stufig	9,7	19,8	34,4	40,3
2-stufig	12,2	19,5	33,0	37,5

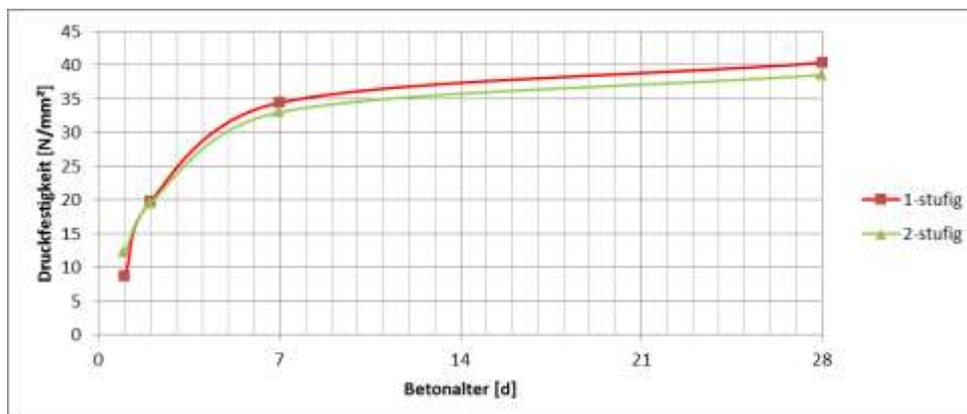


Bild 17: Druckfestigkeitsentwicklung

Aus dem Verlauf der Druckfestigkeitsentwicklung ist zu erkennen, dass das Suspensionsmischverfahren im sehr frühen Alter von 1 Tag zu einer um ca. 20 % erhöhten Druckfestigkeit führt.

Ab einem Prüfalter von 2 Tagen ist dieser Vorteil nicht mehr zu erkennen. Die leicht verminderte Endfestigkeit ist höchstwahrscheinlich auf den erhöhten Luftporengehalt der im zweistufigen Mischverfahren hergestellten Mischungen zurückzuführen.

2.5.3 Fazit

Durch den Einsatz der Suspensionsmischtechnik lässt sich die Frühfestigkeit moderat steigern, wodurch eventuell kürzere Ausschulfristen möglich werden.

Bezüglich der Verarbeitbarkeit des Betons erweist sich dieses Verfahren für den untersuchten RC-Beton eher als ungünstig.

Der Einsatz der 2-stufigen Mischtechnologie in der industriellen Betonproduktion erfordert eine aufwändigere Anlagentechnik und damit verbunden, eine kompliziertere technische Umsetzung, wodurch sich Anwender in der täglichen Produktion mit komplizierteren Prozessen sowie höheren Kosten konfrontiert sehen.

Unter diesen Voraussetzungen ist ein Einsatz der Suspensionsmischtechnik zur Herstellung von Fertigteilen aus RC-Betonen der angestrebten Zusammensetzung im Betonwerk Büscher aus technologischer als auch ökonomischer Sicht, als ungeeignet anzusehen.

2.6 Übertragen der Laborergebnisse auf die Werksfertigung, Erarbeitung Werksrezepturen

Aufgrund der bisherigen Untersuchungsergebnisse wurden in Abstimmung zwischen den Kooperationspartnern folgende Mischrezepturen als Vorzugsvarianten ausgewählt:

Tabelle 8: Werksrezepturen

		Variante 1		Variante 2		Variante 3	
		Anteil		Anteil		Anteil	
		[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]
Gesteins- körnung	Sand 0/2	35	646	25	462		
	Splitt 2/8						
	Splitt 8/16						
	Splitt 16/22						
	RC 0/8					50	727
	RC 2/8			25	410		
	RC 4/8	15	246				
	RC 8/22	50	829	50	829	50	734
	Summe	100	1721	100	1701	100	1461
Zement			300		300		360
Wasser			177		177		212
Zusatzmittel	MasterEase 5020	0,90 v.Z.	2,7	0,90 v.Z.	2,7	1,00 v.Z.	3,6

Entsprechend wurden Werksrezepturen für die im Fertigteilwerk der Fa. Büscher eingesetzte Mischanlage mit einem Mischervolumen von 1 m³ aufgestellt.

3 Herstellung Funktionsmuster Fertigteilelemente

3.1 Herstellung Funktionsmuster

Basierend auf den entwickelten Werksrezepturen erfolgte die Fertigung von Funktionsmustern ausgewählter Fertigteile im Fertigteilwerk der Fa. Büscher in Heek.

Die dabei hergestellten Muster stellten gleichzeitig die Probekörper für die nachfolgenden Bauteilprüfungen dar.

Von den vorgeschlagenen Werksrezepturen wurde die Variante 3, welche mit 100 % den höchsten Anteil an RC-Baustoffgemisch enthält, ausgewählt. Die Rezeptur wurde in die Datenbank der Mischanlage übertragen und erhielt dort die Sorten-Nr. 109.

Folgende Teile wurden gefertigt:

1. Komplett-Wand 5,00 m x 2,50 m x 0,14 m,
2. Wandelement 1,00 m x 2,50 m x 0,14 m.

Zu Vergleichszwecken wurde jedes Element je einmal mit dem RC-Baustoffgemisch (Sorte 109) und einer Standardrezeptur vergleichbarer Zusammensetzung mit natürlicher Gesteinskörnung (Sorte 3) hergestellt.

Die Herstellung der Fertigteile erfolgte liegend auf Schaltischen. Die Betonage der Komplett-Wände erfolgte in vom IAB Weimar bereitgestellte Prüfrahmen.



Bild 18: Schalung Wandelement

Bild 19: RC-Baustoffgemisch

Bild 20: gefüllter Mischer



Bild 21: Betonage Komplett-Wand Bild 22: Prüfung Ausbreitmaß Bild 23: Probekörper

Die Mischung der Sorte 109 mit dem RC-Baustoffgemisch ließ sich auch unter Produktionsbedingungen gut herstellen. Der Frischbeton zeigte einen guten Zusammenhalt und die Zielkonsistenz wurde mit einem Ausbreitmaß von 530 mm annähernd erreicht.

Im direkten Vergleich mit der Sorte 3 zeigte sich allerdings ein deutliches Ansteifen bereits nach ca. 20 Minuten, was in einem erhöhten Aufwand beim Verdichten des Betons resultierte. Die Qualität der Fertigteile wurde aber nicht beeinträchtigt.

Von jeder Betonsorte wurden 6 Probekörper zur Bestimmung der Druckfestigkeit nach 2, 7 und 28 Tagen hergestellt.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung sind Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9: Druckfestigkeiten Werksversuch

		Druckfestigkeiten		
Sorte	Zement	24 h (N/mm ²)	7 Tage (N/mm ²)	28 Tage (N/mm ²)
109	360 kg	18,3	29,4	33,2
3*	360 kg	27,2	44,6	51,6

Die angestrebte Druckfestigkeitsklasse C25/30 wurde von der Sorte 109 sicher erreicht, auch wenn die Werte etwas unter denen der Laborversuche lagen.

Die deutlich höheren Festigkeiten der Sorte 3 können verschiedene Ursachen haben. Dazu gehören Einflüsse aus der hohen Kernfeuchte des RC-Baustoffgemischs, das Verdichtungsverhalten und eventuell auch Schwankungen im Herstellungsprozess.

3.2 Beurteilung der Bauteileigenschaften

Die bei den Werksversuchen hergestellten Funktionsmuster wurden zur Prüfung der Bauteileigenschaften zum IAB nach Weimar transportiert.

Folgende Prüfungen waren vorgesehen:

1. Prüfung der Schalldämmung erfolgte nach DIN EN ISO 10140-2 an den Komplettwänden,
2. Prüfung der Verformungseigenschaften unter Last an den Wandelementen.

3.2.1 Schalldämmung

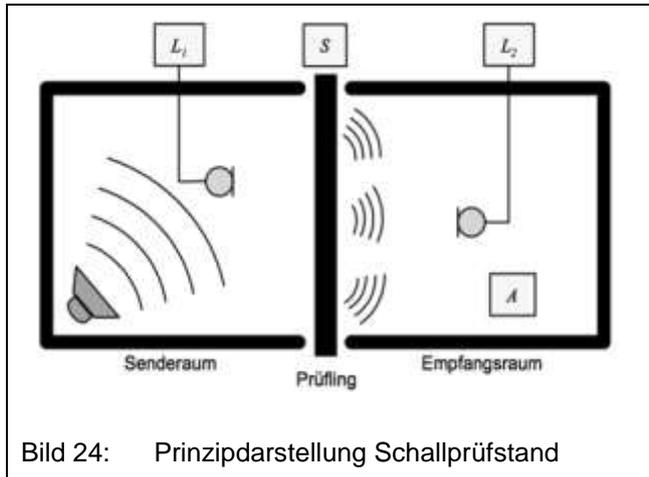


Bild 24: Prinzipdarstellung Schallprüfstand



Bild 25: Schallprüfstand am IAB

3.2.1.1 Prüfverfahren

Die Prüfung der Schalldämmung erfolgte nach DIN EN ISO 10140-2 mit einem Dodekaeder als Kugelschallquelle, der an 11 festen Positionen im Senderaum aufgestellt wurde. Die Auswahl der geeigneten Lautsprecherpositionen erfolgte nach Anhang D der DIN EN ISO 10140-5, wobei die Messung selbst im erweiterten Frequenzbereich von 50 Hz bis 5.000 Hz durchgeführt wurde.

Die räumliche Mittelung der Schalldruckpegel erfolgte mit kontinuierlich bewegten Mikrofonen entlang eines Kreisbogens von 360° mit einer Bahnumlaufzeit von 30 s, wobei der Bahnradius mindestens 1,00 m betrug, die Bahnebene gegenüber den raumbegrenzenden Flächen um mindestens 10° geneigt und die Mittelungszeit 30 s betrug.

Der Wert des Schalldämm-Maßes wird durch die Bildung der Differenz der mittleren Schalldruckpegel im Empfangs- und Senderaum unter Berücksichtigung der äquivalenten Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum und der Fläche des trennenden Bauteiles wie folgt bestimmt:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A} \text{ [dB]}$$

mit:

L₁: mittleres Schalldruckpegel im Senderaum [dB]

L₂: mittleres Schalldruckpegel im Empfangsraum [dB]

S: Fläche des trennenden Bauteils [m²]

A: Äquivalente Schallabsorptionsfläche im Empfangsraum [m²]

Die Ermittlung des Einzahlwertes für das bewertete Schalldämmmaß R_w erfolgt nach DIN EN ISO 717-1 aus den gemessenen Terzbandwerten durch den Vergleich mit der Bezugskurve für Luftschall-Terzbänder. Für diese Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes wird der Frequenzbereich 100 Hz - 3.150 Hz berücksichtigt.

Die Spektrum-Anpassungswerte C und C_{tr} dienen dazu, zusätzlich zum Einzahlwert R_w die Schalldämmung in Bezug auf typische Schallpegelspektren verschiedener Geräuschquellen zu bewerten. Dazu ist der jeweilige Spektrum-Anpassungswert dem bewerteten Schalldämm-Maß R_w hinzuzuaddieren. Laut Tabelle A.1 der DIN EN ISO 717-1 kann der Spektrum-

Anpassungswert C (Spektrum 1) für überwiegend mittel- und hochfrequente Geräuschquellen wie z.B. Wohnaktivitäten, Kinderspielen, Autobahnverkehr > 80 km/h, Schienenverkehr bei mittlerer und hoher Geschwindigkeit, Düsenflugzeuge in kleinem Abstand und Betriebe, die überwiegend mittel- und hochfrequenten Lärm abstrahlen, verwendet werden.

Der Spektrum-Anpassungswert C_t (Spektrum 2) kann z.B. für städtischen Straßenverkehr, Schienenverkehr mit geringer Geschwindigkeit, Propellerflugzeuge, Düsenflugzeuge mit großem Abstand, Discomusik und Betriebe, die überwiegend tief- und mittelfrequenten Lärm abstrahlen, zum Ansatz kommen. Die Spektrum-Anpassungswerte können ferner auf einen oder mehrere erweiterte Frequenzbereiche bezogen sein: z.B. 50 - 3.150 Hz, 100 - 5.000 Hz, 50 - 5.000 Hz. Der angepasste Frequenzbereich wird in diesem Fall als Index angegeben.

Die Nachhallzeit T im Empfangsraum, die zur Bestimmung der äquivalenten Absorptions-fläche A nötig ist, wurde nach der Gleichung (5) der DIN EN ISO 10140-4 mit $A = 0,16 \cdot V / T$ und dem Verfahren der integrierten Impulsantwort für 4 unterschiedliche Kombinationen aus Lautsprecher und Mikrofonpositionen nach DIN EN ISO 3382-2 bestimmt. Dabei soll die Nachhallzeit in den Messräumen nach DIN EN ISO 10140-5 zwischen 1 s und 2 s liegen.

Die Fremdgeräuschkorrektur erfolgte nach den Vorschriften der DIN EN ISO 10140-4, Abschnitt 4.3, sofern es die Pegeldifferenzen in den Terzbändern erforderten. Der Fremdgeräuschpegel sollte mindestens 6 dB (vorzugsweise mehr als 15 dB) unter dem zu messenden Schallpegel einschließlich Fremdgeräuschpegel liegen. Wenn die Differenz größer 6 dB ist, aber kleiner als 15 dB, ergibt sich der korrigierte Schallpegel im Empfangsraum wie folgt:

$$L = 10 \lg \left(10^{\frac{L_{sb}}{10 \text{ dB}}} - 10^{\frac{L_b}{10 \text{ dB}}} \right) \text{ [dB]} \quad \text{mit:}$$

L: korrigierter Schallpegel des Messsignals [dB]
 L_{sb} : Schalldruckpegel des Messsignals einschl. Fremdgeräuschpegel [dB]
 L_b : Fremdgeräuschpegel [dB]

Der Verlustfaktor wurde gemäß DIN EN ISO 10140-4 durch Messung der Körperschall-Nachhallzeit nach DIN EN ISO 10848-1 ermittelt. Dabei wurde das Verfahren mit Hammeranregung angewandt, wobei zehn Aufnehmerpositionen mit jeweils drei Anregepunkten sowie je drei Anregungen verwendet wurden. Die Analyse der Impulsantworten erfolgte nach dem Zeitumkehr-Verfahren.

3.2.1.2 Prüfergebnisse

Mit Hilfe der bauakustischen Güteprüfung wurde für das untersuchte Bauteil das in der folgenden Tabelle 10 dargestellte bewertete Schalldämm-Maß R_w ermittelt.

Tabelle 10: Schalldämm-Maß

	Musterwand 11.11 (Sorte 109)	Musterwand 11.12 (Sorte 3)
Bewertetes Schalldämm-Maß R_w	50 dB	49 dB
Spektrum-Anpassungswerte:		
$C_{50-3150}$	-2 dB	-2 dB
$C_{100-3150}$	-2 dB	-2 dB
$C_{50-5000}$	-1 dB	-1 dB
$C_{tr 50-3150}$	-8 dB	-7 dB
$C_{tr 100-3150}$	-6 dB	-6 dB
$C_{tr 50-5000}$	-8 dB	-7 dB

Der Frequenzverlauf des Schalldämm-Maßes R ist in Bild 26 bzw. Bild 27 dargestellt.

Das Prüfergebnis beträgt inklusive der erweiterten Unsicherheit $U = 1,2 \text{ dB}$ nach DIN EN ISO 12999-1:

$$R_{w \text{ Musterwand } 11.11} = 50,3 \text{ dB} \pm 1,2 \text{ dB} \text{ (k = 1, zweiseitig)}$$

$$R_{w \text{ Musterwand } 11.12} = 49,3 \text{ dB} \pm 1,2 \text{ dB} \text{ (k = 1, zweiseitig)}$$

Erläuterung: Die erweiterte Unsicherheit $U = 1,2 \text{ dB} = k \cdot u$ wurde mit der aus Tab. 3 der DIN EN ISO 12999-1 entnommenen Standardunsicherheit $u = \sigma_R = 1,2 \text{ dB}$ und dem Erweiterungsfaktor $k = 1$ berechnet. σ_R stellt eine Vergleichsstandardabweichung dar, die aus Ringversuchen gewonnen wurde. $k = 1$ gilt bei zweiseitiger Prüfung für ein Vertrauensniveau von 68 %.

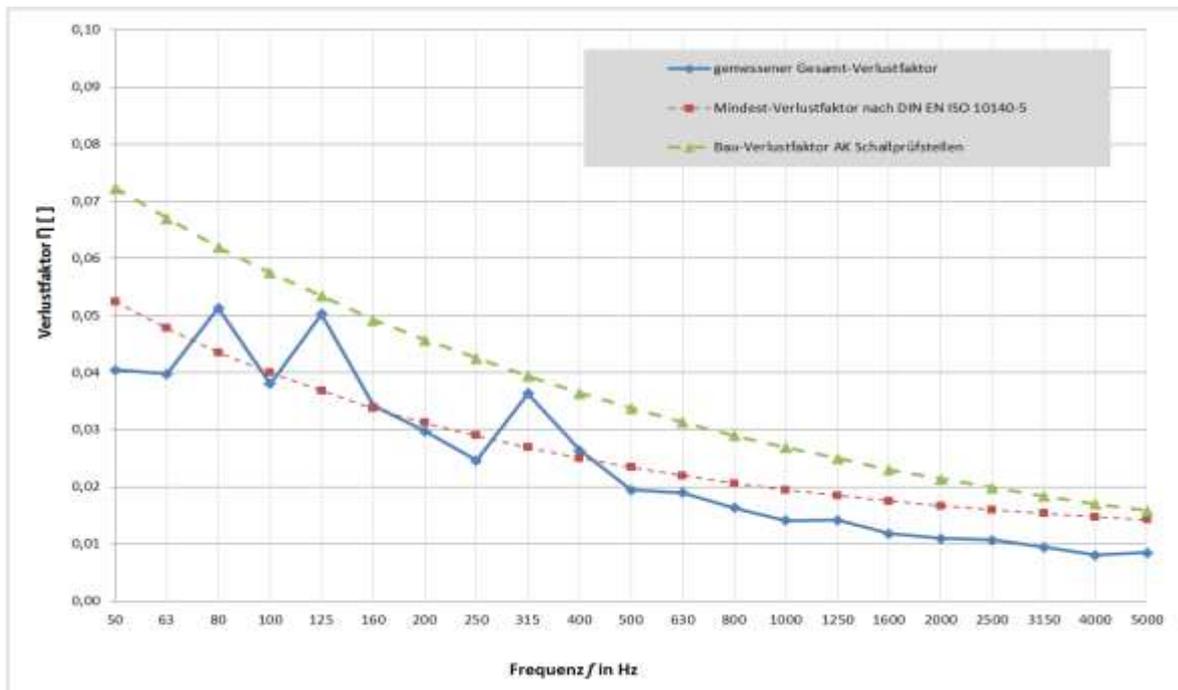


Bild 26: Frequenzverlauf Sorte 109

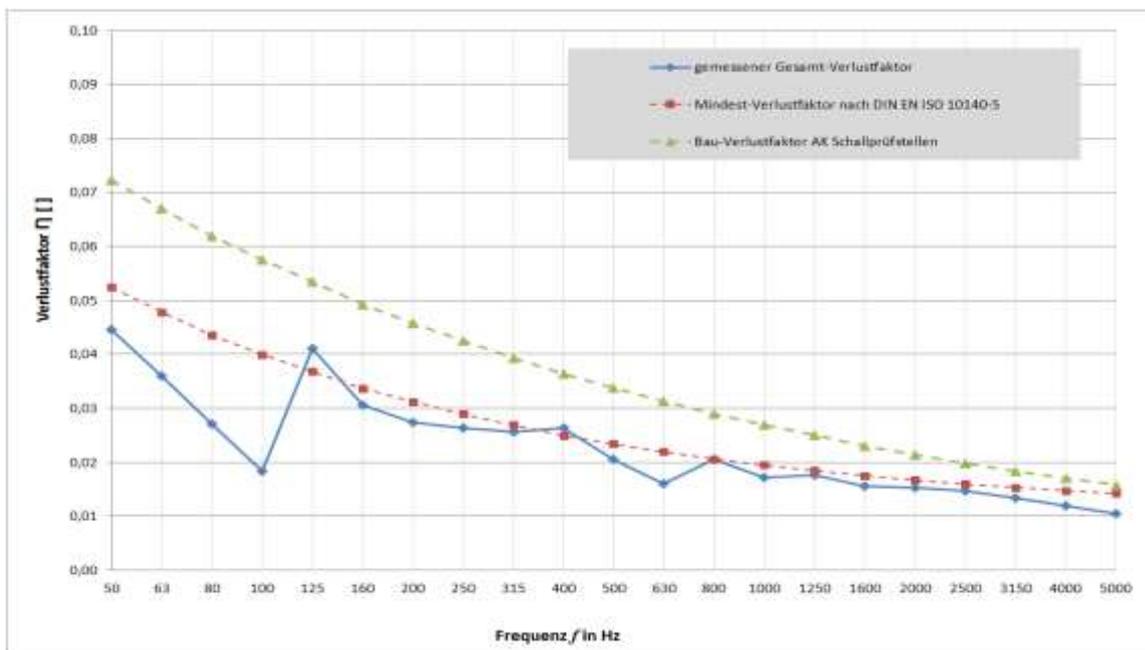


Bild 27: Frequenzverlauf Sorte 3

3.2.2 Bauteilprüfung

3.2.2.1 Versuchsaufbau

Eine mittig bewehrte, 1,0 m breite Wand aus Recyclingbeton mit einer Höhe von 2,55 m wurde senkrecht auf Druck beansprucht. Die Last wurde über eine Lastverteilung mit einer Ausmitte von 3,5 cm in den Kopf der 14 cm dicken Wand eingetragen. Zum Vergleich wurde eine Wand gleicher Abmessungen aus Normalbeton in gleicher Weise geprüft.



Bild 28: Funktionsmuster im Prüfstand



Bild 29: Sensor zur Erfassung der Durchbiegung

3.2.2.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Kraft-Weg-Diagramme, die zugehörigen Maximalkräfte sowie eine statistische Auswertung der Versuche sind im Anhang dargestellt.

Die Wand aus RC-Beton erreichte ihre höchste Belastung mit 360 kN bzw. 360 kN/m bei einer mittigen Durchbiegung von 5,2 mm. Diese Durchbiegung entspricht 1/490 ihrer Länge.

Die Referenzwand erreichte 391 kN bzw. 391 kN/m bei einer mittigen Durchbiegung von 8,9 mm. Diese Durchbiegung entspricht 1/287 ihrer Länge und liegt damit knapp über dem üblichen Maß von L/300.

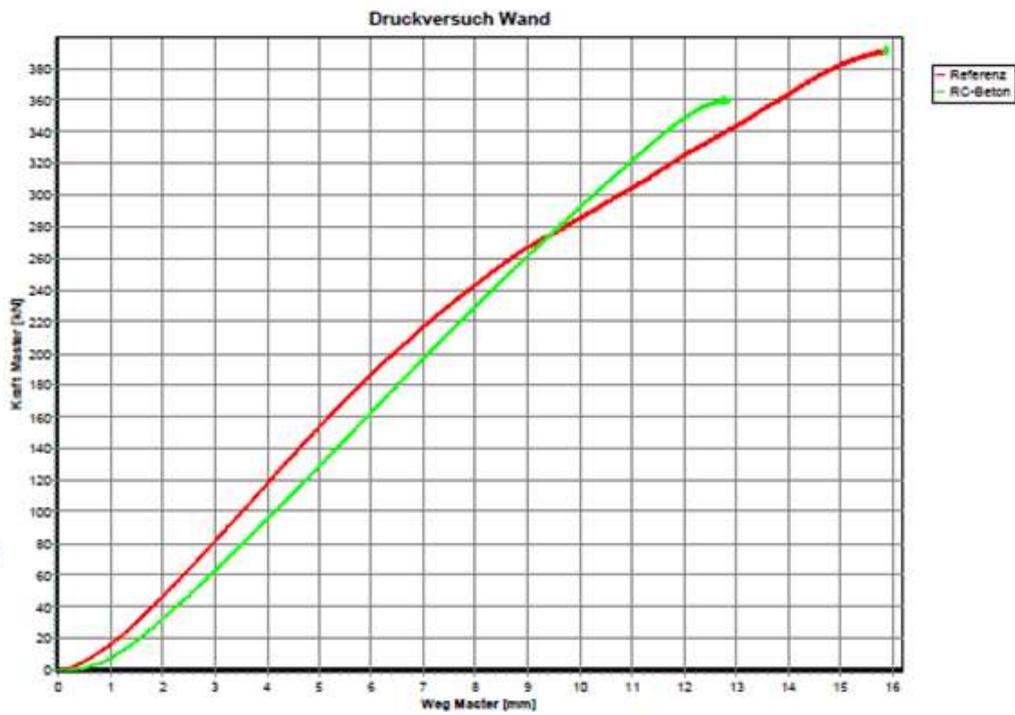
3.2.2.3 Versuchsablauf

Die Wand wurde senkrecht in den Universalprüfrahmen eingebaut und am Kopfende horizontal so gelagert, dass eine ungehinderte Vertikalverformung sichergestellt war. Die eingeleitete Kraft am Kopfende der Wand wurde mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min kontinuierlich wegeregelt gesteigert, bis im aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagramm keine weitere Kraftsteigerung erfolgte.

Während der Versuche wurden die eingeleitete Last, der Verschiebungsweg der Traverse kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich wurde die mittige Durchbiegung der Wand mittels Lasersensoren erfasst und deren Mittelwerte als Messergebnis kontinuierlich aufgezeichnet.

Prüfparameter

Kraftaufnehmer: 500kN
Dehnungsaufnehmer: Trav.-weg
Versuchsendekriterien: Weg Master = 30 mm; dF = 50 %



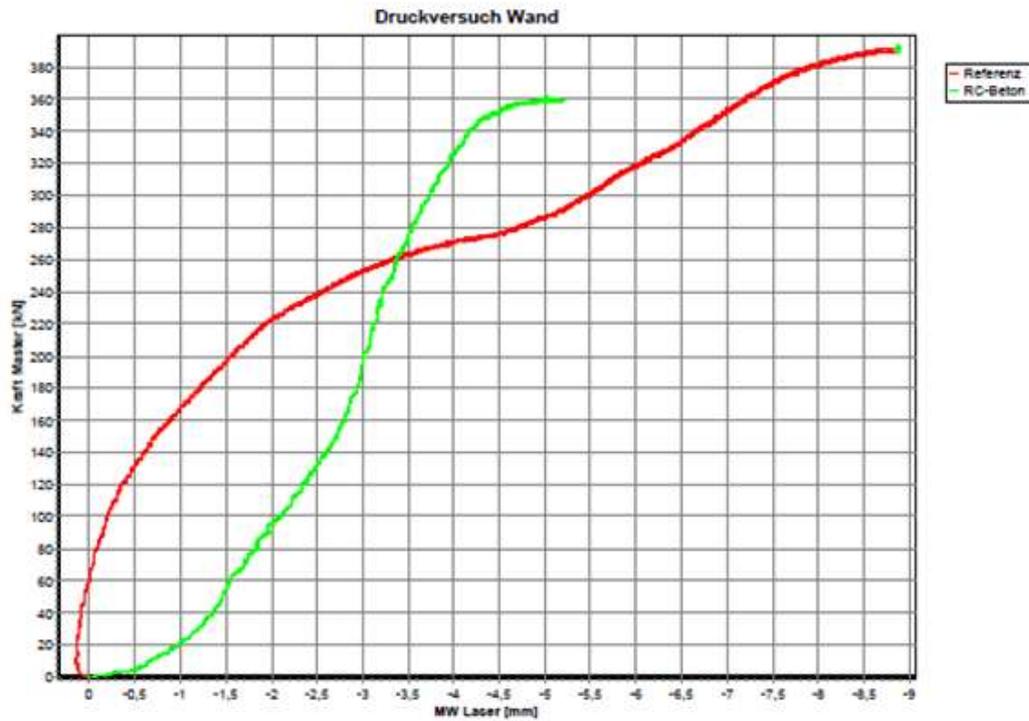
Ergebnis-Tabelle

	Datum	Zeit	Fh N
1	14.09.20	15:01	391563,00
2	15.09.20	08:51	360067,50

Bild 30: Maschinenprotokoll mit Traversenweg

Prüfparameter

Kraftaufnehmer: 500kN
Dehnungsaufnehmer: Trav.-weg
Versuchsendekriterien: Weg Master = 30 mm; dF = 50 %



Ergebnis-Tabelle

	Datum	Zeit	Fh N
1	14.09.20	15:01	391563,00
2	15.09.20	08:51	360067,50

Bild 31: Maschinenprotokoll mit mittiger Durchbiegung

Der Anstieg der Kraft-Weg-Kurven der beiden Wände verläuft anfänglich bis ca. 2/3 der Höchstlast der RC-Wand nahezu parallel, ab da flacht der Anstieg der Normalbetonwand deutlich ab. Insgesamt ist der Anstieg der Kurve der RC-Wand etwas flacher als der der Normalbetonwand. Das Abflachen der Kurve zum Ende der Tragfähigkeit hin ist bei der RC-Betonwand deutlicher.

Bei beiden Wänden waren zum Versuchsende keine Risse auf der Betonoberfläche zu erkennen.

4 Entwicklung, Fertigung und Erprobung serielles Low-cost Bausystem

In den AP13 - AP15 (BÜ) waren ein **serielles Low-cost Bausystem** zu entwerfen, zu planen und statisch-konstruktiv zu dimensionieren und auszulegen. Die Entwicklung des statisch-konstruktiven Konzeptes durch Büscher zielte darauf ab, die entwickelten RC-Betone für das serielle Bauen nutzbar zu machen.

4.1 Entwicklung Raummodul-Funktionsmuster

Im ersten Schritt wurde dazu von Büscher ein statisch-konstruktives Konzept für Gebäudeentwürfe erarbeitet, Detail- und Elementplanungen vorgenommen und Möglichkeiten zur Fugenausbildung und zur Ankopplung der Module untereinander entwickelt. Dieses diente der Durchführung von Praxistests sowie dem Gewinnen von Praxiserfahrungen für das serielle Bauen im Hinblick auf die Herstellung, den Innenausbau und die Montage und basierte auf einer Tragbetonschale mit innenliegender Dämmung.

Die kraftschlüssige Verbindung innerhalb eines Moduls (Decke-Wand/Decke-Stütze) wird mittels Rippenfußanker Philipp Powersystem SL30 67M30SL erreicht. Bei Erstellen der Schalung werden Leerrohre, Einbauteile und Bewehrung eingebaut und fixiert und nachfolgend betoniert (Einfüllseite oben).

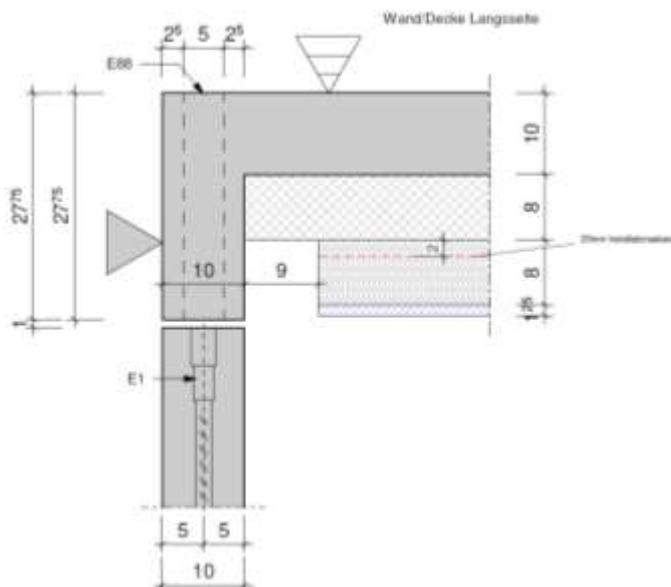
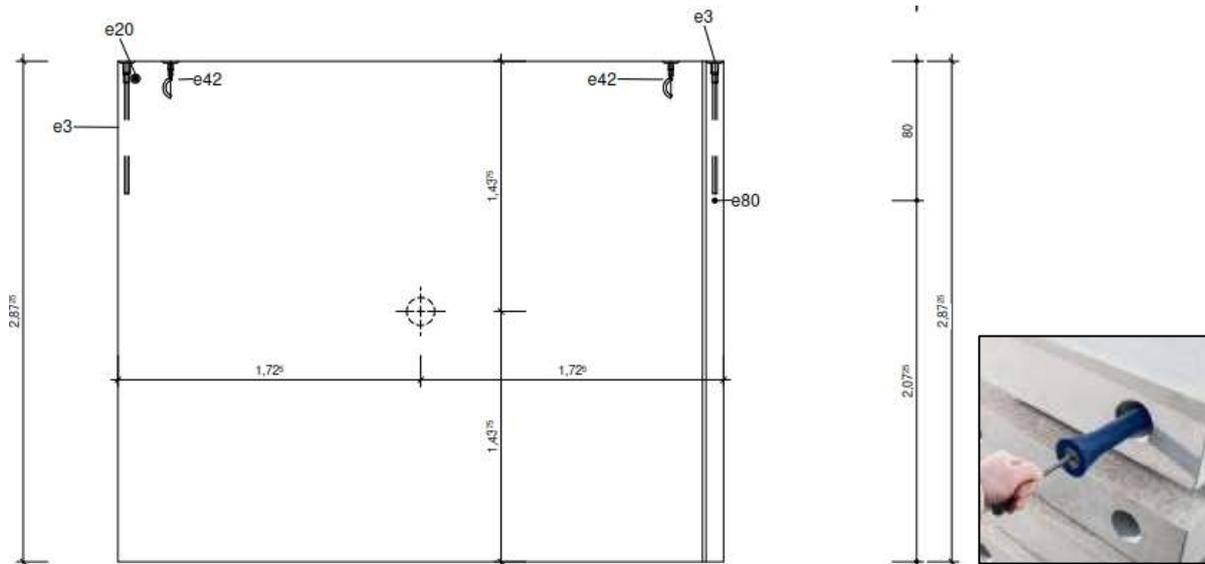


Bild 32: Raummodul-Funktionsmuster – Anschlussdetail Wand-Decke (BÜ)

Alle Verbindungen (Wand-Wand, Decke-Wand, Stütze-Decke) innerhalb eines Moduls werden kraftschlüssig und wasserdicht ausgeführt. Dafür wurde zusammen mit der Firma Köster ein spezieller Kleber auf mineralischer Basis entwickelt und getestet. Dieser ermöglicht eine ganzjährige Montage bei kurzen Verarbeitungszeiten und ist rezyklierbar. Die kraftschlüssige Verbindung Wand-Wand erfolgt mit dem Einbauteil E80 bestehend aus einer Gummimanschette/Schraubverbindung M12 (InnoGain, Fa. Johrdahl, Bild 33).



Ansicht (Einfüllseite) Wand 101

Bild 33: Raummodul-Funktionsmuster – Anschlussdetail Wand-Wand-Kraftschluss

Zur Montage werden die Wände im Montagerahmen aufgestellt, kraftschlüssig verbunden und fixiert. Die Bewehrung der Bodenplatte, die Aussparungskörper und alle erforderlichen Einbauteile der Bodenplatte werden eingebaut und die Bodenfläche betoniert. Die kraftschlüssige Verbindung Wand-Boden wird mittels Anschlussbewehrung erreicht (Bild 34).

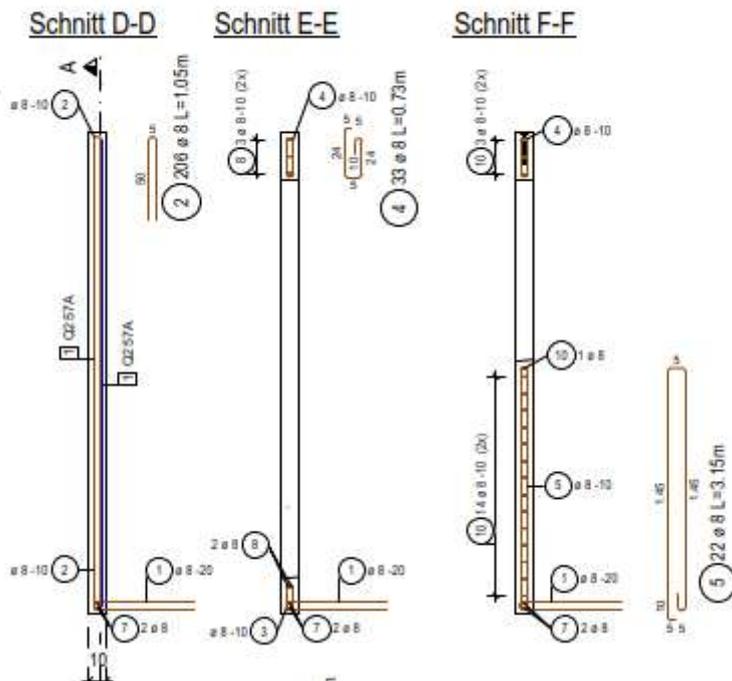


Bild 34: Raummodul-Funktionsmuster – Kraftschlüssige Verbindung Wand-Boden durch Anschlussbewehrung

4.2 Fertigung und Erprobung – Raummodul-Funktionsmuster

Zur Umsetzung der im Projekt gewonnenen Forschungsergebnisse wurden im nächsten Schritt von Büscher komplette Funktionsmuster (Raummodule) als wesentliche **Grundlage der Ergebnisverwertung** gefertigt. Dazu wurden bei Büscher Demonstrationselemente hergestellt, zu seriellen Wohnmodulen verbunden, ausgebaut, vor Ort transportiert und montiert.

Die Fertigung der **Demonstrationselemente** und die **Werksmontage der Raummodul-Funktionsmuster** geht aus Bild 37 - Bild 39 hervor. Alle Rezeptur- Dosier- und Mischungsparameter sind speziell auf die jeweiligen Bauteile ausgerichtet, dokumentiert und datengesichert. Die Betonkonsistenz wird in einem 1m³-Zwangsmischer unter Einsatz moderner Mikrowellen-Messsonden zielgerecht automatisiert angefahren. Kübelbahn und Betonkübel transportieren den Beton zum jeweiligen Betonierplatz in der Produktionshalle. Je Tag können drei Wandelemente, zwei Stützelemente und ein Dachelement auf speziellen Stahl-Kipptischen und Holzschalungen gefertigt werden. Wegen hoher Frühfestigkeiten der eingesetzten Betone können diese Bauteile schon nach ca. 12h entschalt werden und stehen zur Montage zur Verfügung. Der Einbau des SVB erfolgt über eine Betonrutsche, damit der Beton sich homogen über die Fläche und Bodenstärke verteilt und sich dort eigenständig entlüften kann. Die betonierten Oberflächen werden gemäß Höhenvorgaben aus den Fertigungszeichnungen abgezogen und ggf. geglättet. Für eine sachgerechte Aushärtung des Betons in der Form werden die Oberflächen je nach Witterung nachbehandelt und vor Kälte oder Verdunstung geschützt. Der Transport der Demonstrationselemente zur konstruierten Montagestation und das Auslagern des fertigen Raummoduls erfolgt unter Einsatz tragfähiger Brückenkräne. Am Folgetag werden die drei Wandteile, die Stützen und das Dachelement ausgerichtet, fixiert und kraftschlüssig zusammengefügt. Die erforderliche Stahlbewehrung der Bodenplatte wird mit der vorhandenen Anschlussbewehrung der Wände und Stützen verbunden, Einbauteile und Aussparungskörper werden fixiert und nach erfolgter Überprüfung und Freigabe wird die Bodenplatte gegossen. Die Modulabnahme erfolgt im Werk. Bei serieller Produktion kann je Tag ein komplettes Raummodul als transportfertige Einheit die Werkshalle verlassen. In einem weiteren Schritt erfolgt der Innenausbau der Raummodule sowie die Elektro-, Wasser, und Abwasserinstallation.



Bild 37: Raummodul-Funktionsmuster – Fertigung der Demonstrationselemente



Bild 38: Raummodul-Funktionsmuster (Außenansicht)



Bild 39: Raummodul-Funktionsmuster (Innenansicht)

Die gewonnenen **Projektergebnisse** haben gezeigt, dass das **serielle Bauen** eine schnelle Fertigstellung von Bauvorhaben ermöglicht. Die Übergabe ist termintreu und kostensicher kalkulierbar. Der Produktionsstart kann bereits in der Genehmigungsphase erfolgen. Die Bauzeiten lassen sich um bis zu 70 % verkürzen. Der Grad der Individualfertigung und damit Baufehler/-mängel werden wesentlich verringert. Eine Baubegleitung ist nahezu überflüssig. Die Modulabnahme erfolgt im Werk. Trotz serieller Bauweise kann eine flexible architektonische Planung nach Wunsch erfolgen. Bauphysikalische Anforderungen werden sicher erreicht. Eine optimale Dämmwirkung ermöglicht die Einsparung von Heizenergie. Die Integration kontrollierter Wohnraumlüftungen mit Wärmerückgewinnung ist möglich.

5 Erprobung Mineralschaumdämmung im Labormaßstab

Als Alternative zur beim Raummodul-Funktionsmuster angewandten Wärmedämmung mittels innen aufgebrachtener Dämmung aus Schaumstoffen auf Erdölbasis sollte im Rahmen dieses Projektes auch eine Dämmung mittels Mineralschaum untersucht werden.

Zu diesem Zweck waren beim IAB entwickelte Mineralschaum-Rezepturen für die Anwendung als Dämmschicht in Betonelementen zu modifizieren.

Da Mineralschäume eine relativ geringe Festigkeit aufweisen, ist eine äußere Aufbringung als Dämmschicht auf den Beton nicht zielführend. Hier bietet sich die Fertigung sogenannter Sandwich-Elemente an.

5.1 Entwurf Sandwich-Element

Eine **Sandwichwand** setzt sich aus den folgenden drei Komponenten zusammen (Bild 40):

- Tragbeton (Tragfunktion mit Funktionserhalt im Brandfall)
- Mineralschaum (Wärmedämmung)
- Vorsatzelement (Schutzfunktion, Fassadengestaltung)

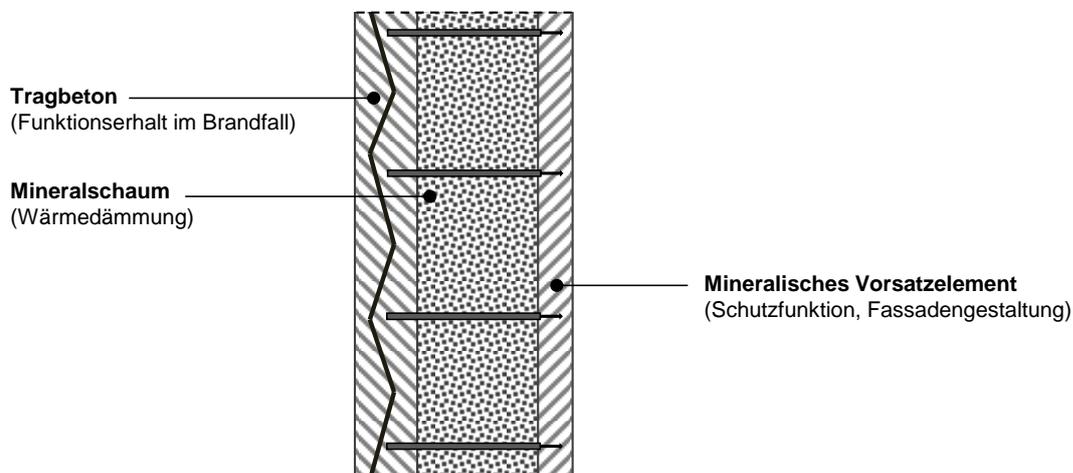


Bild 40: Sandwich-Element - Prinzipieller Aufbau

Die materialtechnischen **Eigenschaften der Sandwich-Wand** insgesamt ergeben sich in Abhängigkeit von der statischen Beanspruchung, vom erforderlichen Schalldämmmaß, von der Wärmeleitfähigkeit und der angestrebten Feuerwiderstandsklasse. Nach Diskussion zu den technischen Eigenschaften und den Anforderungen der Anlagentechnik bzw. Fertigungsverfahren wurden die wesentlichen Eigenschaften der einzelnen Komponenten in einem **Lastenheft** zusammengefasst:

Wandelement

- Einsatz für Wandflächen (tragendes Sandwichelement als aufstehende Vorsatzschale) im seriellen Bausystem aus vorgefertigten Stahlbeton-Elementen,
- mineralische Baustoffe: Beton, hochfestes Vorsatzelement mit integrierter mineralischer Dämmung,
- Verbindungsanker (Schalenverbund),
- liegend geschalt,
- Schalldämmmaß R'_{w} : $\geq 53 - 57$ dB,
- U-Wert Wand: $0,28$ W/(m²K).

Tragbeton (Brandwand)

- Stahlbeton
- Festigkeit $\geq C 35/45$
 $> 15 \text{ N/mm}^2$ nach 12-14 h (Entschalbarkeit)
- Größtkorn: 16 mm
- Konsistenz: $\geq F 5$
- rezyklierte (RC) Gesteinskörnung
- Expositionsklassen: XC1, W0
- hohe Oberflächenqualität: spachtel-, tapezierfähig
- Wandstärke $d \geq 60 \dots 100 \text{ mm}$
- Erweiterung der Schaltechnik (BÜ) erforderlich

Mineralischer Dämmschaum

- Ausgangsstoffe 2 Bindemittel, Schaumbildner, Wasser
- Struktur durchgängig homogen
- Rohdichte 70 kg/m^3
- Festigkeit $60 \text{ kPa} \cong 0,06 \text{ N/mm}^2$
- Wärmeleitfähigkeit $0,035 \text{ W/mK}$
- Schichtstärke U-Wert Wand: $0,28 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $d \geq 120 \text{ mm}$
U-Wert Passivhaus: $0,15 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, $d \geq 230 \text{ mm}$
- Erstarrungszeit 3 - 15 min
- kleines Schwindmaß
- pH-stabil
- hohe Schaumstabilität

Die erhöhte Anforderung an die Druckfestigkeit des Tragbetons ergibt sich aus der Verminderung der Wandstärke von 140 mm auf 100 mm.

Vorsatzelement

- Expositionsklassen: XC4, XF1, WF1
- Biegezugfestigkeiten: $R_f > 10 \text{ N/mm}^2$
- $d=20-40 \text{ mm}$
- optisch ansprechend, homogene Farbgebung, glatte Oberfläche
- Beton mit hohem Wassereindringwiderstand

5.2 Mineralschaumentwicklung

Ein weiteres Teilziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung einer mineralischen Dämmschicht auf Basis eines physikalischen Schaumes durch das IAB. Die Anforderungen an den Schaum sind eine geringe Rohdichte, eine ausreichende Schaumstabilität und ein geringes Schwindmaß. Weitere Zielgrößen, wie z.B. die beschleunigte Erstarrung, gehen aus den verfahrenstechnischen Anforderungen hervor. Im Labormaßstab wurden verschiedene Bindemittel, Schaumbildner und Additive untersucht. Der Dämmschaum war im erhärteten Zustand hinsichtlich seiner Eigenschaften, wie beispielsweise Stabilität, Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Wassersorption zu prüfen. Ein weiterer Schwerpunkt bestand darin, einen Schaum zu entwickeln, der auch bei den hohen pH-Werten in zementären Systemen stabil ist und nicht zersetzt wird.

Die Schaumentwicklung erfolgte durch das IAB. Neben der hohen Dämmwirkung des Schaumes mussten die Forderungen einer hohen Schaumstabilität und nicht zuletzt ein frühzeitiges Erstarren des Schaumes berücksichtigt werden.

Folgende **Ausgangsstoffe** wurden bei den Untersuchungen eingesetzt:

- Proteinschaumbildner (Neopor, Ha-Be, Dr. Stahmer),
- anorg. Bindemittel: Trass-, Portland-, Phosphat-, Schnellzement,
- Beschleuniger (Kalk, Chloride, Aluminiumverbindungen, Silikate),
- Verzögerer (z.B. Salze der Zitronen- und Weinsäure),
- Fasern (Zellulose, Basalt, Polyester, Papier),
- Hydrophobierungsmittel (Stearate, Siloxane, Silane).

Zusätzlich wurden die oben aufgeführten Ausgangsstoffe miteinander kombiniert und geeignete Rezepturen in händischen sowie maschinellen Versuchen mit einer Labor-Schaumanlage entwickelt. Es wurden die geeigneten Rezepturen ausgewählt, die für die Verfüllung von großformatigen Fertigteilwänden als geeignet angesehen werden können.

Grundsätzlich stehen zwei verschiedene **Herstellungsverfahren** zur Auswahl:

- schnell erstarrender, 2-komponentiger Schaum, der aus zwei Schäumen zusammengesetzt ist,
- langsam erstarrender, 1-komponentiger Schaum.

Bei dem 2-komponentigen Herstellungsverfahren werden in einem nachfolgenden Verfahrensschritt mit einem entwickelten Mischrohr beide Schäume miteinander vermischt und anschließend zur Fülldüse bzw. zur Füllanlage gefördert. Das Mischrohr besteht aus einem gedichteten Zylinder, in dem ein Mischwerkzeug rotiert. In Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass eine zu geringe Drehzahl zu einer inhomogenen Durchmischung führt. Eine inhomogene Durchmischung hat einen Zusammenbruch des Schaumes zur Folge, da nur in bestimmten Bereichen des Schaumes eine frühzeitige Erstarrung beginnt.

Bei dem 1-komponentigen Herstellungsverfahren ist die Verwendung eines Mischrohres nicht notwendig. Letztendlich wird der fertige Schaum zum Verfüllwerkzeug gefördert und in die Fertigteilwand eingebracht.

Für beide Herstellungsverfahren wurden Schaumrezepturen aufgestellt, die im weiteren Verlauf an Funktionsmustern geprüft wurden.

5.3 Funktionsmuster

5.3.1 Fertigung Sandwichelemente

Zur Untersuchung der Machbarkeit einer Verfüllung von Sandwichelementen aus Beton mit Mineralschaum wurden Funktionsmuster mit den Abmessungen 50 x 50 cm und 100 x 100 cm und einer Dicke der Dämmschicht von 240 mm hergestellt.

Um den Herstelleraufwand zunächst gering zu halten, wurden Tragbeton und Vorsatzschale aus einer erprobten Mischung C35/45 mit 8 mm Größtkorn in einer Schichtstärke von jeweils 65 mm hergestellt.

Als geeignet im Hinblick auf den Bewehrungseinbau und die Betonage hat sich die liegende Fertigung auf Schaltischen mit Flächenrüttlern erwiesen. Die Produktion der Sandwichwände hat sich als vergleichsweise aufwändig erwiesen. Die liegend gefertigten Platten wurden manuell gedreht und durch Stützkonstruktionen in der richtigen Höhe positioniert. Die Verbundanker wurden durch Schablonen fixiert. Je Funktionsmuster wurden vier Verbundanker (Horizontalanker) vorgesehen. In die großen Funktionsmuster wurden zusätzlich Traglastanker zum Abheben integriert.

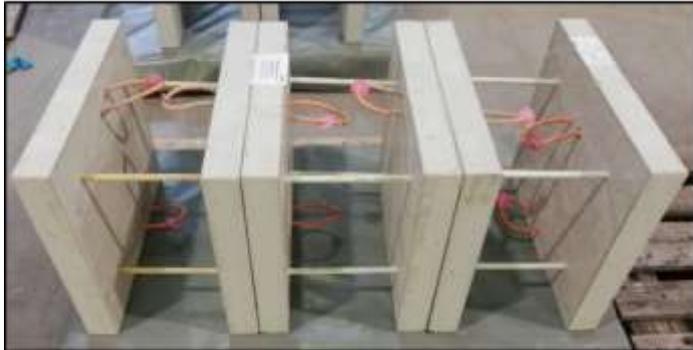


Bild 41: Funktionsmuster Sandwichelemente

Die Fertigung der Funktionsmuster erfolgte im Betonwerk Büscher.

5.3.2 Schaumversuche an den Funktionsmustern

Die Umsetzung der Werksversuche erfolgte aus zeitlichen und wirtschaftlichen Gründen im Technikum des IAB.



Bild 42: Versuchsaufbau zur Befüllung der Musterelemente



Bild 43: Befüllung der kleinen Musterelemente mit mineralischem Dämmschaum

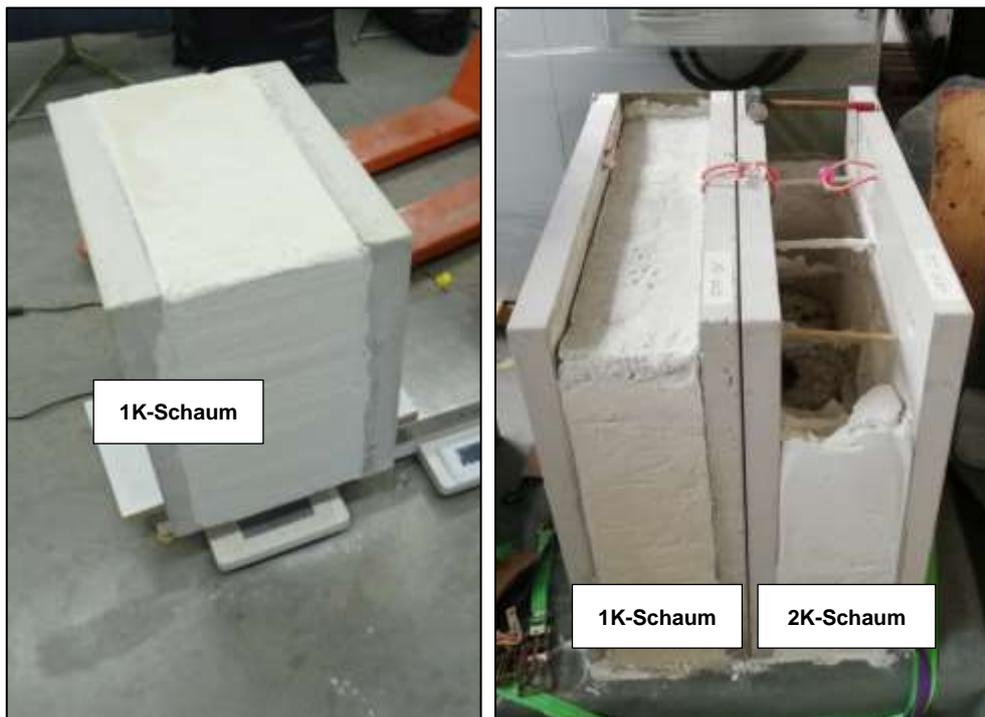


Bild 44: Musterelemente nach dem Entschalen

Die Versuche zur Befüllung der Wandelemente zeigten, dass der 2-komponentige Schaum während der Erstarrung im Wandelement (Bild 44, re.) kollabierte. Als Grund werden das Eigengewicht des erstarrten Schaumes und unterschiedliche Erstarrungszeiten bestimmter Schaumbereiche vermutet. Der Schaum verliert während der Erstarrung seine Elastizität und verformt sich unter Belastung irreversibel. Im Gegensatz dazu blieb der 1-komponentige Schaum in den Musterelementen und auch bei der Befüllung eines höheren Elementes stabil. Dieser sollte für die Produktion von Wandelementen bevorzugt werden.

5.3.3 Untersuchungen zur Dämmwirkung der Sandwichwand

Für die Verwendung der Sandwichwand als Außenwand sind neben der tragenden Funktion insbesondere die Bauteil-Dämmeigenschaften relevant. Diese werden durch den U-Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) als spezifischer Kennwert eines Bauteils beschrieben. Der U-Wert wird im Wesentlichen durch die Wärmeleitfähigkeit und Dicke der verwendeten Materialien bestimmt. Die Wärmeleitfähigkeit λ gibt die Wärmemenge an, die zeitlich abhängig ein Material durchdringt. Je kleiner der U-Wert desto besser ist die Wärmedämmung des Bauteils. Am IAB erfolgten Messungen der Wärmeleitfähigkeit mit Wärmeleitfähigkeits-Messgerät TLP 900 GS (Taurus Instruments) an

- Funktionsmustern mit Luftfüllung,
- Funktionsmustern mit Perlitfüllung,
- Funktionsmustern mit Dämmschaumfüllung.

Die gewonnenen Ergebnisse gehen aus Tabelle 11 hervor.

Tabelle 11:Wärmeleitfähigkeit Sandwichelement

Prüfkörper	Schicht 1	Füllung	Schicht 2	λ W/(m·K)	U-Wert W/(m ² ·K)
Funktionsmuster FM-0	Tragbeton 65 mm	Luft 240 mm 4x Schöck Isolink	Sichtbeton 65 mm	1,009 +/- 0,020	1,974
Funktionsmuster FM-0-Perlit	Tragbeton 65 mm	Perlit 240 mm 4x Schöck Isolink	Sichtbeton 65 mm	0,1109 +/- 0,0022	0,248
Funktionsmuster FM-1K	Tragbeton 65 mm	Dämmschaum 1K 240 mm 4x Schöck Isolink	Sichtbeton 65 mm	0,0949 +/- 0,0019	0,245

Die Funktionsmuster mit einer Füllung aus Dämmschaum erreichen deutlich bessere U-Werte gegen über ungefüllten Vergleichsmustern. Gegenüber dem Referenzmaterial Perlit liegen die U-Werte der Funktionsmuster mit einer Dämmschaumfüllung etwa gleich. Der im Lastenheft spezifizierte U-Wert für eine Wand von $\leq 0,28$ W/(m²K) wurde erreicht.

5.4 Sandwichelemente aus RC-Beton

Die Herstellung von Sandwichelementen aus RC-Beton wird nur bedingt möglich sein.

Die für die Tragschicht erforderliche Beton-Festigkeitsklasse C35/45 ist nach gegenwärtiger Normung nicht zulässig, was eine langwierige bauaufsichtliche Zulassung nach sich ziehen würde.

Zum anderen wäre für die Erreichung der angestrebten Ausschalfestigkeit nach den Erfahrungen aus diesem und ähnlichen Projekten ein Zementgehalt von 420-450 kg/m³ erforderlich. Aufgrund des hohen Schwindens von RC-Beton würden sehr hohe Gehalte an Bewehrung erforderlich, um Risse zu beschränken. Sowohl der hohe Zementgehalt als auch der erhöhte Bewehrungsbedarf laufen dem Grundanliegen des Projekts, ressourcenschonend zu bauen, zuwider.

Die dünne Vorsatzschicht erfordert zusätzlich eine Begrenzung des Größtkorns auf 8 mm. Probemischungen eines Betons aus RC-Baustoffgemisch 0/8 ergaben, dass sich aus diesem Material mit vertretbarem Aufwand die erforderliche Konsistenz nicht zielsicher erreichen lässt. Das Rücksteifen ist nochmals deutlicher ausgeprägt als bei dem in den anderen Projektteilen verwendeten Größtkorn von 22 mm.

Fazit und Ausblick

Es ist möglich, einen qualitätsgerechten Beton auch mit höheren Gehalten an rezyklierter Gesteinskörnung herzustellen, als derzeit zulässig.

Fertigteile aus RC-Beton weisen die geforderten Bauteileigenschaften auf und konnten erfolgreich in ein, im Rahmen dieses Projektes, entwickeltes serielles Low-cost Bausystem implementiert werden.

Für das ressourceneffiziente Bausystem, basierend auf Betonelementen aus gemischtem Mauerwerksbruch wird eine Zulassung vom DiBT angestrebt.

Ein schädigender Einfluss von Gips im RC-Baustoffgemisch konnte im Rahmen des Projekts nicht nachgewiesen werden. Allerdings verläuft der Schädigungsmechanismus unter Umständen sehr langsam. Daher wird empfohlen, Gips aus dem Bauschutt auszusortieren, bis gesicherte Langzeiterkenntnisse vorliegen.

Als ein Problem bei der Herstellung und Verarbeitung von RC-Betonen erwies sich das ausgeprägte Ansteifen des Frischbetons mit der Zeit. Dieses führt zu einem erhöhten Verdichtungsaufwand und einem relativ engen Zeitfenster für die Verarbeitung des Betons.

Die Ursachen dafür liegen in einem komplexen Zusammenspiel von Gesteinskörnung, Zement, Zusatzmitteln und Mischtechnik und konnte im Rahmen des Projektes noch nicht hinreichend geklärt werden. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf.

Literaturverzeichnis

- [1] **DIN 4109.** "Schallschutz im Hochbau". November 1989.
- [2] **Beiblatt 2 zu DIN 4109.** „Schallschutz im Hochbau“. November 1989.
- [3] **DAfStb. Richtlinie** "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620". September 2010.
- [4] **DIN 1048-5.** Prüfverfahren für Beton – Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper. Juni 1991.
- [5] **DIN 4226-101.** „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“. August 2017.
- [6] **DIN CEN/TS 12390-9.** „Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung. Dezember 2016.
- [7] **DIN EN 12620.** „Gesteinskörnungen für Beton“. Juli 2013.
- [8] **DIN EN 206-1.** „Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“. Januar 2017.
- [9] **DAfStb. Heft 422** "Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048" . Ausgabe 1991.
- [10] **Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. DEGA-Empfehlung 103** „Schallschutz im Wohnungsbau - Schallschutzausweis“. März 2009.
- [11] **Bundesanstalt für Wasserbau. BAW Merkblatt "Frostprüfung von Beton (MFB)".** Ausgabe 2012.
- [12] **Stark, Wicht:** "Dauerhaftigkeit von Beton", 2., aktualisierte und erweiterte Auflage, 2013
- [13] **Соломатов, В. И., Тахиров, М. К. und Тахер, Шах Мд.** Интенсивная технология бетонов. Москва : Стройиздат, 1989