



Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau

Abschlussbericht

gefördert unter dem AZ: 32105 durch die
Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Berichterstattung:

Prof. Dr.- Ing. Sylvia Stürmer & Dipl.- Ing. Christoph Kulle, HTWG Konstanz

Projektpartner: IAB Weimar und ifeu Heidelberg

Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

I.	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	3
II.	Zusammenfassung	11
1.	Aufgabenstellung des Forschungsprojekts	12
2.	Einleitung	12
2.1.	Geschichtliches zur Anwendung von Ziegelbruch	13
2.2.	Bauabfälle in Deutschland	14
2.3.	Bedeutung von RC-Körnungen für die Betonherstellung	15
3.	RC/R-Beton	19
3.1.	Begriff	19
3.2.	R-Beton im Hochbau	19
3.3.	Zusammensetzungen der RC-Körnungen	20
3.3.1.	Typ 1-Körnung	20
3.3.2.	Typ 2-Körnung	21
3.4.	R-Beton-Hersteller in Baden-Württemberg	22
3.5.	Regelwerke zum R-Beton und praktischer Einsatz	22
3.5.1.	Regelwerke in Deutschland	22
3.5.2.	Regelwerke in der Schweiz	23
4.	Aufbereitungstechnologien und Herstellung von RC-Körnungen Typ 2	25
4.1.	Verfahrensschritte bei der Bauabfallaufbereitung	25
4.2.	Herstellung von Ziegelrezyklaten für die Betonherstellung	27
5.	Untersuchungen an den RC-Körnungen Typ 2	32
5.1.	Hersteller	32
5.2.	Zulassungen	33
5.3.	Korngrößenanalysen	34
5.4.	Art der Bestandteile in den Kornfraktionen	39
5.5.	Wasseraufnahme und Rohdichte	41
5.6.	Sulfatgehalte	44
5.6.1.	Säurelösliche Sulfatgehalte	44
5.6.2.	Wasserlösliche Sulfat- und Chloridgehalte	45
5.6.3.	Schnelltest für wasserlösliche Sulfate	48
5.7.	Zusammenfassung und Bewertung	50
6.	Untersuchungen an R-Beton mit Typ 2-Körnung	52
6.1.	Rezepturen und Betonherstellung	52
6.2.	Festigkeiten und E-Modul	54
6.3.	Wasseraufnahme und Rohdichte	57
6.4.	Frostwiderstand	58
6.5.	Frost-Tausalz-Widerstand	60
6.6.	Gefügeuntersuchungen	63
6.6.1.	Porosität und Porengrößenverteilung	63
6.6.2.	Mikroskopische Analyse	67
	Verbundbereich Zementstein-Ziegelsplitt	68
	Verbundbereich Zementstein-Quarz und Zementstein-Kalkstein	78
6.7.	Untersuchungen mittels LIBS	88
6.8.	Zusammenfassung und Bewertung	91
7.	Objektbeispiele	92
7.1.	Technisches Rathaus Tübingen	94
7.1.1.	Untersuchungen an den Betonmauersteinen und einem Stützteile	95
7.1.2.	Untersuchungen an den Gesteinskörnungen der Betonmauersteine	98
7.1.3.	R-Beton – Neubau	99
7.2.	Neubau Bürogebäude Fa. Feess, Kirchheim Teck	100

8.	Alternative Anwendungen zu Transport R-Beton und Ausblick	102
8.1.	Ökostones	102
8.1.1.	Zusammensetzung, Herstellung und Einsatzgebiet	102
8.1.2.	Untersuchung nach mehrjähriger Freibewitterung	103
8.2.	Untersuchung an Mörteln mit Brechsanden aus Mauerwerkbruch	106
8.2.1.	Versuchsmischungen, Herstellung, Untersuchungen	106
8.2.2.	Ausgewählte Ergebnisse	107
9.	Einsatz von Typ 2 Körnungen im R-Beton aus ökologischer Sicht	109
9.1.	Zur gesamtheitlichen ressourcenpolitische Perspektive	109
9.2.	Zur Sicht des Herstellers einer Gesteinskörnung	111
9.2.1.	Aufwand und Nutzen aus ökonomischer Sicht	112
9.2.2.	Aufwand und Nutzen aus ökologischer Sicht	113
9.2.3.	Fazit	113
9.3.	Die Sicht eines Betonwerkes	114
9.3.1.	Ökobilanz der Herstellung von R-Beton	115
9.3.2.	Aus ökonomischer Sicht	125
9.3.3.	Fazit	126
9.4.	Die Bewertung von R-Beton in Anlehnung an eine Umweltproduktdeklaration	127
9.4.1.	Methodische Festlegungen	127
9.4.2.	Quantifizierung und Darstellung der Ergebnisse	130
9.4.3.	Fazit	133
10.	Erhöhung des Bekanntheitsgrads von R-Beton im Hochbau	135
10.1.	Durchführung und Auswertung von Umfragen	135
10.1.1.	Architekten (Planer)	135
10.1.2.	Tragwerksplaner	136
10.1.3.	Betonfertigteilerhersteller	137
10.2.	Länderbezogene Regelungen zur Reduzierung mineralischer Bauabfälle an zwei Beispielen	138
10.3.	Berücksichtigung von R-Beton bei öffentlichen Ausschreibungen und Vergabe	140
10.3.1.	Allgemein	140
10.3.2.	In den Bundesländern Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz	141
10.4.	Berücksichtigung von R-Beton bei Gebäudezertifikaten	142
11.	Unterstützende Rahmenbedingungen für das Bauen mit R-Beton	144
11.1.	Umweltbundesamt	144
11.2.	Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg	145
12.	Zusammenfassung	146
13.	Literatur-, Normen- und Richtlinienverzeichnis	152
14.	Anhang	156
	Anhang A: Grafiken und Fotos	156
	Anhang B: Tabellen zur Dokumentation	162
	Anhang C: Wirkungsindikatoren	164
	C.1 Klimawandel	164
	C.2 Photooxidantienbildung (Photosmog oder Sommersmog)	166
	C.3 Eutrophierung und Sauerstoffzehrung	168
	C.4 Versauerung	170
	C.5 Toxische Schädigung des Menschen (Humantoxizität)	171
	C.5.1 Feinstaub (PM10)	171
	C.6 Ressourcenbeanspruchung	172
	C.6.1 Flächennutzungen bzw. Naturraumbeanspruchung	173
	C.7 Stratosphärischer Ozonabbau	174
	Anhang D: Fragebögen zu Umfragen	176
	Anhang E: Beispiele Ausschreibungen	188

I. Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Abbildungen

Abb. 1: Allgemeine Prozesskette zur Herstellung von R-Beton [8]	15
Abb. 2: Abfallaufkommen 2014 in Deutschland [11]	16
Abb. 3: Mengen an mineralischen Bauabfällen 2012 [12]	16
Abb. 4: Anfall und Verbleib von Bauschutt 2012 [12]	16
Abb. 5: Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnung 2012 [12]	17
Abb. 6: Verwertung RC-Baustoffe 2012 [12]	17
Abb. 7: Zulässige Anteile rezyklierter Körnungen für Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen [13]	19
Abb. 8: Schematische Darstellung der verschiedenen Aufschlussgrade von Bauschutt bei der Aufbereitung [17]	21
Abb. 9: Übersicht über europäische und deutsche Normen und Regelwerke, die für R-Beton relevant sind	23
Abb. 10: Sortenreiner Ziegelbruch (links) bzw. Mauerwerkbruch (rechts) als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Ziegelrezyklaten	25
Abb. 11: Mauerwerkbruch nach der Zerkleinerung (links) und Verbundpartikel Ziegel mit anhaftendem Mörtel (rechts)	26
Abb. 12: Backenbrecher in einer stationären Bauschuttaufbereitungsanlage	26
Abb. 13: Prallbrecher in einer stationären Bauschuttaufbereitungsanlage	26
Abb. 14: Siebstation in einer stationären Recyclinganlage	27
Abb. 15: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus sortenreinem Aufgabematerial	28
Abb. 16: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit nach der Zerkleinerung angeordneter Sortierung.....	28
Abb. 17: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit vor der Zerkleinerung angeordneter Sortierung.....	29
Abb. 18: Siebdurchgang als Funktion der Partikelgröße für das Aufgabematerial	29
Abb. 19: Siebdurchgang als Funktion der Partikelgröße für das Produkt	30
Abb. 20: Massenbilanzen für die Herstellungsszenarien nach Abb. 15, 16, 17	30
Abb. 21: Korngrößenverteilungen der untersuchten Typ 2 Gesteinskörnungen.....	34
Abb. 22: Vergleich der Sieblinien der RC-Gesteinskörnung 2/16 der Fa. Feess über 2,5 Jahre.....	35
Abb. 23: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, Feess Typ 2, 2/16, mittlerer Korndurchmesser = 10,4 mm.....	35
Abb. 24: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, GWV Typ 2, 2/16, mittlerer Korndurchmesser = 8,4 mm.....	35
Abb. 25: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, Scherer & Kohl Typ 2, 2/8, mittlerer Korndurchmesser = 5,9 mm	36
Abb. 26: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, Scherer & Kohl Typ 2, 8/16, mittlerer Korndurchmesser = 12,9 mm	36
Abb. 27: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, Feess Typ 2, 0/2, mittlerer Korndurchmesser = 1,1 mm.....	36
Abb. 28: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, GWV Typ 2, 0/2, mittlerer Korndurchmesser = 1,5 mm.....	36
Abb. 29: Fraktionierung und stoffliche Sortierung einer RC-Gesteinskörnung.....	40
Abb. 30: Wasseraufnahme nach 10 Minuten.....	41

Abb. 31: Wasseraufnahme der Feess 4/16 RC-Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Bestandteile und Korngröße	42
Abb. 32: Ergebnisse der Rohdichtebestimmung der Mauerwerksanteile der RC-Gesteinskörnungen	42
Abb. 33: Ergebnisse zum säurelöslichen Sulfatgehalt	44
Abb. 34: Ergebnisse des säurelöslichen Sulfatgehalts in Abhängigkeit der Korngröße	45
Abb. 35: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt.....	46
Abb. 36: Ergebnisse zum wasserlöslichen Chloridgehalt	46
Abb. 37: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt.....	47
Abb. 38: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt in Abhängigkeit der Korngröße	47
Abb. 39: 10 g Probe	48
Abb. 40: Die nach 5 min geklärte Suspension	48
Abb. 41: Sulfat-Schnelltest mit Stäbchen	48
Abb. 42: Vergleich der Druckfestigkeiten mit den Anforderungen der Betonfestigkeitsklasse	54
Abb. 43: Gegenüberstellung der flächenbezogenen Masseverluste zum Grenzwert nach [42].....	58
Abb. 44: Gegenüberstellung des prozentualen Bezugs der E-Moduln auf den Ursprungszustand zum Grenzwert nach [42]	58
Abb. 45: Gegenüberstellung der flächenbezogenen Masseverluste zum Grenzwert nach [37].....	60
Abb. 46: Oberfläche DR 28 vor dem CDF-Test	61
Abb. 47: Oberfläche DR 35 vor dem CDF-Test	61
Abb. 48: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test.....	61
Abb. 49: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test.....	61
Abb. 50: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung	61
Abb. 51: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung	61
Abb. 52: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung	61
Abb. 53: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung	61
Abb. 54: Oberfläche DN 35 vor dem CDF-Test	62
Abb. 55: Oberfläche DN 38 vor dem CDF-Test	62
Abb. 56: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test	62
Abb. 57: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test	62
Abb. 58: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung	62
Abb. 59: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung	62
Abb. 60: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung	62
Abb. 61: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung	62
Abb. 62: Porengrößenverteilungen der Referenzbetone DN 35 und DN 38.....	64
Abb. 63: Porengrößenverteilungen der R-Betone DR 35 und DR 28	64
Abb. 64: Porengrößenverteilungen des R-Betons DR 35 und des Referenzbetons DN 35	65
Abb. 65: Porengrößenverteilungen der R-Betone DR 28 und Krieger-Beton	65
Abb. 66: lichtmikroskopische Aufnahme DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach	68
Abb. 67: REM Aufnahme DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 400-fach	68
Abb. 68: EDX Analyse DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Ziegelgesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 400-fach	68
Abb. 69: lichtmikroskopische Aufnahme DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach	68
Abb. 70: REM Aufnahme DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach	68

Abb. 71: EDX Analyse (Mapping 2) DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Ziegelgesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach.....	68
Abb. 72: lichtmikroskopische Aufnahme Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach	69
Abb. 73: REM Aufnahme Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach.....	69
Abb. 74: EDX Analyse Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach.....	69
Abb. 75: lichtmikroskopische Aufnahme Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach	69
Abb. 76: REM Aufnahme Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach.....	69
Abb. 77: EDX Analyse Ökostone, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach.....	69
Abb. 78: lichtmikroskopische Aufnahme R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach.....	70
Abb. 79: REM Aufnahme R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, Vergrößerung 150-fach	70
Abb. 80: EDX Analyse R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 100-fach	70
Abb. 81: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 250-fach, guter Verbund zwischen Zementsteinmatrix und Ziegelsplitt, Quarzkörner aus dem Ziegelsplitt an Grenzfläche, im porösen Zementstein sind recht viele Flugaschepartikel enthalten	71
Abb. 82: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, guter Verbund zwischen Ziegelsplitt und Zementsteinmatrix, Flugaschepartikel in Zementsteinmatrix	71
Abb. 83: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, guter Verbund zur Zementsteinmatrix, viele Flugaschepartikel in der Zementsteinmatrix, vereinzelt Portlanditanreicherungen (hellgrau).....	72
Abb. 84: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, mittig Zementstein, Vergrößerung 500-fach, guter Verbund zur Zementsteinmatrix	72
Abb. 85: REM Aufnahme DR 28, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche.....	73
Abb. 86: REM Aufnahme DR 28, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche.....	73
Abb. 87: REM Aufnahme DR 35, rechts/unten Ziegelsplitt, links/oben Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche	74
Abb. 88: REM Aufnahme DR 35, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, links/oben Riss zwischen Zementsteinmatrix und Quarz bzw. Feldspat	74
Abb. 89: REM Aufnahme DR 35, rechts/unten Ziegelsplitt, links/oben Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche	75
Abb. 90: REM Aufnahme DR 35, links/oben Ziegelsplitt, rechts/unten Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche	75
Abb. 91: REM Aufnahme DR 35, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche.....	76

Abb. 92: REM Aufnahme DR 35, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, rechts/unten Riss im Grenzbereich Zementstein/Kalkstein.....	76
Abb. 93: REM Aufnahme DR 35, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche.....	77
Abb. 94: REM Aufnahme DR 35, links/oben Ziegelsplitt, rechts/unten Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, rechts Risse im Grenzbereich Zementstein/Quarz/Kalkstein.....	77
Abb. 95: lichtmikroskopische Aufnahme DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach.....	78
Abb. 96: REM Aufnahme DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, Vergrößerung 150-fach, Riss an im Grenzbereich Quarz/Zementstein.....	78
Abb. 97: EDX Analyse DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein) , Vergrößerung 150-fach	78
Abb. 98: REM Aufnahme DR 28, linkes GK Mischung aus K-Feldspat (links/hellgrau) und Quarz (rechts/dunkelgrau), rechts Zementstein, Vergrößerung 200-fach, Risse an der Grenzfläche und innerhalb der Zementsteinmatrix, Rissweite: 4 µm.....	79
Abb. 99: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 98, helle Bereiche: unhydratisiertes C2S, links Riss im Grenzbereich zwischen Quarzgesteinskorn und Zementstein, Vergrößerung 800-fach	79
Abb. 100: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 99, Riss zwischen Quarzgesteinskorn (links) und Zementsteinmatrix, Vergrößerung 5000-fach, Riss zum Teil an Grenzfläche (Adhäsionsbruch) und zum Teil in Zementsteinmatrix (Kohäsionsbruch), unten rechts: Flugaschepartikel mit Reaktionssaum	80
Abb. 101: REM Aufnahme DR 28, rechts Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 500-fach, Riss an Grenzfläche zur Zementsteinmatrix.....	80
Abb. 102: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 101, rechts Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 5000-fach, teilweise haftet noch Zementstein am Quarz (Kohäsionsbruch).....	81
Abb. 103: REM Aufnahme DR 28, links/unten Na-Feldspat, restliche GK Quarz, dazwischen Zementstein, Vergrößerung 500-fach, deutliche Fehlstellen/Risse an den Grenzflächen, zum Teil Brückenbildungen aus Portlandit.....	81
Abb. 104: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 103, rechts/unten Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 2000-fach, Riss an Grenzfläche, Brückenbildung aus Portlandit, teilweise Adhäsions- oder Kohäsionsbruch.....	82
Abb. 105: REM Aufnahme DR 28, rechts/unten: GK aus rezyklisiertem Betonbruch, oben/dunkelgrau: neue Zementsteinmatrix, Vergrößerung 500-fach, Risse im Grenzbereich Quarz (im rezyklisiertem Betonbruch) zur neuen Zementsteinmatrix.....	82
Abb. 106: REM Aufnahme DN 35, unten Kalkstein, mittig Zementstein, oben Quarz, Vergrößerung 200-fach, Risse an Grenzflächen und in Zementsteinmatrix, hauptsächlich Adhäsionsbruch.	83
Abb. 107: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 106, unten Kalkstein, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Riss an Grenzfläche	83
Abb. 108: REM Aufnahme DN 35, oben Quarz, mittig Zementstein, unten Kalkstein, Vergrößerung 500-fach, Risse an Grenzflächen, Störungen in GK	84
Abb. 109: REM Aufnahme DN 35, oben Mischung aus Kalkstein und Quarz, mittig Quarz und Zementstein, unten Kalkstein, Vergrößerung 200-fach, Risse an Grenzflächen zu Quarz und Kalkstein	84
Abb. 110: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 109, unten Kalkstein, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Risse an Grenzfläche	85

Abb. 111: REM Aufnahme DN 35, unten Quarz, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Riss an Grenzfläche.....	85
Abb. 112: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 111, unten Quarz, oben Zementstein, Vergrößerung 5000-fach, Risse an Grenzfläche, links oben unhydratisiertes Klinkerkorn (heller Bereich), Portlandit an der Grenzfläche	86
Abb. 113: LIBS am IAB Weimar.....	88
Abb. 114: Kalibrierfunktion mittels SEC Analysis mit Filterfunktion	89
Abb. 115: Probe mit Rasterbereich	90
Abb. 116: Vollständiger Intensitätsbereich.....	90
Abb. 117: Intensitätsbereich 50 % bis 100 %	90
Abb. 118: Probe mit Rasterbereich (Ökostone Feess)	90
Abb. 119: Vollständiger Intensitätsbereich.....	90
Abb. 120: Lage von veröffentlichten R-Betonprojekten [57].....	92
Abb. 121: Zeitstrahl zu den R-Betonprojekten.....	93
Abb. 122: Luftaufnahme Technisches Rathaus Tübingen. Unverändert entnommen aus [58].....	94
Abb. 123: Rendering des Technischen Rathauses [59]	94
Abb. 124: Flurwand aus Mauerwerk mit R-Betonsteinen.....	95
Abb. 125: R-Betonmauerstein	95
Abb. 126: Stütze aus R-Beton.....	95
Abb. 127: Proben aus dem Bestandgebäude des Technischen Rathauses Tübingen.....	95
Abb. 128: Gemittelte Kurve der Wasseraufnahme und -abgabe	96
Abb. 129: Lichtmikroskopische Aufnahme des R-Betonmauersteins	96
Abb. 130: Lichtmikroskopische Aufnahme des R-Betonmauersteins	96
Abb. 131: Lichtmikroskopische Aufnahme der R-Betonstütze.....	97
Abb. 132: Lichtmikroskopische Aufnahme der R-Betonstütze.....	97
Abb. 133: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen der R-Betonmauersteine, Technisches Rathaus Tübingen.....	98
Abb. 134: Luftaufnahme des Gebäudes der Fa. Feess mit Markierung des späteren Kompetenzzentrums. Blick von Süd-Osten. [58].....	100
Abb. 135: Fertiggestellter Neubau	100
Abb. 136: Links: Oberfläche eines R-Betons mit Typ 2 geschalt, rechts: gleicher R-Beton nach dem Sandstrahlen.....	101
Abb. 137: Ökostones als Betonmauersteine für Silowände.....	102
Abb. 138: Ökostones mit Noppen und Mulden	102
Abb. 139: makroskopische Aufnahme, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate.....	104
Abb. 140: lichtmikroskopische Aufnahme Zementstein-Ziegelsplitt, Vergrößerung: 6x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate.....	104
Abb. 141: lichtmikroskopische Aufnahme Zementstein-Ziegelsplitt, Vergrößerung: 50x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate.....	105
Abb. 142: REM Aufnahme Zementstein-keramisches Gesteinskorn, Vergrößerung: 250x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate.....	105
Abb. 143: REM Aufnahme Zementstein-Quarzgesteinskorn, Vergrößerung: 50x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Jahre.....	105
Abb. 144: REM Aufnahme Zementstein-Kalksteinkorn, Vergrößerung: 250x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate	105
Abb. 145: Bruchflächen der Mörtelprismen, Proben 1.....	107
Abb. 146: Entwicklung des dynamischen E-Moduls über 1 Jahr.....	107
Abb. 147: Lichtmikroskopische Analyse	108

Abb. 148: Lichtmikroskopische Analyse	108
Abb. 149: Stoffstrommanagement zur möglichst weitgehenden hochwertiger Nutzung aller mineralischen Bauabfälle	110
Abb. 150: Die Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Relation zu den ressourcenpolitischen Zielen nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [65].....	111
Abb. 151: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Klimawandel	118
Abb. 152: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Versauerungspotential	119
Abb. 153: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Versauerungspotential	120
Abb. 154: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Gesundheitsrisiko durch Feinstaub	121
Abb. 155: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Eingriff in den Natur- und Landschaftshaushalt durch Flächenbelegung	122
Abb. 156: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Beanspruchung von mineralischen Ressourcen.....	123
Abb. 157: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Beanspruchung von fossilen Ressourcen	124
Abb. 158: Systemgrenzen nach dem Cut-Off- Ansatz	129
Abb. 159: Aufteilung des Produktlebensweges von Transportbeton in einzelne Abschnitte bzw. Phasen [74].....	129
Abb. 160: Übersicht verschiedener Gebäudezertifizierungen weltweit [81].....	129
Abb. 161: REM Aufnahme DR 28, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche.....	148
Abb. 162: REM Aufnahme DR 28, links/unten Na-Feldspat, restliche GK Quarz, dazwischen Zementstein, Vergrößerung 500-fach, deutliche Fehlstellen/Risse an den Grenzflächen, zum Teil Brückenbildungen aus Portlandit.....	148
Abb. 163: Vorkommen und Abbauggebiete von Gesteinskörnungen als Primärrohstoff in Baden – Württemberg [85]	156
Abb. 164: Feuchtegehalt der Feess 2/16 RC-Gesteinskörnung im Anlieferungszustand.....	156
Abb. 165: R-Betonprobe DR 35 vor der CIF Prüfung	157
Abb. 166: R-Betonprobe DR 35 nach der CIF Prüfung.....	157
Abb. 167: R-Betonprobe DR 38 vor der CIF Prüfung	157
Abb. 168: R-Betonprobe DR 38 nach der CIF Prüfung.....	157
Abb. 169: Referenzbetonprobe DN 35 vor der CIF Prüfung.....	157
Abb. 170: Referenzbetonprobe DN 35 nach der CIF Prüfung	157
Abb. 171: Referenzbetonprobe DN 38 vor der CIF Prüfung.....	157
Abb. 172: Referenzbetonprobe DN 38 nach der CIF Prüfung	157
Abb. 173: Truhe für die Frostprüfung	160
Abb. 174: Fragebogen Architekten, Teil 1.....	176
Abb. 175: Fragebogen Architekten, Teil 2.....	177
Abb. 176: Fragebogen Architekten, Teil 3.....	178
Abb. 177: Fragebogen Architekten, Teil 4.....	179
Abb. 178: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 1.....	180
Abb. 179: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 2.....	181
Abb. 180: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 3.....	182
Abb. 181: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 4.....	183

Abb. 182: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 5.....	184
Abb. 183: Fragebogen Betonfertigteilhersteller, Teil 1.....	185
Abb. 184: Fragebogen Betonfertigteilhersteller, Teil 2.....	186
Abb. 185: Fragebogen Betonfertigteilhersteller, Teil 3.....	187
Abb. 186: Auszug aus der Ausschreibung zum Praktikums- und Laborgebäude Pegasus der Universität Stuttgart-Vaihingen.	188
Abb. 187: Auszug aus dem StLB-Bau zum Praktikums- und Laborgebäude Pegasus der Universität Stuttgart-Vaihingen.	188
Abb. 188: Auszug aus Ausführungen der Tragwerksplanung der Fa. Werner Sobek GmbH zur Erweiterung des Landratsamts Ludwigsburg.	189
Abb. 189: Wahlposition im LV zur Erweiterung des Landratsamts Ludwigsburg.	189
Abb. 190: Auszug aus dem LV des Technischen Rathauses Tübingen.	190
Abb. 191: Sankey Diagramm	194

Tabellen

Tab. 1: Bauschutttaufkommen aus dem Hochbau und Recyclingquote [6]	14
Tab. 2: R-Beton-Hersteller in Baden-Württemberg	22
Tab. 3: Stoffliche Zusammensetzung von Gesteinskörnungen für Betone nach SN EN 206 [24]	23
Tab. 4: Zuordnung von R-Beton zu Expositionsclassen [25]	24
Tab. 5: Übersicht über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen der RC-Gesteinskörnungen.....	33
Tab. 6: Zuordnung der Fraktionen zum Geltungsbereich der Kategorien nach DIN EN 12620 [16]	37
Tab. 7: Anforderungen an die granulometrische Kornzusammensetzung von Typ 2 Gesteinskörnungen nach der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13].....	37
Tab. 8: Genaue Beschreibung der Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.	37
Tab. 9: Vergleich der Ergebnisse von S&K 2/8 mit den Anforderungen nach Kategorie GC 80/20	37
Tab. 10: Vergleich der Ergebnisse von S&K 8/16 mit den Anforderungen nach Kategorie GC 80/20 ..	38
Tab. 11: Vergleich der Ergebnisse von Feess 2/16 und GWV 2/16 mit den Anforderungen nach Kategorie GC 90/15	38
Tab. 12: Ergebnisse und Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen, Feess, 2/16.....	39
Tab. 13: Ergebnisse und Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen, Feess, 4/16.....	39
Tab. 14: Vergleich der Probenzusammensetzung mit Soll-Werten sowie dem Mittelwert mehrerer 2014 entnommener Proben [30].....	40
Tab. 15: Beschreibung der Proben	41
Tab. 16: Ergebnisse Rohdichte Feess 2/16, Messreihe 2	43
Tab. 17: Übersicht der untersuchten Proben.....	44
Tab. 18: Sulfatgehalt gleicher Proben, unterschiedlich aufbereitet	49
Tab. 19: Vergleich des Sulfat-Schnelltest mit IC-Analysen	49
Tab. 20: Betonrezepturen	53
Tab. 21: Festigkeiten und dynamisches Elastizitätsmodul nach 28 Tagen.....	54
Tab. 22: Ergebnisse der Rohdichte und Wasseraufnahme am Festbeton	57
Tab. 23: Auswertung der Porengrößenverteilungen.....	66
Tab. 24: Untersuchungsergebnisse der R-Betone des Bestandsgebäudes des Technisches Rathauses Tübingen	96
Tab. 25: Angaben zum verwendeten R-Beton am Neubau des Technisches Rathauses Tübingen.....	99
Tab. 26: Untersuchungsergebnisse Ökostones	103

Tab. 27: Druckfestigkeit Ökostones, Fremdüberwachung	103
Tab. 28: Aufbereitungserfolg von Altmauerwerk und Altbeton in einem ersten Brecherdurchgang	112
Tab. 29: Differenz des Gesamtergebnisses von R-Beton und konventionellem Beton: Veränderung mit der Differenz der Transportentfernung von RC-und Primärgesteinskörnung zum Betonwerk	125
Tab. 30: R-Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration nach Umweltwirkungskategorien	131
Tab. 31: konventionell hergestellter Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration nach Umweltwirkungskategorien	131
Tab. 32: R- Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration zum Ressourcenverbrauch	132
Tab. 33: konventionell hergestellter Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration zum Ressourcenverbrauch	133
Tab. 34: Projekte mit RC-Beton Einsatz.....	159
Tab. 35: Für die Ökobilanzierung verwendete Datensätze	162
Tab. 36: Vergleich verschiedener Datensätze zu Zementen	163
Tab. 37: Transportentfernungen verschiedener Zusatzmittel zum Betonwerk.....	163
Tab. 38: Übersicht zu Expositionsclassen.....	191
Tab. 39: Projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit der Projektbeteiligten im Jahr 2016.....	192
Tab. 40: Projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit der Projektbeteiligten im Jahr 2017.....	193

II. Zusammenfassung

Mit Original-Abbruchmaterial aus Ballungsräumen in Baden-Württemberg wurden stoffliche Untersuchungen und technische Prüfungen zu den Kennwerten des Mauerwerkbruchs für den Einsatz in R-Beton durchgeführt, um Hemmnisse gegen den Praxiseinsatz abzubauen und den Einsatz von R-Betonen im Hochbau zu fördern. Die RC-Körnungen des Typs 2 zwei qualifizierter Aufbereitungsunternehmen wurden über den bisherigen Stand der Regelwerke hinausgehend untersucht und bewertet. Die Typ 2-Körnungen von Feess und S&K erfüllen alle Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen, der DIN EN 12620 und der DIN 4226-100 und der Zulassungen. Entsprechend der Untersuchungsergebnisse besteht Potential den Mauerwerksanteil zu erhöhen und trotzdem noch die Grenzwerte einzuhalten.

Mit den Typ 2-Körnungen der Fa. Feess wurden R-Betone der Festigkeitsklasse C20/25, C25/30 und C30/37 hergestellt mit RC-Körnungs-Anteilen von 25 bzw. 35 M.% bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung. An diesen R-Betonen wurden alle relevanten Kennwerte einschließlich der Dauerhaftigkeit geprüft. Für die R-Betone wurden bewährte Betonrezepturen eines Transportbetonwerks der Fa. Holcim genutzt, um einen größtmöglichen Praxisbezug zu gewährleisten. Es wurden chemisch-mineralogische und licht- sowie rasterelektronenmikroskopische Gefügeuntersuchungen, Festigkeitsuntersuchungen und Frost- sowie Frost-Tausalz-Prüfungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die verwendeten R-Betone mit Hilfe ökologischer Daten auf ihren Beitrag zum Umweltschutz geprüft.

Der Typ 2 der rezyklierten Gesteinskörnung unterscheidet sich in den stofflichen und technischen Eigenschaften stärker von den natürlichen Gesteinskörnungen als der Typ 1. Nach Rezepturanpassung Betone lassen sich jedoch auch mit Typ 2-Körnungen gesichert Betone mit vergleichbaren Eigenschaften wie konventioneller Beton herstellen. Trotz der höheren Wasseraufnahme der Gesteinskörnung und der eher splittigen Kornform der Rezyklate ist bei R-Betonen im Vergleich zu herkömmlichen Betonen kein erhöhter Bindemittelanteil notwendig, um vergleichbare Festigkeiten zu erzielen. Die Dauerhaftigkeit der R-Betone wurde anhand des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands ermittelt. Dabei zeigten die R-Betone im Vergleich zu den Referenzbetonen mit Kalksteinsplitt eine höhere Beständigkeit.

Bei den licht- und rasterelektronenmikroskopischen Analysen wurde ein besonders guter Verbund zwischen dem Zementstein und Ziegelsplitten (als Hauptanteil des Mauerwerkbruchs) dokumentiert. Der Zementleim dringt in die vorgehästete poröse Struktur der Rezyklate ein, was zu einem besseren Verbund im Vergleich zu weniger und anders porösen, natürlichen Gesteinskörnungen führen kann.

Zur detaillierten Untersuchung der Zusammensetzung von R-Betonen und der möglichen Auswirkung von Bestandteilen der RC-Körnungen auf die Beton-Dauerhaftigkeit wurden Tast- Versuche mit dem LIBS-Verfahren durchgeführt, um die prinzipielle Eignung des Verfahrens für derartige Ziele festzustellen. Erste Ergebnisse lassen erwarten, dass mit Hilfe dieses Verfahrens zukünftig Dauerhaftigkeitsprognosen auf hohem Niveau möglich sind.

Mit RC-Körnungen des Typs 2 lassen sich Betone derselben Betonfestigkeitsklasse bei ähnlichen Bindemittelanteilen und w/z-Werten herstellen, wie es mit natürlichen Gesteinskörnungen möglich ist.

Durch die Untersuchungen der R-Betone, den Vergleich mit Grenzwerten und mit den Referenzbetonen konnte nachgewiesen werden, dass es sich um praxisgerechte R-Betonrezepturen mit RC-Körnungen des Typs 2 handelt. Die Dauerhaftigkeit und der Gefügeverbund der R-Betone ist gegenüber den untersuchten Referenzbetonen leicht verbessert. Das Hemmnis eines zu hohen Sulfatgehalts in den RC-Körnungen konnte entkräftet werden. Durch einen Schnelltest ist beim Recycler eine schnelle Abschätzung des Sulfatgehalts möglich.

Die Bearbeitung des von der DBU mit dem Aktenzeichen AZ 32105/01 geförderten Projekts erfolgte durch die Fakultät Bauingenieurwesen der HTWG Konstanz in Zusammenarbeit mit dem IFEU-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH und dem IAB Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH.

1. Aufgabenstellung des Forschungsprojekts

Das Bauwesen gehört zu den größten Verbrauchern an natürlichen Ressourcen und Energie der deutschen Wirtschaft. Das ist ökologisch und ökonomisch vertretbar, weil die Bauteile und Bauwerke verglichen mit anderen Wirtschaftsgütern eine deutlich längere technische Lebensdauer haben und wenn nach dem Rückbau hohe Recyclingquoten erzielt werden. In Bezug auf Einsparmöglichkeiten im Bauwesen spielt der Massenbaustoff Beton eine ganz zentrale Rolle. Neben der Reduzierung des energieintensiven Klinkeranteils haben auch anteilige Substitutionen natürlicher Gesteinskörnungen - mit dem größten Anteil im Beton – gegen Rezyklate großes Potential. Auch Gesteinskörnungen sind ein knappes Gut; die Erweiterung oder gar Neuerschließung von Brüchen und Gruben ist immer schwieriger, u. a. da es konkurrierende Flächennutzungsansprüche in unserem dicht besiedelten Land gibt. R-Betone sind eine Möglichkeit, tatsächlich Stoffkreisläufe zu schließen und daraus leitet sich die Aufgabenstellung des Projektes ab.

Obwohl die Anforderungen an die RC-Körnungen und R-Betone in Deutschland geregelt sind, werden diese ökologisch wertvollen und nachhaltigen Betone nur selten im Hochbau eingesetzt. Während mit R-Betonen mit Typ 1-Körnung (= rezyklierter Betonabbruch) nach erfolgreichen Pilot-Projekten zumindest regional gebaut wird (Baden-Württemberg, Berlin, Rheinland-Pfalz), bestehen für Körnungen aus Mauerwerkbruch noch größere Hemmnisse. Diese ergeben sich u.a. durch unzureichende Bekanntheit von R-Beton mit RC-Körnung des Typs 2 bei Planern und Bauherren, den möglichen Gipsgehalt im Abbruchmaterial, die schwankende Wasseraufnahme der verschiedenen Ziegelqualitäten und unzureichende Erfahrungen und Prognosen zur Dauerhaftigkeit in den entsprechenden Expositionsclassen des Betoneinsatzes.

Daraus leiten sich die Ziele des vorliegenden Projektes ab, das interdisziplinär mit Experten aus der Aufbereitungstechnik, Baustoffökologie und Betontechnik aufgestellt ist und 5 Aufgabenbereiche umfasst:

1. Untersuchung und Bewertung der RC-Körnung des Typs 2 eines Recyclers über den bisherigen Stand der Regelwerke hinausgehend und Erfassung der Schwankungsbreite
2. Entwicklung eines einfachen Verfahrens zur Qualitätskontrolle der Typ 2-RC-Körnung beim Abbruchunternehmen/Recycler
3. Herstellung von Beton mit realer Typ 2-RC-Körnung und Prüfung aller relevanten Kennwerte und der Dauerhaftigkeit anhand des Frostwiderstands
4. Erstellen von Ökobilanzen und ökonomische Betrachtung der geprüften Rezepturen als Beitrag zum Umweltschutz
5. Untersuchung und Bewertung der Multifunktionsblöcke „Ökostones“ der Fa. Feess nach mehrjähriger Freibewitterung und Aufzeigen möglicher weiterer Verwendungsmöglichkeiten von RC-Körnungen des Typs 2

2. Einleitung

In Bezug auf Ressourcenschonung spielt der Massenbaustoff Beton eine ganz zentrale Rolle. Neben diversen Projekten zur Einsparung des sehr energieintensiven Zements und der Entwicklung von Substitutionsbindemitteln, stehen auch die Gesteinskörnungen im Fokus, die den größten Anteil am Beton ausmachen. Der Energieaufwand für die Herstellung der natürlichen Körnungen ist zwar geringer als für den Zement, aber bezogen auf deren Menge bzw. großen Anteil im Gemisch trotzdem sehr hoch. Darüber hinaus nehmen deren Verfügbarkeit ab und die Transportwege zum Betonhersteller zu. Die Eingriffe in die natürliche Umwelt müssen begrenzt werden, was für ein flächenmäßig kleines Land wie Deutschland mit überwiegend großer Besiedlungsdichte besonders wichtig ist.

Die sprichwörtliche Meinung, es gäbe diese Ressource „wie Sand am Meer“, ist ein Trugschluss. Um auf die besondere Bedeutung für die deutsche Wirtschaft hinzuweisen, wurde der Sand im Jahr 2016

von der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften (DGG) und dem Berufsverband Deutscher Geowissenschaftler zum „Gestein des Jahres“ gewählt. [1]

Das aktuelle Projekt möchte durch gezielte Untersuchungen einen Beitrag dazu leisten, dass die ökologisch wertvollen R-Betone auch mit Typ 2-Körnungen stärker im modernen Hochbau eingesetzt werden. Das ist besonders in den Regionen effizient und nachhaltig, wo verstärkt Mauerwerkbruch anfällt und die Transportentfernungen für natürliche Gesteinskörnung vergleichsweise hoch sind.

Es befasst sich deshalb mit Untersuchungen zu den Hemmnissen:

- unzureichende Bekanntheit bei Planern und Bauherren
- möglicher Sulfatgehalt im Abbruchmaterial
- unzureichende Möglichkeiten der Qualitätskontrolle beim Recycling-Unternehmen vor Ort
- schwankende Eigenschaften, insbesondere der Wasseraufnahme der verschiedenen Ziegelqualitäten und
- unzureichende Aussagen zur Dauerhaftigkeit

2.1. Geschichtliches zur Anwendung von Ziegelbruch

Die Idee, mineralische „Abfälle“ wie Ziegelscherben mit einem Bindemittel zu einem neuen, druckfesten Material zusammenzufügen, ist mehr als 2000 Jahre alt. Ein bemerkenswertes Beispiel dafür ist das Opus caementitium, bei dem die Römer Ziegelsplitt und andere keramische Materialien mit Kalk als Bindemittel in festen Mörtel und „Betonen“ einsetzen. [2]

Im 20. Jh. wurde Mauerwerkbruch in großen Mengen nach dem 2. Weltkrieg u.a. für die Betonherstellung eingesetzt. Einerseits mangelte es an Baustoffen, da die Produktion und Transportmöglichkeiten fehlten und andererseits lagen die Straßen voller Schutt, der geräumt werden musste. Während die intakten Ziegel vom Mörtel befreit und wieder verbaut wurden, wurden die Bruchstücke in Brecheranlagen zerkleinert und als Gesteinskörnung für Beton eingesetzt. Bis 1955 wurden so ca. 11,5 Mio. Kubikmeter rezyklierte Gesteinskörnung produziert und als Baumaterial verwendet. Als 1960 alle Schuttberge beseitigt waren, wurde das damalige Recycling eingestellt [3]. Die Rezepturen und Erfahrungen aus dieser Zeit sind leider nicht überliefert. Über die Dauerhaftigkeit der daraus hergestellten Bauteile und Bauwerke sind keine nachteiligen Informationen bekannt. Bei Untersuchungen im Rahmen von Forschungsprojekten an einzelnen Objekten, u.a. einem monumentalen Kirchenbau aus Beton mit Ziegelabbruch wurden die wesentlichen Festbetonkennwerte erfasst und mit den Anforderungen an heutige Betone verglichen [4]. Der Zustand des betreffenden Objekts war - dem Alter von ca. 60 Jahren angemessen – sehr gut und es bestand vergleichsweise geringer Instandsetzungsbedarf.

Die Idee der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton wurde in den 1990er Jahren wieder aufgegriffen und maßgeblich von Prof. Grübl und Mitarbeitern an der Technischen Hochschule Darmstadt (Institut für Massivbau Baustoffe, Bauphysik, Bauchemie) untersucht und bewertet. Wesentliche Ergebnisse sind u.a. im Forschungsbericht „Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045“ [5] dokumentiert und bildeten teilweise die Grundlage für spätere Regelwerke.

Die von Grübl und Mitarbeitern entwickelten Rezepturen wurden in Folge für einzelne Bauteile an Pilotobjekten eingesetzt. Anfänglich wurden hauptsächlich CEM I Zemente (Portlandzement) eingesetzt. Aktuell finden für R-Betone fast ausschließlich die energetisch und ökologisch günstigeren CEM II Zemente (Kompositzemente) der Festigkeitsklasse 42,5 Anwendung.

Die Entwicklung in jüngerer Zeit und entsprechende Bauvorhaben werden in Kapitel 7 vorgestellt.

2.2. Bauabfälle in Deutschland

Die Bauabfälle sind in Deutschland der größte Abfallstrom. Das Bauschutttaufkommen aus dem Hochbau und die Recyclingquote sind in den letzten 20 Jahren nahezu gleichbleibend (Tab. 1)

Tab. 1: Bauschutttaufkommen aus dem Hochbau und Recyclingquote [6]

	1996	1998	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
Aufkommen [Mio. t]										
Boden, Steine und Baggergut	136,8	128	163,6	140,9	128,3	106	107,3	105,7	109,8	118,5
Bauschutt	58,1	58,5	54,5	52,1	50,5	57,1	58,2	53,1	51,6	54,6
Straßenaufbruch	17,6	14,6	22,3	16,6	19,7	14,3	13,6	14,1	15,4	13,6
Gemischte Bau- und Abbruchabfälle	7,5	4	11,8	4,3	1,9	10,9	12,4	13	14,6	14,6
Gipsabfälle					0,3	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7
Gesamt ohne Boden, Steine und Baggergut	83,2	77,1	88,6	73	72,4	82,7	84,7	80,8	82,2	83,5
Gesamt incl. Steinen aus Boden	95,5	84,1	99,8	79,1	81,5	90,9	93,6	90,6	92,9	95,6
Gesamt	220	205,1	252,2	213,9	200,7	188,7	192	186,5	192	202
Verbleib [Mio. t]										
Straßenbau	51,5	47,4	53,7	41,6	42	41,5	37,2	35,1	34,2	
Erdbau	13,4	11,8	11,9	9,9	12,3	16,3	19,9	14,6	13,4	
Beton ¹	1,6	0	1,9	0,8	2,4	1,1	0,8	11	12,6	
Sonstiges	5,3	3	5,1	4,9	2	4,7	8,7	4,5	6	
Gesamt	71,8	62,2	72,6	57,2	58,7	63,6	57,7	65,2	66,2	
Mengen an mineralischen Gesteinskörnungen [Mio. t]										
Industrielle Nebenprodukte			30	30	30	17,3	36,3	31,5	29,5	
RC-Baustoffe incl. Steine aus Boden	71,8	62,2	72,6	57,2	58,7	63,6	66,6	65,2	66,2	
Kiese und Sande			343	303,5	278,9	277,2	260	239	245	
Naturstein			210	201,6	190	187,3	218	208	211	
Gesamt			655,6	592,3	557,6	545,4	580,9	543,7	551,7	
Anteile [%]										
Industrielle Nebenprodukte			4,6	5,1	5,4	3,2	6,2	5,8	5,4	
RC-Baustoffe incl. Steinen aus Boden			11,1	9,7	10,5	11,7	11,5	12	12,2	
Kiese und Sande			53,2	51,2	50	50,8	44,8	44	45,1	
Naturstein			32	34	34,1	34,3	37,5	38,2	38,8	
Gesamt			100	100	100	100	100	100	100	
Quoten [%]										
Recycling	75,2	74	72,7	72,3	72	70	71,1	72	71,3	
Substitution			13,1	11,3	12,5	13,7	13,9	14,6	14,5	

Die Abb. 1 zeigt die allgemeine Prozesskette zur Herstellung von R-Beton. Durch den anteiligen Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung können die natürlichen Quellen geschont und die Deponieaufkommen des mineralischen Bauschutts reduziert werden. Durch kurze Transportwege zwischen den Abbruchbaustellen, den Recycling-Unternehmen, den Transportbetonwerken und den Neubaubauustellen verringert sich der klimaschädliche CO₂-Ausstoß.



Abb. 1: Allgemeine Prozesskette zur Herstellung von R-Beton [8]

„In Deutschland wurde ausgehend von einem Pilotprojekt in Ludwigshafen und durch die mittlerweile verbreitete Praxis gerade auch im Raum Stuttgart längst nachgewiesen, dass der Einsatz von Beton gegenüber dem Normalbeton hinsichtlich seiner bautechnischen Eigenschaften absolut gleichwertig ist und zudem auch zur Umweltentlastung beiträgt.“ [9]

2.3. Bedeutung von RC-Körnungen für die Betonherstellung

Bisher werden die R-Betone in den wenigen Gebieten Deutschlands fast ausschließlich als Ortbetone verwendet und kaum Betonfertigteile damit hergestellt. Erste Konzeptstudien zeigen auch Möglichkeiten beim Einsatz in Betonwaren und Betonfertigteilen auf.

Nimmt ein Transportbetonwerk R-Beton in sein Portfolio auf, bedeutet dies nicht nur die Erarbeitung von neuen Betonrezepturen und Betonprüfungen mit den vorhandenen Zementen und Zusätzen, sondern auch die Bereitstellung von neuen Silo-Kapazitäten in der Anlage. Da nicht auf vorhandene natürliche Gesteinskörnungen verzichtet werden kann, bedeutet dies hohe Investitionskosten für neue Silos und ggf. auch Erweiterung des Geländes. Damit sich diese Kosten mittelfristig rechnen und nicht nur eine ökologische Verbesserung darstellen, müssen die Entfernungen zum aufbereitenden Unternehmen kurz, die regelmäßige Nachlieferung der RC-Körnung in gleichmäßiger Qualität gesichert und die Kosten geringer sein als für die substituierte natürliche Gesteinskörnung.

Das ist besonders in den Regionen interessant, wo viel abgebrochen wird, aber die Entfernungen zum Bezug natürlicher Gesteinskörnungen vergleichsweise groß sind (siehe Anhang Abb. 163).

Laut Statistischem Bundesamt wurden allein 521 Mio. t an mineralischen Baurohstoffen im Jahr 2013 eingesetzt [10]. Außerdem wurden in Deutschland im Jahr 2014 insgesamt 401 Mio. t Abfälle produ-

ziert. Wie in Abb. 2 ersichtlich, handelte es sich bei 52 % (210 Mio. t) davon allein um Bau- und Abbruchabfälle [11]. Aufgrund dieser riesigen Massen kommt dem Baustoff-Recycling eine immer größere Bedeutung zu. Die Recyclingquote für Bau- und Abbruchabfälle liegt 2014 laut Statistischem Bundesamt bei 88 % [11]. Aus dem im Jahr 2015 veröffentlichten Monitoring-Bericht der Bauwirtschaft kann entnommen werden, dass im Jahr 2012 192 Mio. t mineralische Bauabfälle angefallen sind [12]. In Abb. 3 ist die Verteilung dieser mineralischen Abfälle dargestellt. Der größte Anteil entfiel dabei auf Boden und Steine mit 109,8 Mio. t. Die restlichen Anteile beliefen sich auf 51,6 Mio. t Bauschutt, 15,4 Mio. t Straßenaufbruch, 14,6 Mio. t Baustellenabfälle und 0,6 Mio. t Bauabfälle auf Gipsbasis.

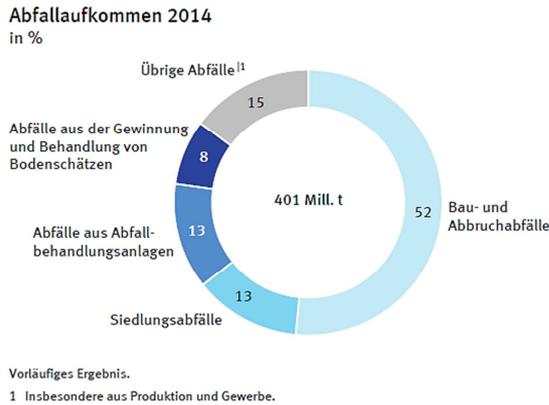


Abb. 2: Abfallaufkommen 2014 in Deutschland [11]

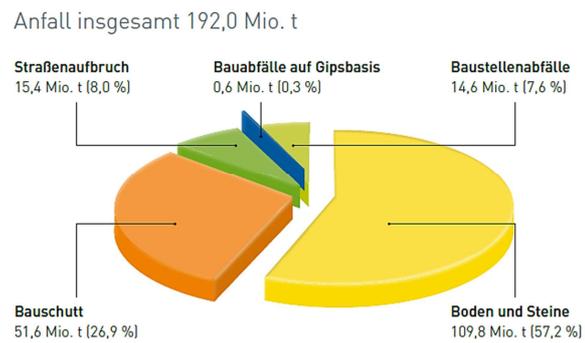


Abb. 3: Mengen an mineralischen Bauabfällen 2012 [12]

In Bezug auf den Bauschutt wurden davon 40,4 Mio. t recycelt, 8,7 Mio. t wurden in untergeordneten Anwendungsbereichen direkt verwertet und nur 2,5 Mio. t wurden auf Deponien beseitigt (siehe Abb. 4).

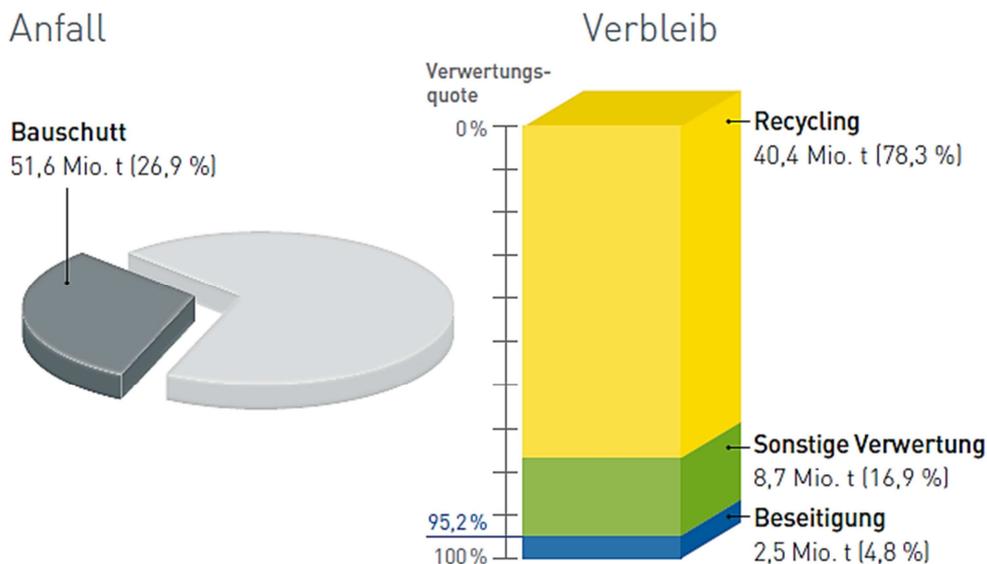


Abb. 4: Anfall und Verbleib von Bauschutt 2012 [12]

Nur durch eine sorgfältige Aufbereitung können aus den mineralischen Bauabfällen qualitätsgerechte Recycling-Baustoffe (RC Baustoffe) hergestellt werden. Diese Aufbereitung kann in stationären und mobilen Anlagen erfolgen.

Mit RC-Körnungen wurden in 2012 deutschlandweit 12 % des Bedarfs an Gesteinskörnungen abgedeckt (Abb. 5).

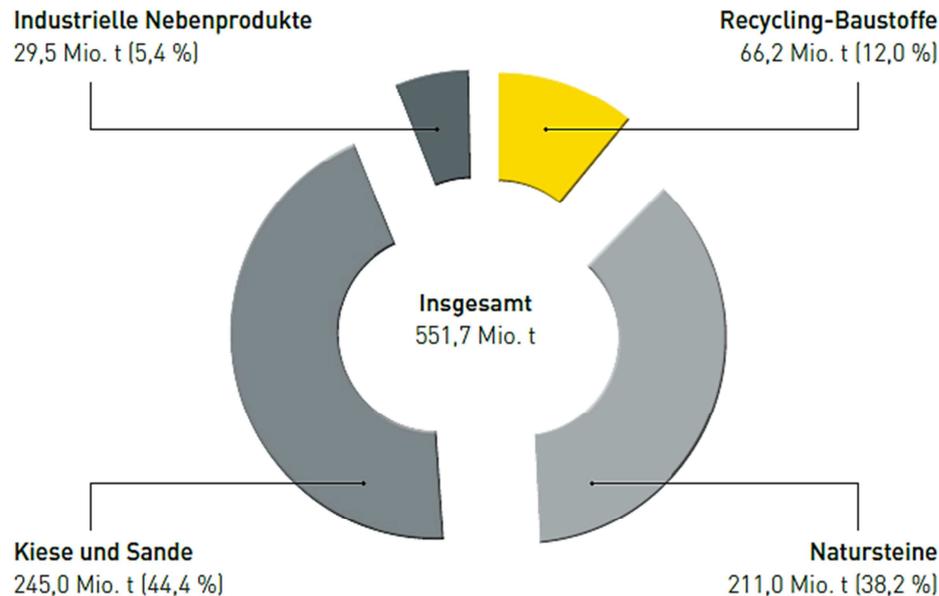


Abb. 5: Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnung 2012 [12]

Je nach Eigenschaften und stofflichen Zusammensetzungen können RC-Baustoffe unterschiedlich verwertet werden (Abb. 6). Dabei wird der Großteil mit 32,2 Mio. t im Straßenbau eingesetzt, 13,4 Mio. t werden im Erdbau und 6,0 Mio. t bei sonstigen Anwendungen verwertet. Nur 12,6 Mio. t werden in der Asphalt- und Betonherstellung verwendet, wobei der Anteil in der Asphaltherstellung überwiegt. Die derzeitige geringe Verwertung in der Betonherstellung wird dem Potenzial der RC-Gesteinskörnungen nicht annähernd gerecht.

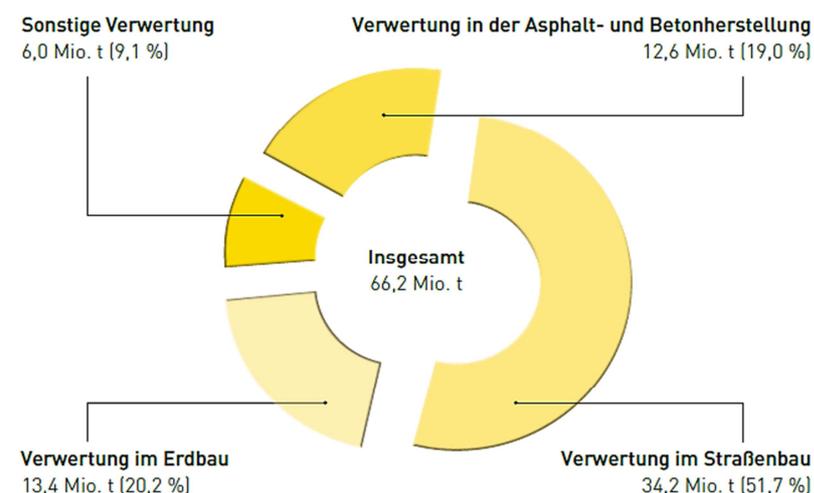


Abb. 6: Verwertung RC-Baustoffe 2012 [12]

Der selektive Rückbau in Bezug auf Fremd- und Störstoffe, der möglichst getrennte Abbruch von Beton- und Mauerwerk am Objekt und die fachgerechte Aufbereitung der Abbruchmaterialien bei qualifizierten Recycling-Unternehmen haben Möglichkeiten geschaffen, die natürlichen Gesteinskörnungen im Betongemisch anteilig durch rezyklierte Körnungen zu ersetzen.

Zahlreiche Untersuchungen aus den 1990er Jahren insbesondere an der TU Darmstadt bildeten die Grundlage für die Erarbeitung von Regelwerken, wonach RC-Körnungen heute als vollwertige Substi-

tute für Kies oder gebrochene Primärgesteine bei der Betonherstellung und dessen Einsatz in bestimmten Betongüten und Expositionsklassen zugelassen sind. Trotz Sicherung durch die Regelwerke und zahlreicher Untersuchungen zu R-Betonen mit Typ1-Körnungen beschränkt sich die standardmäßige Herstellung des R-Betons bisher auf wenige Transportbetonwerke.

3. RC/R-Beton

3.1. Begriff

RC-Beton (= Recycling-Beton) oder seit neuerem auch als R-Beton (= ressourcenschonender Beton) bezeichnet, ist ein Betongemisch, bei dem Kies und/oder gebrochene natürliche Gesteinskörnungen des Normalbetons anteilig durch RC-Gesteinskörnungen > 2 mm ersetzt werden. Die dafür verwendeten RC-Körnungen werden nach dem Rückbau der Objekte aus Beton und Bauschutt durch spezielle Aufbereitungsvorgänge zurück gewonnen (siehe auch Kapitel 3.3 und 4, Abb. 1).

3.2. R-Beton im Hochbau

Im Hochbau darf die RC-Gesteinskörnung in Betonen bis zu einer Druckfestigkeit von C 30/37 für bestimmte Expositionsklassen eingesetzt werden. Die R-Betone unterliegen den gleichen Anforderungen und Regelwerken wie konventionelle Betone – auch in Bezug auf die Qualitätssicherung und Güteüberwachung. Die Qualität der Körnung des Typs 2 unterliegt größeren Schwankungen als des Typs 1 und wird maßgeblich vom Zusammenwirken des Rückbaus der Mauerwerksmaterialien beim Abbruch und der Aufbereitungsstrategie für diese Materialien bestimmt (siehe Kapitel 4).

Bei welchen Betonsorten, für welche Expositionsklassen und in welchen Anteilen diese RC-Gesteinskörnung im Stahlbetonen eingesetzt werden darf, regelt seit 2004 die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [13] (siehe Abb. 7).

Normalfest		Zulässige Anteile rezyklierter GK > 2 mm, bezogen auf die gesamte GK (Vol.-%)		
C8/10 C12/15 C16/20 C20/25 C25/30 C30/37	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 (DAfStb-Alkalirichtlinie)		DIN EN 12620	
	Betonkorrosion infolge AKR	Expositionsklasse	TYP 1	TYP 2
Nicht anwendbar in den Expositionsklassen	WO (trocken)	XC1 Carbonatisierung	≤ 45	≤ 35
	WF ¹⁾ (feucht)	X0 kein Korrosionsrisiko		
XC1 bis XC4 Carbonatisierung				
XF1 ¹⁾ und XF3 ¹⁾ Frost ohne Taumittel				
Beton mit hohem Wassereindringwiderstand				
XS1, XS2, XS3 XD1, XD2, XD3 XF2, XF4 XA2, XA3 XM1, XM2, XM3	1) Zusätzliche Anforderungen nach Abschnitt 1, (3) und (4)	XA1 Chem. Widerstand	≤ 25	≤ 25

Abb. 7: Zulässige Anteile rezyklierter Körnungen für Expositionsklassen und Feuchtigkeitsklassen [13]

Der R-Beton mit Typ 1-Körnung wird seit Ende der 1990er Jahre als Konstruktionsbeton im Hochbau eingesetzt. R-Beton mit Typ 2-Körnung wird erst ca. seit 2013 in der Baupraxis eingesetzt (siehe Abb. 121, Kapitel 7), jedoch deutlich weniger als R-Beton mit Typ 1. Seine Anwendungen beschränken sich bisher i. d. R. auf Betonbauteile im Innenbereich oder Betonbauteile im geschützten Außenbereich (ohne Frost- und Tausalzbeanspruchung) in den Expositionsklassen XC0 und XC1 (nur trocken). Erfahrungen an zahlreichen Hochbauobjekten aus der Schweiz aus den vergangenen 10 Jahren zeigen, dass sich ca. 90 % der Betonnachfrage durch R-Betone abdecken lassen. An Objekten im Groß-

raum Zürich wurde gezeigt, dass auch R-Beton mit Typ 2-Körnung als Konstruktionsbeton erfolgreich eingesetzt werden kann. Dabei sind auch größere Anteile an Mauerwerkbruch als Substitut für natürliche Gesteinskörnung möglich als nach geltenden deutschen Regelwerken zulässig - ohne Abstriche in den Betoneigenschaften [14]. Das wurde u. a. auch durch Versuche im Rahmen eines vom Umweltministerium Baden-Württemberg geförderten Projekts der Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH in Zusammenarbeit mit dem ifeu Heidelberg belegt. [15]

3.3. Zusammensetzungen der RC-Körnungen

Als Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton sind mit Typ 1 und Typ 2 zwei rezyklierte Gesteinskörnungsmischungen nach der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [13] zugelassen. Typ 1 beschreibt eine Mischung aus überwiegend Altbeton und natürliche wiederverwendete Gesteinskörnung (> 90 %). Typ 2 enthält einen Anteil an gebrochenem Mauerwerk von maximal 30 %, so dass die Anteile an aufbereitetem Altbeton und natürlicher wiederverwendeter Gesteinskörnung hier bei > 70 % liegen. Nach [13] darf Typ 1 je nach Expositionsklasse bis zu 45 Vol.-% in der Gesteinskörnung enthalten sein, Typ 2 bis zu 35 Vol.-% (siehe Abb. 7).

Die Anforderungen an die rezyklierten Gesteinskörnungen sind in DIN EN 12620 [16] geregelt. Entsprechend der stofflichen Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm werden in Tabelle 1 der DAfStb-Richtlinie [13] die oben genannten Kategorien unterschieden:

- Typ 1: Betonsplitt
- Typ 2: Bauwerksplitt = Mauerwerkbruch

Während der Typ 1 zu 90 % aus Körnungen:

- Rc = Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton und
- Ru = Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung und nur
- Rb = max. 10 % Körnungen aus Mauerziegel, Kalksandstein und nicht schwimmender Porenbeton besteht

sind im Typ 2 70 % aus Rc- und Ru-Körnung und bis 30 % aus Rb-Körnung zulässig.

Der Typ 2 der rezyklierten Gesteinskörnung unterscheidet sich in den stofflichen und technischen Eigenschaften stärker von den natürlichen Gesteinskörnungen als der Typ 1.

Mit beiden Typen in den festgelegten Anteilen lassen sich nach Rezepturanpassungen Betone mit vergleichbaren Eigenschaften wie konventioneller Beton herstellen.

3.3.1. Typ 1-Körnung

Wie bereits erwähnt, besteht Typ 1 der RC-Körnungen aus Mischungen von Altbeton und wieder verwendeten natürlichen Gesteinskörnungen mit Anteilen > 90%.

Zur Herstellung von R-Betonen werden möglichst sortenreine rezyklierte Gesteinskörnungen benötigt. Dazu wird der Betonabbruch bereits auf der Baustelle beim selektiven Rückbau grob von anderen Baustoffen wie organischem Material oder Metallen getrennt. Störstoffe und organische Materialien werden händisch aussortiert. Danach wird das Material gebrochen und klassiert.

Ziel der Aufbereitung ist ein möglichst vollständiger Aufschluss von Zementstein und Gesteinskörnung (Abb. 8).

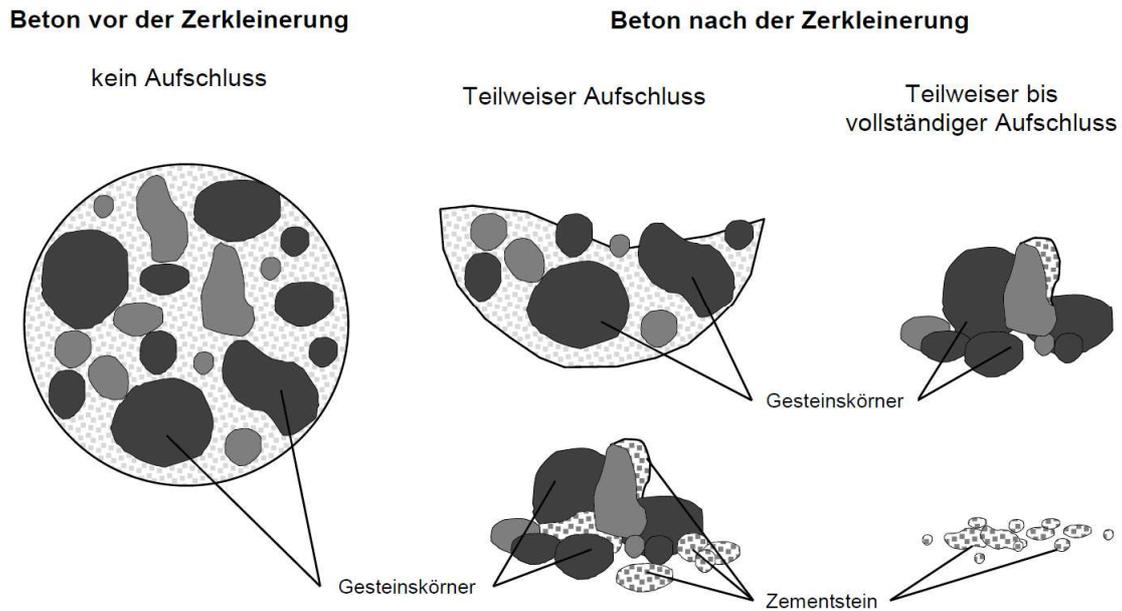


Abb. 8: Schematische Darstellung der verschiedenen Aufschlussgrade von Bauschutt bei der Aufbereitung [17]

3.3.2. Typ 2-Körnung

Der Rückbau der Mauerwerksbauten sollte bereits vor Ort so selektiv als möglich erfolgen, um den Aufwand bei der eigentlichen Aufbereitung beim Recycler gering zu halten. Das betrifft insbesondere die Abtrennung der Fremdbestandteile und Störstoffe.

Wie sich bei Voruntersuchungen herausstellte, kann die Gesteinskörnung Typ 2 nach dem Abtrennen der feinen Fraktionen < 2 mm am besten durch Zusammenmischen aus den Zwischenprodukten der getrennten Stoffströme zerkleinerter Altbeton > 2 mm und zerkleinertes Altmauerwerk > 2 mm hergestellt werden. Details dazu werden unter Kapitel 4 beschrieben.

In das Projekt wurden zwei Aufbereitungsunternehmen als Lieferanten der Typ 2-Körnung einbezogen, die diese Körnung bereits im Produktportfolio haben und über Erfahrungen im Rückbau und Recycling verfügen.

3.4. R-Beton-Hersteller in Baden-Württemberg

Folgende Transportbetonwerke in Baden-Württemberg lieferten bereits und/oder liefern aktuell R-Betone in verschiedenen Betongüten zum Teil auch R-Beton mit Typ 2-Körnungen. Tabelle 2 zeigt einige Anbieter - ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

Tab. 2: R-Beton-Hersteller in Baden-Württemberg

Transportbeton Waiblingen tbw@betonverbund.de	TBS Rhein-Neckar GmbH & Co. KG www.tbs-transportbeton.de
Winnender Frischbeton wfw@betonverbund.de	GODEL-BETON GmbH www.godel-beton.de
Holcim Kies und Beton GmbH Werk Kirchheim unter Teck und Stuttgart www.holcim-sued.de	Wenzelburger Transportbetonwerk GmbH & Co. KG www.wenzelburger-kg.de
HKS Betonwerk West hks@betonverbund.de	Peter Beton www.peterbeton.de

3.5. Regelwerke zum R-Beton und praktischer Einsatz

Seit Jahren werden die Normen in der Baubranche für die EU-Mitgliedsstaaten durch den Eurocode (EC) harmonisiert. Ziele sind europaweit einheitliche Entwurfskriterien und Sicherheitskonzepte, eine einheitliche Basis für europaweite Ausschreibungen und der einfache Austausch von Dienstleistungen und Produkten im Bauwesen.

Durch die Zugabe von rezyklierter Gesteinskörnung werden insbesondere die Frischbetoneigenschaften verändert und müssen durch Rezepturanpassungen kompensiert werden. Die verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen müssen bestimmte Anforderungen erfüllen. Die Regelwerke für diese rezyklierten Gesteinskörnungen sind länderspezifisch.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über den Stand der Regelwerke in Deutschland und der Schweiz zum Thema R-Beton und RC-Gesteinskörnungen gegeben.

3.5.1. Regelwerke in Deutschland

Für R-Beton gilt wie für Beton allgemein der Eurocode 2 - Betonbau (EC2). In DIN EN 1992-1-1 [18] (Bemessung von Stahlbeton) wird für die Betoneigenschaften auf die DIN EN 206 [19] verwiesen. Ergänzend dazu gilt DIN 1045-2 [20] als nationales Anwendungsdokument zur DIN EN 206 [19]. Die DIN 206 verweist unter rezyklierter Gesteinskörnung auf die DIN EN 12620 [16]. Als Anwendungsdokument bestimmt die DIN 1045-2 [20] ergänzend für rezyklierte Gesteinskörnungen, dass die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100“ [13] zu beachten ist. Weiterhin besitzt die DIN 4226-100 [21] als nationale Norm für rezyklierte Gesteinskörnungen in Beton und Mörtel Gültigkeit. Wahrscheinlich werden kurz nach dem Ende des Projekts die DIN 4226-101 und DIN 4226-102 als Nachfolgedokumente zur 4226-100 [21] veröffentlicht.

Eine Übersicht über die derzeit gültigen Normen in Bezug auf R-Beton zeigt Abb. 9.

Europäische Produktnorm	Mitgeltende deutsche Normen und Regelwerke
<p>Gesteinskörnungen für Beton</p> <p>EN 12620:2002+A1:2008 (D) DIN EN 12620:2008-07</p> <p>legt</p> <ul style="list-style-type: none"> → Eigenschaften von GK fest, die durch Aufbereitung natürlicher, industriell hergestellter oder rezyklierter Materialien als Betonzuschlag gewonnen werden → QS-System zur WKP und für Konformitätsnachweis fest → für alle Betonsorten einschließlich Beton nach EN 206-1 und Straßenbeton, Betonfertigteile <p>Beton</p> <p>EN 206-1:2000-12 DIN EN 206-1:2001-07 +A1:2004+A2:2005</p> <p>Teil 1: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität</p>	<p>▪ DIN 4226-100:2002-02 Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen</p> <p>→ Festlegung spezifischer baustofflicher und umweltverträglicher Anforderungen</p> <p>▪ DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Reaktion)“, Teil 3, Ausgabe 2007-02</p> <p>Beton</p> <p>▪ DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zur DIN EN 206-1</p> <p>▪ DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100“, Ausgabe 2004-12 Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1</p> <p><i>Ersatz Ausgabe Sept. 2010 ... nach DIN EN 12620</i></p>

Abb. 9: Übersicht über europäische und deutsche Normen und Regelwerke, die für R-Beton relevant sind

3.5.2. Regelwerke in der Schweiz

Für R-Beton gelten in der Schweiz die Normen SN EN 206-1, sowie die SIA 262 „Betonbau“, die sich stark am EC 2 orientiert. Des Weiteren gilt die Norm SN EN 12620 (SN 670102B-NA) - „Gesteinskörnungen für Beton“. Ergänzend zu diesen Normen gibt es das SIA Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“ [22], [23]. Die Bezeichnung R-/RC-Beton wird ab einem Rezyklatanteil ≥ 25 M.% verwendet.

In der Schweiz wird zwischen zwei Typen rezyklierter Gesteinskörnung unterschieden:

- Betongranulat (C)
- Mischgranulat (M)

Die zwei Gesteinskörnungen sind prinzipiell mit den Typen 1 und 2 in Deutschland zu vergleichen, unterscheiden sich jedoch in ihrer prozentualen Zusammensetzung.

Tab. 3: Stoffliche Zusammensetzung von Gesteinskörnungen für Betone nach SN EN 206 [24]

Bezeichnung der Gesteinskörnung	Gesteinskörnung nach SN EN 12620				Fremdstoffe	
	Ru und natürliche Gesteinskörnungen	Rc	Rb	Ra	X+Rg	FL
	[M.%]	[M.%]	[M.%]	[M.%]	[M.%]	[cm ³ /kg]
Betongranulat (C)		≥ 25	≤ 5	≤ 1	$\leq 0,3$	≤ 2
Mischgranulat (M)	< 95		≥ 5	≤ 1	$\leq 0,3$	≤ 2

Rc: Körner aus Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton

Ru: ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung

Rb: Körner aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen, Porenbetonsteinen (nicht schwimmend)

Ra: Körner aus bitumenhaltigen Materialien

Rg: Glaskörner

X: Körner aus sonstigen Materialien: Ton, Erde, Metalle, Holz, Kunststoff, Gummi, Gips, usw.

FL: Körner aus schwimmendem Material

Eine von der Norm festgesetzte Obergrenze für den Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen in R-Beton gibt es nicht. Im R-Beton werden - anders als in Deutschland - auch feine RC-Gesteinskörnungen < 2 mm eingesetzt. Es lassen sich nach Voruntersuchungen bei mehr als 25 % Anteil an RC-Körnung alle in Tab. 4 angegebenen Expositionsklassen mit R-Betonen herstellen. In der Schweiz ist, anders als in Deutschland, auch R-Betoneinsatz für Spannbeton möglich, allerdings nur mit Typ 1 Körnungen, nach vorheriger Analyse.

Bei der Voruntersuchung werden Kennwerte wie Wasseraufnahme, Festigkeit und der Widerstand gegen Alkali-Kieselsäure-Reaktion getestet. Der Marktanteil von R-Beton beträgt in der Schweiz ca. 13 % [24], [25]. Gründe hierfür sind tolerantere Normen und gezielte Förderung durch den Staat. So fordert beispielsweise die Stadt Zürich bei öffentlichen Baumaßnahmen die Einhaltung eines festgesetzten R-Betonanteils [26].

Tab. 38 (im Anhang) gibt einen Überblick über die in der Schweiz für verschiedene Anwendungen eingesetzten R-Betone, die Zementarten und -gehalte.

Tab. 4: Zuordnung von R-Beton zu Expositionsklassen [25]

R-Beton		Expositionsklassen (CH)				
	Anteile	X0	XC1, trocken	XC1, nass; XC2; XC3	XC4	XD; XF; XA
RC-C	Rc ≥ 25 M.% Rb < 5 M.%	zulässig				①
RC-M	Rb ≥ 5 M.% Rb ≤ 25 M.% Rc + Rb ≥ 25 M.%	zulässig			①	nicht zulässig
	Rb > 25 M.%	zulässig		①	①	
① nur nach entsprechenden Voruntersuchungen						

RC-C: R-Beton mit Betongranulat

RC-M: R-Beton mit Mischgranulat

Rc: Körner aus Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton

Rb: Körner aus Mauer- und Dachziegeln aus gebranntem Ton, Kalksandsteinen, Porenbetonsteinen (nicht schwimmend)

X0: Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko, ohne Bewehrung und alle Umgebungsbedingungen, außer XF, XA, XM

XC1: Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, trocken oder ständig nass

XC2: Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, nass selten trocken

XC3: Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, mäßige Feuchte

XC4: Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung, wechselnd nass und trocken

XD: Bewehrungskorrosion durch Chloride ausgenommen Meerwasser

XF: Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel

XA: Betonangriff durch aggressive chemische Umgebung

4. Aufbereitungstechnologien und Herstellung von RC-Körnungen Typ 2

4.1. Verfahrensschritte bei der Bauabfallaufbereitung

Die Aufbereitung hat die Aufgabe, aus dem Sekundärrohstoff Bauabfall einen Recycling-Baustoff mit definierten Eigenschaften zu erzeugen. Das betrifft zum einen die Partikelgrößenzusammensetzung, die den Anforderungen entsprechen muss, die für das jeweilige Einsatzgebiet gelten. Zum anderen müssen die Materialzusammensetzung und bestimmte physikalische Merkmale eingehalten werden, insbesondere wenn die Gesteinskörnung im klassifizierten Straßenoberbau oder im Betonbau angewendet werden soll.

Die Qualität der erzeugten Recycling-Baustoffe hängt von dem jeweiligen Ausgangsmaterial (Abb. 10) und der eingesetzten Aufbereitungstechnologie ab. Bei homogenem Ausgangsmaterial kann mit einem geringen technologischen Aufwand ein qualitätsgerechter Recycling-Baustoff erzeugt werden. Ist das Ausgangsmaterial heterogen, muss der Aufbereitungsprozess deutlich aufwändiger sein, um dieses Ziel zu erreichen. Die für die Bauschutttaufbereitung zu wählende Technologie wird also durch die Merkmale des Ausgangsmaterials und die angestrebte Produktqualität bestimmt.

Um sortenreine Ziegelrezyklate herzustellen, können unterschiedliche Wege beschritten werden:

- Das Recyclingunternehmen belegt sortenreinen Ziegel- und Dachziegelbruch mit vergleichsweise geringen Annahmegebühren oder nimmt sie ohne Gebühren an, um so einen Anreiz für die Anlieferung von vorsortiertem Material zu geben.
- Das Recyclingunternehmen gestaltet seine Aufbereitungsprozesse so, dass aus Mauerwerkbruch als Gemisch von Ziegel, mineralisch gebundenen Wandbaustoffen, Mörtel und Putz sortenreine Ziegelkörnungen gewonnen werden können.



Abb. 10: Sortenreiner Ziegelbruch (links) bzw. Mauerwerkbruch (rechts) als Ausgangsmaterialien für die Herstellung von Ziegelrezyklaten ¹

Die Aufbereitung untergliedert sich in die Prozessschritte Zerkleinerung – Klassierung – Sortierung. Die *Zerkleinerung* hat die Reduktion der Partikelgröße und den Aufschluss von Verbundpartikeln (Abb. 11) zum Ziel. Sie kann in Backenbrechern oder Prallbrechern erfolgen. Welches Aggregat zu bevorzugen ist, kann nicht eindeutig beantwortet werden, weil sich Vor- und Nachteile gegenüberstellen. In Bezug auf die Eigenschaften des zerkleinerten Produkts bestehen folgende Tendenzen:

- Partikelgrößenverteilung: Im Backenbrecher wird ein gröberes Brechprodukt erzeugt als im Prallbrecher. Da für die Betonherstellung nur Rezyklate > 2 mm eingesetzt werden können, kann der verwertbare Anteil beim Brechen im Backenbrecher höher sein.
- Kornform: Bei der Zerkleinerung von plattigem Aufgabematerial im Backenbrecher kann in den Fraktionen, die gröber als die Wandstärke des Aufgabematerials sind, ein höherer Anteil an ungünstig geformten Partikeln entstehen. Dieser Effekt tritt etwa ab Partikelgrößen > 32 mm auf, die in der Regel nicht für die Betonherstellung eingesetzt werden.

¹ Bildquelle: M. Landmann



Abb. 11: Mauerwerkbruch nach der Zerkleinerung (links) und Verbundpartikel Ziegel mit anhaftendem Mörtel (rechts) ²

In der Recyclingpraxis gibt es sowohl Anlagen, bei welchen ausschließlich Backenbrecher für die Zerkleinerung eingesetzt werden, als auch solche, die mit Prallbrechern ausgerüstet sind.



Abb. 12: Backenbrecher in einer stationären Bauschutttaufbereitungsanlage ³



Abb. 13: Prallbrecher in einer stationären Bauschutttaufbereitungsanlage ⁴

Die *Klassierung* dient der Trennung von polydispersen Partikelgemischen nach der Partikelgröße. In den technologischen Ablauf der Bauschutttaufbereitung ist die Klassierung sowohl vor als auch nach der Zerkleinerung eingeordnet. Vor der Zerkleinerung dient sie dem Abtrennen des sogenannten Vorsiebmaterials. Dadurch werden die Zerkleinerungsanlagen entlastet und der Verschleiß verringert. Gleichzeitig werden Bodenbestandteile und wenig feste Bestandteile des Bauschutts, die sich in den feinen Fraktionen anreichern, ausgeschleust. Nach der Zerkleinerung hat die Klassierung folgende Aufgaben:

- Der Begrenzung der oberen Korngröße oder der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen für die nachfolgende Verwendung, z.B. als Tragschichtmaterial oder als rezyklierte Gesteinskörnung.
- Der Vorbereitung der Sortierung, wenn diese nur bei engem Körnungsband möglich ist.

² Bildquelle: A.Müller

³ Bildquelle: Walther, C.: Die „BBW Recycling Mittelbe GmbH“ — Reportage über ein erfolgreiches Recyclingunternehmen. Diplomarbeit, Bauhaus-Universität 2006.

⁴ Bildquelle: A. Müller



Abb. 14: Siebstation in einer stationären Recyclinganlage ⁵

Unter *Sortierung* wird die Trennung eines Materialgemisches nach Stoffarten unter Nutzung typischer Stoffmerkmale verstanden. Das am häufigsten verwendete Sortiermerkmal ist die Dichte. Mit trockenen Dichtesortierverfahren lassen sich leichte Störstoffe wie Papier, Folien, Dämmstoffe etc. aus Bauabfällen abtrennen. Mit nassen Verfahren gelingt auch die Abtrennung von Holz und Porenbeton. Eine Trennung der im Mauerwerkbruch nebeneinander vorliegenden Wandbaustoffarten sowie Beton und ggf. Naturstein ist wegen der sich stark überlappenden Dichten der Komponenten nicht möglich. Als Alternative bietet sich die Einzelkornsortierung an. Sie beruht auf augenscheinlichen oder mittels Sensoren messbaren stoffspezifischen Merkmalen der Bestandteile eines Schüttgutstroms. Sie kann manuell durch Klaubung erfolgen. Zunehmend wird diese händische Sortierung aber durch sensorgestützte Verfahren abgelöst, die auf verschiedenste Sortiermerkmale wie Farbe, Kornform oder auch Spektren in Wellenlängenbereichen der elektromagnetischen Strahlung außerhalb des sichtbaren Bereichs zurückgreifen.

4.2. Herstellung von Ziegelrezyklaten für die Betonherstellung

Um Ziegelrezyklate als Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs II verwerten zu können, müssen diese sortenrein und fraktioniert vorliegen. Bevorzugt werden die Fraktionen 2/8 mm, 8/16 mm und 16/22 mm. Die erforderliche Aufbereitungstechnologie für die Herstellung solcher Rezyklate hängt von der Art des Ausgangsmaterials ab. Bei sortenreinem Ausgangsmaterial reichen eine Vorabsiebung, Zerkleinerung und Klassierung aus (Abb. 15). Die Klassierung sollte in zwei Stufen erfolgen. Eine Rückführung des Überkorns der ersten Klassierstufe in den Brecher ist erforderlich, um die obere Partikelgröße einzuhalten.

Für die Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch wird ein mehrstufiger Prozess benötigt. Dabei kann die notwendige Sortierung entweder vor oder nach der Zerkleinerung erfolgen. Für den in Abb. 16 dargestellten Prozessablauf mit einem nach dem Brecher angeordneten Sortieraggregat kommt nur eine sensorgestützte Sortierung in Frage. Dafür muss das Zerkleinerungsprodukt in einer geeigneten Fraktion, beispielsweise 8/22 mm vorliegen. Die Abtrennung der Fraktion 0/8 mm ist erforderlich, weil gegenwärtig nur gröbere Körnungen automatisch sortiert werden können. Erfolgt die Sortierung vor der Zerkleinerung (Abb. 17) muss die Vorabsiebung zu höheren Partikelgrößen hin verschoben werden, damit manuell oder mechanisch handelbare Stücke vorliegen.

⁵ Bildquelle: A. Müller

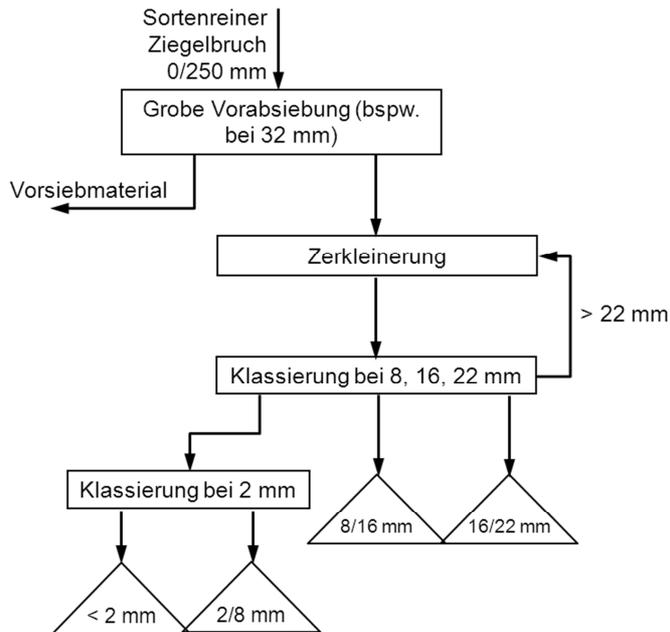


Abb. 15: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus sortenreinem Aufgabematerial

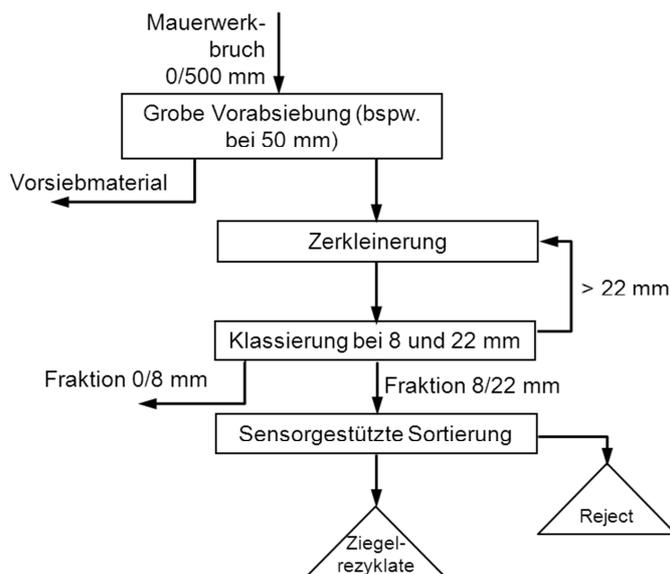


Abb. 16: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit nach der Zerkleinerung angeordneter Sortierung

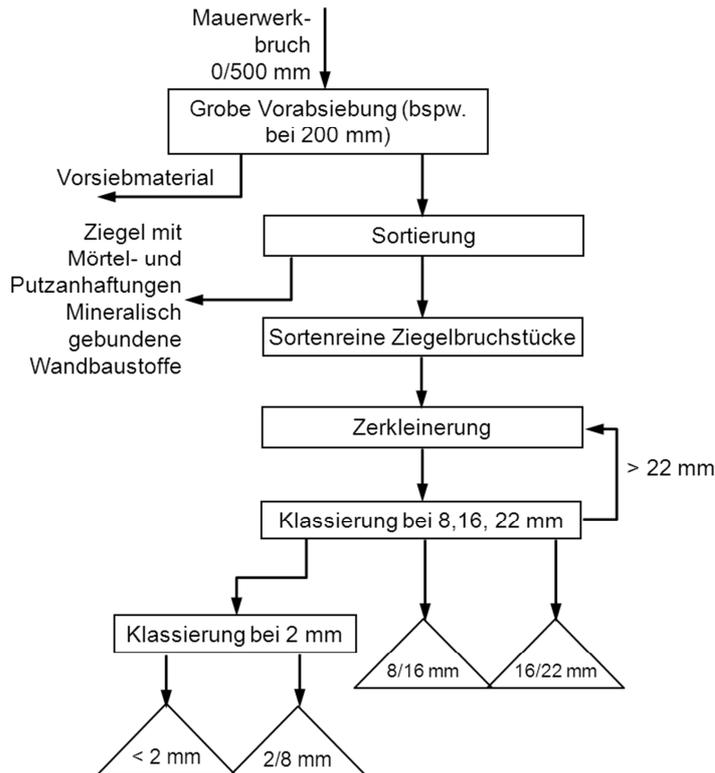


Abb. 17: Schema der Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit vor der Zerkleinerung angeordneter Sortierung

Im Zuge der Aufbereitung wird der Materialstrom mehrfach geteilt. Nur ein Teil des Aufgabematerials findet sich im Produkt wieder. Um diesen Anteil abschätzen zu können, werden bestimmte Sieblinien für das Ausgangsmaterial und das Zerkleinerungsprodukt zugrunde gelegt. Das Ausgangsmaterial soll im Fall der sortenreinen Ziegel ein Größtkorn von 250 mm und im Fall des Mauerwerkbruchs von 500 mm aufweisen. Die nach dem Gates-Gaudin-Schuhmann-Ansatz berechneten Sieblinien sind in Abb. 18 dargestellt. Das Produkt hat ein Größtkorn von 22 mm und folgt ebenfalls der GGS-Verteilung (Abb. 19). Der Ziegelgehalt des Mauerwerkbruchs wird mit 50 Masse-% angenommen, was den Praxisbedingungen entspricht. Die anhand dieser Annahmen berechneten Massenbilanzen für die verschiedenen Herstellungsszenarien sind im Abb. 20 dargestellt.

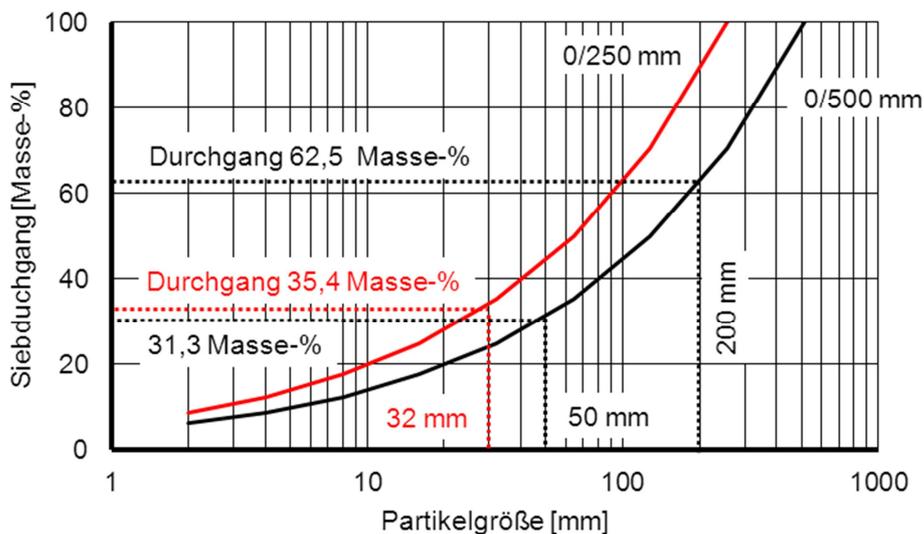


Abb. 18: Siebdurchgang als Funktion der Partikelgröße für das Aufgabematerial

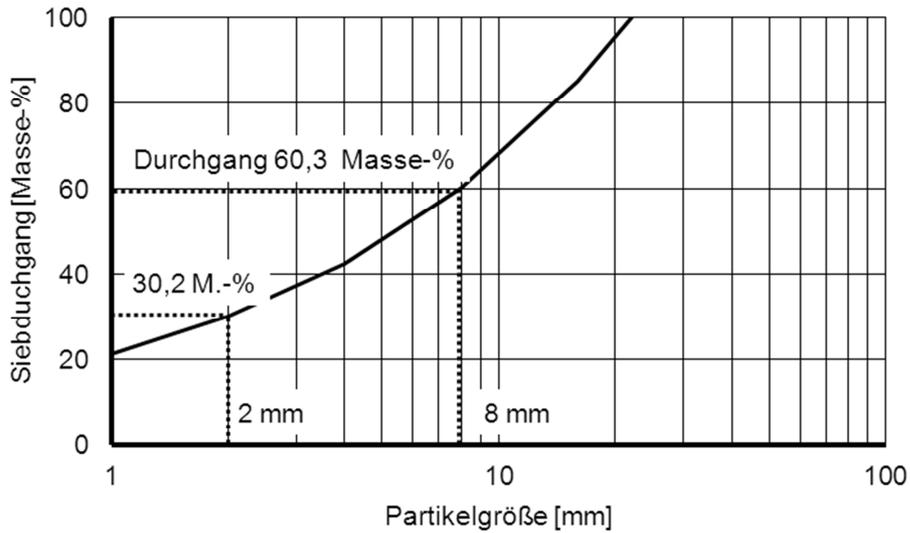
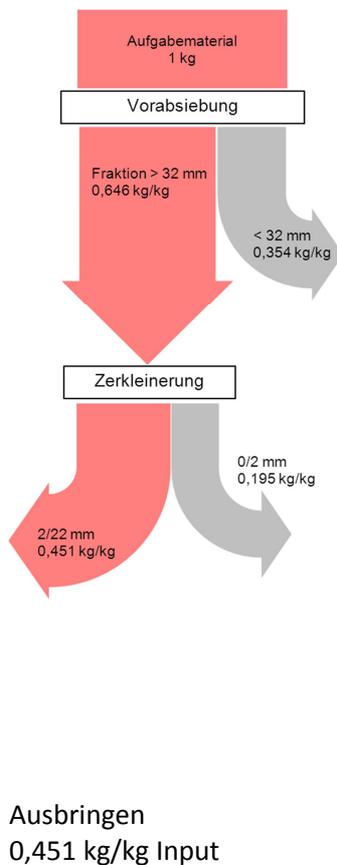
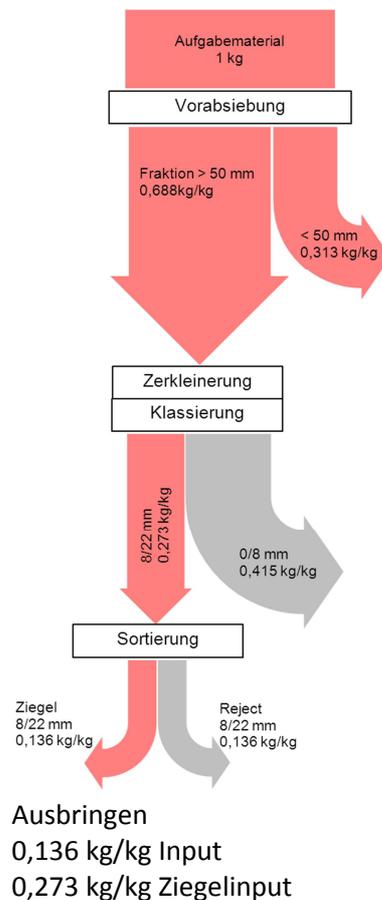


Abb. 19: Siebdurchgang als Funktion der Partikelgröße für das Produkt

Herstellung von Ziegelrezyklaten aus sortenreinem Aufgabematerial



Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit nach der Zerkleinerung angeordneter Sortierung



Herstellung von Ziegelrezyklaten aus Mauerwerkbruch mit vor der Zerkleinerung angeordneter Sortierung

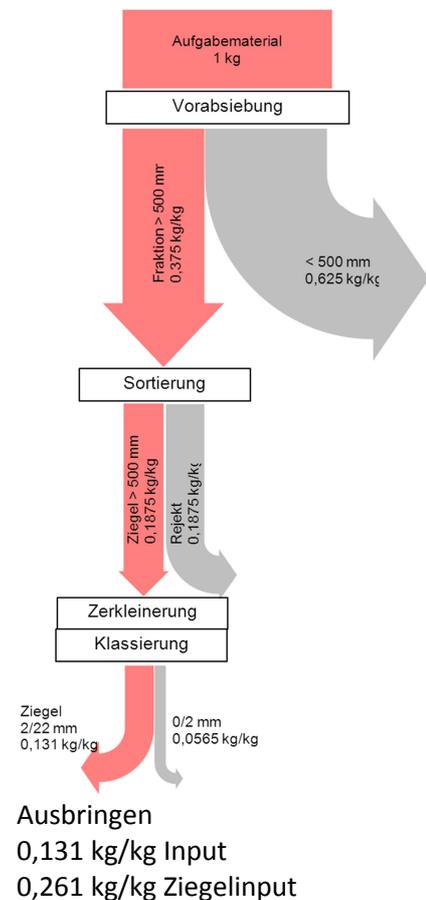


Abb. 20: Massenbilanzen für die Herstellungsszenarien nach Abb. 15, 16, 17

Bei der Verwendung von sortenreinem Ziegelbruch als Ausgangsmaterial beträgt das Ausbringen an rezyklierten Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton 0,451 kg/kg Input. Das Vorsiebmaterial und die Fraktion < 2 mm entstehen als Nebenprodukte. Bei der Verwendung von Mauerwerkbruch geht das Ausbringen zurück, wobei kein wesentlicher Unterschied zwischen den Herstellungsszenarien besteht. Bei Bezug auf den Ziegelanteil im Input auf 50 Masse-% beträgt das Ausbringen 0,273 bzw. 0,261 kg/kg Ziegel im Input. Als weitere Stoffströme entstehen das Vorsiebmaterial, feine Körnungen und der Sortierrest.

Aus den Abschätzungen folgt, dass der Einsatz sortenreiner Ziegel gegenüber der Verwendung von Mauerwerkbruch eindeutige Vorteile hat. Um auf dieser Basis kontinuierlich rezyklierte Ziegelkörnungen bereitstellen zu können, ist das Vorhalten von ausreichenden Mengen an Inputmaterial und an Produkten erforderlich. Dadurch können Diskontinuitäten bei der Materialanlieferung ausgeglichen werden. Ausreichende Lagerkapazitäten sowohl für das Inputmaterial als auch für die hergestellten Produkte müssen vorhanden sein.

Bei der Verwendung von Mauerwerkbruch als Ausgangsmaterial kann das Ausbringen durch folgende Maßnahmen erhöht werden:

- Der für die Vorabsiebung gewählte Siebschnitt wird in Abhängigkeit von der Qualität des Ausgangsmaterials zu geringeren Partikelgrößen hin verschoben.
- Bei der sensorgestützten Sortierung wird ein breiteres Kornband, beispielsweise 4/22 mm eingesetzt.
- Bei der sensorgestützten Sortierung wird nicht der Wertstoff „Ziegel“ aussortiert, sondern die Störstoffe bitumenhaltige Materialien, Glas, Holz, Kunststoff, Gummi, Gips, Beton und natürliche Gesteinskörnungen, die für die Betonherstellung geeignet sind, verbleiben im Produkt.

Eine völlig andere Strategie zur Erhöhung des verwendbaren Anteils von Mauerwerkbruch könnte darin bestehen, das Material analog zu der in Abb. 15 dargestellten Vorgehensweise für die Herstellung von Ziegelrezyklaten aus sortenreinem Aufgabematerial zu verarbeiten. Danach würden die Körnungen 2/8 mm, 8/16 mm und 16/22 mm mittels einer Nasssortierung von Störstoffen befreit. Anschließend wird die Materialzusammensetzung der sortierten Körnungen bestimmt. Diese bildet die Grundlage für die Berechnung der Mengen, die einem Betonrezyklat mit bekannter Zusammensetzung zudosiert werden können, ohne die für rezyklierte Gesteinskörnungen geltenden Grenzwerte zu überschreiten. Im Unterschied zu den Herstellungsszenarien mit integrierter Einzelkornsartierung, hätte diese Variante den Vorteil, dass entsprechende Sortieraggregate kostengünstig zur Verfügung stehen.

5. Untersuchungen an den RC-Körnungen Typ 2

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 der Firmen Feess, Scherer & Kohl und GVW einbezogen und näher untersucht. Die Hersteller der untersuchten RC-Körnungen und ihre Leistungen zur Förderung der Anwendung von Recycling-Körnungen im Beton werden im Folgenden kurz vorgestellt.

5.1. Hersteller

Heinrich Feess GmbH & Co. KG, Kirchheim

Die 1951 als Fuhrunternehmen gegründete Fa. Feess beschäftigt sich bereits seit Mitte der 90er Jahre des 20. Jh. mit Entsorgungsdienstleistungen und dem Recycling-Gedanken. 1994 wurde der erste Recyclingpark in Ebersbach/Fils eröffnet. Seit Juli 2001 ist die Fa. Feess zertifizierter Entsorgungsfachbetrieb. In dem 2010 in Betrieb genommenen Recyclingpark werden ca. 15 verschiedene, fremdüberwachte und teils zertifizierte sowie QRB-geprüfte⁶ Qualitäts-Recyclingprodukte wie RC-Sand, RC-Splitt bis RC-Schotter hergestellt.

2015 erhielt die Fa. Feess als erstes Unternehmen in Deutschland die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für RC-Gesteinskörnungen des Typs 1 und 2. Für ihre Vorreiterrolle im Bereich qualitätsgesicherter Recyclingbaustoffe erhielt Firmeninhaber Walter Feeß den Mittelstandspreis für das Recycling – „Die Grünen Engel 2016“. [13]

Weiterhin wurde die Fa. Feess mit dem „Deutschen Umweltpreis 2016“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für ihr Engagement im Bereich der Wiederverwendung mineralischer Bauschuttabfälle ausgezeichnet.

Für das Projekt wurden verschiedene Sammelproben und Einzelchargen aus dem laufenden Betrieb des Recyclingparks Rabailen in Kirchheim/Teck entnommen. Dabei handelt es sich um Typ 2-Körnungen in folgenden Fraktionen:

- RC-Splitt 4/16, Typ 2
- RC-Splitt 2/16, Typ 2
- RC-Brechsand 0/2 aus Absiebung RC-Splitt Typ 2

GWV - Gesellschaft für Wertstoff-Verwertung mbH

Die Gesellschaft für Wertstoff-Verwertung mbH, kurz GWV genannt, gehört zu den Allroundern unter den Entsorgern im mittleren Neckarraum. Die Palette der Recyclingaktivitäten ist groß: sie reicht von der Bauschuttverwertung über die Kompostierung bis hin zur Herstellung von Hackschnitzel für Biomassekraftwerke. Seit Gründung der GWV im Jahr 1990 befindet sich der Stammsitz in Remseck am Neckar.

Die Fa. GWV hat folgende Einzelproben für Untersuchungen zur Verfügung gestellt:

- RC-Splitt 2/16, Typ 2
- RC-Brechsand 0/2 aus Absiebung RC-Splitt Typ 2

Scherer & Kohl GmbH & Co. KG

Die Fa. Scherer & Kohl wurde 1960 als Fuhrunternehmen in Ludwigshafen gegründet. Ab 1964 wurden Abbrucharbeiten ausgeführt. Im Bereich des Recyclings von Bauprodukten gilt die Fa. Scherer & Kohl als Vorreiter. 1980 wurde das Recyclingwerk I in Mannheim/Handelshafen in Betrieb genommen und die Produktbezeichnung RECYLIT® für RC-Gemische für den Straßen-Tiefbau sowie Wege- und

⁶ QRB: Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V.

Landschaftsbau eingeführt. Seit 2008 ist Scherer & Kohl eine 100 %-ige Tochter der Unternehmensgruppe Jakob Becker GmbH & Co. KG. 2014 wurde die Fa. durch den Zukauf der Eneotech Umwelt GmbH erweitert.

Die Fa. Scherer & Kohl hat folgende Proben für Untersuchungen zur Verfügung gestellt:

- RC-Splitt 2/8 Typ 2
- RC-Splitt 8/16 Typ 2

5.2. Zulassungen

Folgende der im Projekt untersuchten rezyklierten Gesteinskörnungen des Typs 2 besitzen aktuell eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt:

Tab. 5: Übersicht über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen der RC-Gesteinskörnungen

Anbieter	Produktbezeichnung	Zulassung des DIBt
Feess	Betonrecycling Splitt 2/16	Z-3.43-2079 vom 28.01.2015
Scherer & Kohl	Recycling-Splitt 2/8 Typ 2	Z-3.43-2119 vom 26.04.2016
	Recycling-Splitt 8/16 Typ 2	Z-3.43-2119 vom 26.04.2016

Der RC-Splitt der Fa. GWV wird nicht am Markt angeboten. Die Produktion von RC-Gesteinskörnung des Typs 2 wird derzeit nicht weiterverfolgt.

Für die zugelassenen Produkte erfolgt eine regelmäßige Fremdüberwachung. Die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 2 werden dabei stets erfüllt. Darüber hinausgehend wurden im Projekt weitere Untersuchungen an den RC-Körnungen durchgeführt, um deren Einfluss im R-Beton detaillierter erfassen zu können.

5.3. Korngrößenanalysen

Drei Bauschutt-Recyclinghersteller (Fa. Feess, Fa. GWV und Fa. Scherer & Kohl) stellten Proben der RC-Gesteinskörnung Typ 2 in den Fraktionen 2/16 mm bzw. 2/8 mm und 8/16 für Untersuchungen zur Verfügung.

Die Bestimmung der Korngrößenverteilung erfolgte nach DIN EN 933-1 [27]. Zuvor wurde jeweils der Wassergehalt nach DIN EN 1097-5 [28] ermittelt. Vor der Trockensiebung erfolgte ein Auswaschen der Feinanteile mittels eines 63 µm Siebs. Die Korngrößenanalysen der größeren Bestandteile der RC Gesteinskörnungen wurden als Trockensiebungen ausgeführt.

In Abb. 21 wurden die ermittelten Korngrößenverteilungen den Regelsieblinien für ein Korngemisch 0/16 mm nach DIN EN 1045-2 [20] gegenübergestellt.

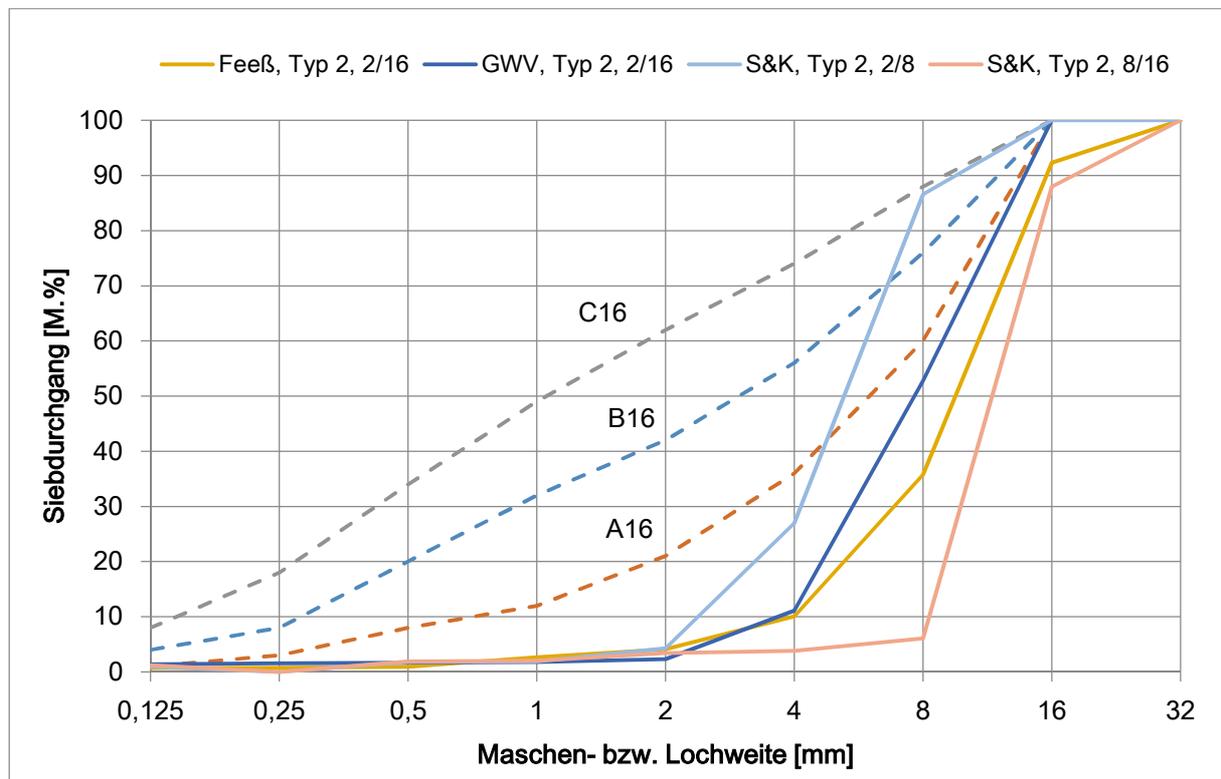


Abb. 21: Korngrößenverteilungen der untersuchten Typ 2 Gesteinskörnungen

Die Sieblinie der RC-Gesteinskörnung der Fa. Feess stellt einen Mittelwert auf Grundlage von 14 Korngrößenanalysen aus der Eigenüberwachung der Fa. Holcim von 6 innerhalb des Projekts durchgeführten Analysen dar. Die Schwankungsbreite der Ergebnisse ist der Abb. 22 zu entnehmen, in welcher alle Einzelanalysen dargestellt sind. Der Mittelwert der GWV 2/16 Gesteinskörnung wurde aus 2 Einzelanalysen bestimmt. Die Fa. Scherer & Kohl hat 2 Fraktionen 2/8 und 8/16 zur Verfügung gestellt, an welchen jeweils eine Einzelanalyse vorgenommen wurde.

Die Regelsieblinien A und B begrenzen den in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und die technischen Eigenschaften günstigen Bereich, die Regelsieblinien B und C den brauchbaren Bereich. Die RC-Gesteinskörnungen Feess 2/16, GWV 2/16 und S&K 8/16 liegen unterhalb der A16 Regelsieblinie. Die RC-Gesteinskörnung S&K 2/8 weist höhere Feinkornanteile auf. In der praktischen Anwendung werden diese RC-Gesteinskörnungen mit natürlichen Quarzsanden (z.B. Fraktionen 0/2, 2/8 mm) vermischt (siehe Kapitel 6.1), wodurch eine Anpassung an die Regelsieblinien erfolgt. Das heißt in den R-Betonen werden durch Mischen von Sanden und RC-Körnungen > 2 mm mit Regelsieblinien AB vergleichbare Sieblinien wie für herkömmlich Betone eingestellt.

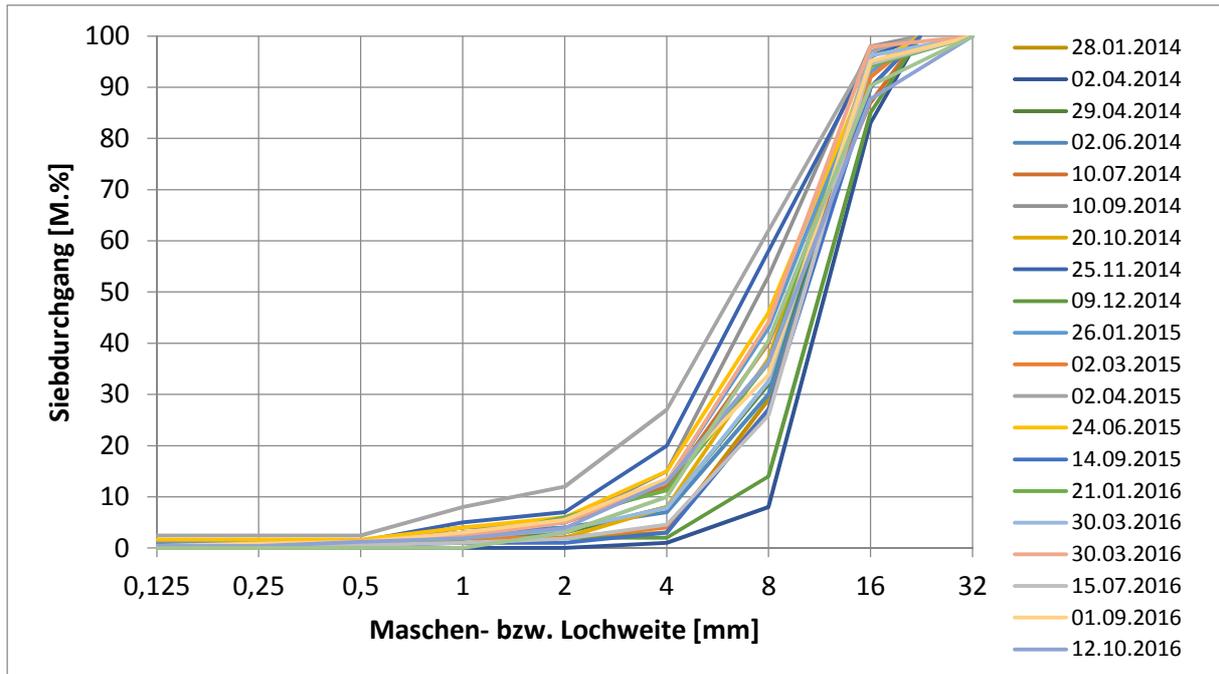


Abb. 22: Vergleich der Sieblinien der RC-Gesteinskörnung 2/16 der Fa. Feess über 2,5 Jahre

Wie aus Abb. 22 hervorgeht, sind die Schwankungen der RC-Gesteinskörnung 2/16 der Fa. Feess bei 20 Einzelmessungen gering.

Im Vergleich der zwei untersuchten RC-Gesteinskörnungsfractionen 2/16 weist der Feess 2/16 gegenüber GWV 2/16 eine gröbere Zusammensetzung auf, wobei die Unterschiede gering sind. Deutlicher werden die Unterschiede durch den mittleren Korndurchmesser (Abb. 23 bis 26).

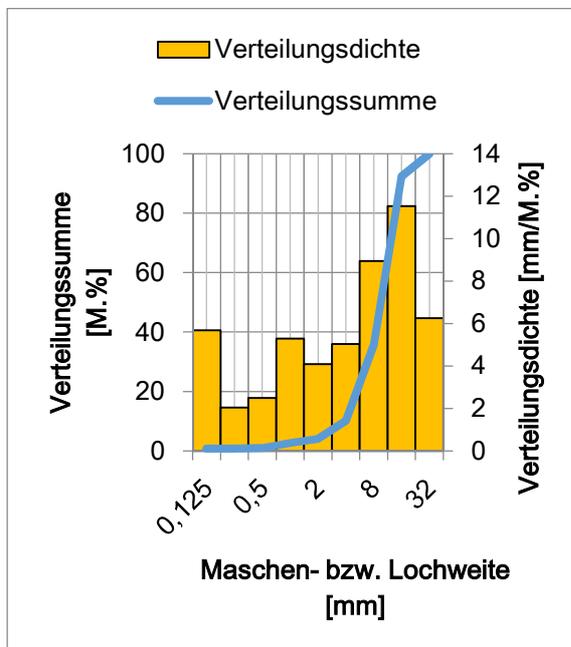


Abb. 23: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, Feess Typ 2, 2/16, mittlerer Korndurchmesser = 10,4 mm

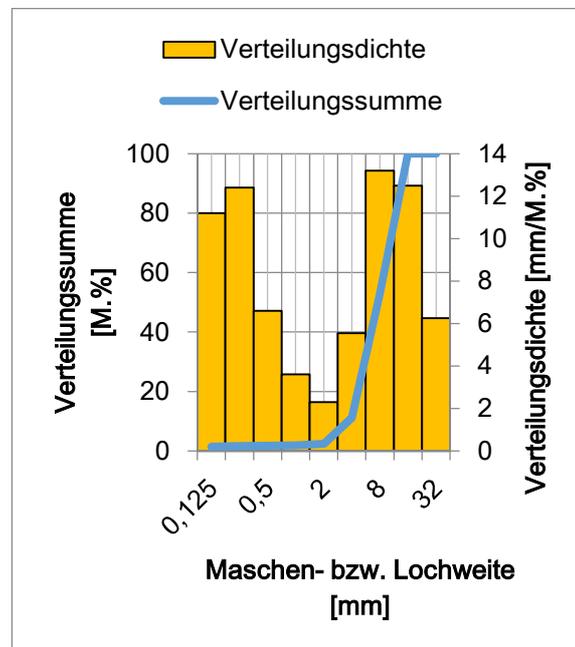


Abb. 24: Verteilungsdichte und Verteilungssumme, GWV Typ 2, 2/16, mittlerer Korndurchmesser = 8,4 mm

Bezogen auf die untersuchten Fraktionen ergibt sich folgendes:

Tab. 6: Zuordnung der Fraktionen zum Geltungsbereich der Kategorien nach DIN EN 12620 [16]

Fraktion	D/d	D
2/16 mm	16/2 = 8	16
2/8 mm	8/2 = 4	8
8/16 mm	16/8 = 2	16

Damit treffen die Kriterien für Kategorie G_C 80/20 lediglich für die Fraktionen 2/8 (D < 11,2 mm) und 8/16 (D/d = 2) zu. Für die Fraktion 2/16 muss abweichend die Kategorie G_C 90/15 (D/d > 2 und D > 11,2 mm) angewendet werden. Für Korngemische wird in [13] die Kategorie G_A 85 angegeben, welche für D ≤ 45 und d = 0 anwendbar ist. Da alle untersuchten Proben ein d > 0 aufweisen, ist diese Kategorie zur Einordnung der untersuchten Proben nicht anwendbar.

Die Ergebnisse der Korngrößenanalysen wurden in den Tabellen 9 bis 11 den Anforderungen gegenübergestellt.

Tab. 7: Anforderungen an die granulometrische Kornzusammensetzung von Typ 2 Gesteinskörnungen nach der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13]

Eigenschaft	Anforderung an Typ 2 Gesteinskörnung (Kategorie)
Kornzusammensetzung, grobe Gesteinskörnung mit D/d ≤ 2 oder D ≤ 11,2	G _C 80/20
Kornzusammensetzung, grobe Gesteinskörnung mit D/d > 2 und D > 11,2	G _C 90/15 ¹
Kornzusammensetzung, Korngemische	G _A 85

¹ diese Kategorie findet sich nicht in der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] wieder, ist jedoch die für die Fraktion 2/16 einzig zutreffende

Tab. 8: Genaue Beschreibung der Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620

Kategorie	Korngröße	Durchgang in [M.%]				
		2 D	1,4 D	D	d	d/2
G _C 80/20	D ≤ 11,2 mm	100	98 bis 100	80 bis 99	0 bis 20	0 bis 5
G _C 90/15 ¹	D/d > 2 und D > 11,2	100	98 bis 100	90 bis 99	0 bis 15	0 bis 5
G _A 85	D ≤ 45 mm und d = 0	100	98 bis 100	85 bis 99	–	–

¹ diese Kategorie findet sich nicht in der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] wieder, ist jedoch die für die Fraktion 2/16 einzig zutreffende

Tab. 9: Vergleich der Ergebnisse von S&K 2/8 mit den Anforderungen nach Kategorie G_C 80/20

Korngröße		Anforderung G _C 80/20	Mittelwert S&K 2/8
		Durchgang [M.%]	Durchgang [M.%]
2 D	16,0 mm	100	100
1,4 D	11,2 mm	98 bis 100	– *
D	8,0 mm	80 bis 99	86,6
d	2,0 mm	0 bis 20	4,3
d/2	1,0 mm	0 bis 5	1,9

* 11,2 mm Sieb wurde nicht genutzt

→ alle Anforderungen wurden erfüllt

Tab. 10: Vergleich der Ergebnisse von S&K 8/16 mit den Anforderungen nach Kategorie G_c 80/20

Korngröße		Anforderung G _c 80/20	Mittelwert S&K 8/16
		Durchgang [M.%]	Durchgang [M.%]
2 D	32,0 mm	100	100
1,4 D	22,4 mm	98 bis 100	– *
D	16,0 mm	80 bis 99	88,0
d	8,0 mm	0 bis 20	6,1
d/2	4,0 mm	0 bis 5	3,8

* 22,4 mm Sieb wurde nicht genutzt

→ alle Anforderungen wurden erfüllt

Tab. 11: Vergleich der Ergebnisse von Feess 2/16 und GWV 2/16 mit den Anforderungen nach Kategorie G_c 90/15

Korngröße		Anforderung G _c 90/15	Mittelwert Feess 2/16	Mittelwert GWV 2/16
		Durchgang [M.%]	Durchgang [M.%]	Durchgang [M.%]
2 D	32,0 mm	100	100	100
1,4 D	22,4 mm	98 bis 100	100	100
D	16,0 mm	90 bis 99	92,3	100
d	2,0 mm	0 bis 15	4,1	2,3
d/2	1,0 mm	0 bis 5	2,7	1,8

→ alle Anforderungen wurden erfüllt

Abschließend kann festgestellt werden, dass die 3 untersuchten RC-Gesteinskörnungen vergleichbare Korngrößenverteilungen aufweisen (siehe Abb. 21). In Bezug auf die granulometrische Zusammensetzung der Gesteinskörnungen ermöglicht dies den Betonherstellern nach der Erstellung der Betonrezepturen gleichbleibende Qualitäten zu gewährleisten.

Die Anforderungen an die granulometrische Zusammensetzung von Typ 2 Gesteinskörnungen nach DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] und der DIN EN 12620 [16] wurden von allen untersuchten Proben erfüllt.

Feuchtegehalt im Anlieferungszustand

Bei der Herstellung von Betonmischungen, z.B. in einem Transportbetonwerk oder Betonfertigteilwerk, werden aus unterschiedlichen Silos oder Lagerboxen die verschiedenen Gesteinskörnungen (Sand, Kies, Splitt, RC-Material) nach vorgegebener Berechnung in einem Mischer zusammengefügt. Dabei kann durch Sensoren der Feuchtegehalt der unterschiedlichen Gesteinskörnungen detektiert und bei der anschließenden Wasserzugabe berücksichtigt und ausgeglichen werden.

Die RC-Gesteinskörnung 2/16 der Fa. Feess wies Feuchtegehalte von 4,3 - 7,8 M.% auf (siehe Anhang Abb. 164). Diese relativ geringe Schwankungsbreite kann durch den Betonmischmeister bzw. die prozessgesteuerte Dosiereinrichtung bei der Wasserzugabe ausgeglichen werden. Die Abnahme des Wassergehaltes ist witterungsbedingt zu bewerten und kann sich entsprechend den täglichen Klimabedingungen ändern.

Bei Transportbeton ist dieser Feuchtegehalt der Typ 2 Körnungen förderlich, da es den Wasseranspruch und die Fließmittelmenge reduziert. Bei der Betonfertigteilherstellung könnte ein erhöhter Feuchtegehalt störend sein, wenn geschlossene Silos genutzt werden, da es zu Agglomerationen kommen kann.

5.4. Art der Bestandteile in den Kornfraktionen

Die Bestimmung der Bestandteile der Kornfraktionen erfolgte nach DIN EN 933-11 [29]. Dabei wurden die Bestandteile der einzelnen Fraktionen 2/16 und 4/16 der Fa. Feess nach einer Trockensiebung per Sichtprüfung und manueller Sortierung ermittelt. Die stoffliche Einteilung erfolgte in Mauerwerk (Ziegel, Porenbeton), Beton (Beton, Mörtel), natürliche Gesteinskörnung (Kies), Holz, Glas und bitumenhaltige Materialien.

In den Tabellen 12 und 13 werden Untersuchungsergebnisse den Anforderungen gemäß DAFStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] und der DIN EN 12620 [16] gegenübergestellt.

Tab. 12: Ergebnisse und Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen, Feess, 2/16

Korngröße	Anteile in [M.%]						
	Mauerwerk ¹	Beton ²	natürliche GK ³	Holz ⁴	Glas	bitumenhaltige Materialien	Rest, unsortiert
	Rb	Rc	Ru	X	Rg	Ra	
16 - 31,5 mm	0,82	2,57	2,42	–	–	–	–
8 - 16 mm	5,70	21,28	30,84	–	–	0,23	0,01
4 - 8 mm	3,47	9,77	11,47	0,01	0,03	0,11	0,01
2 - 4 mm	0,94	2,28	2,05	–	0,01	0,01	–
0 - 2 mm	–	–	–	–	–	–	5,97
Summe		35,90	46,78	0,01	0,04		
Zusammenfassung	10,93	82,68		0,05		0,35	5,99
Anforderung	≤ 30	≥ 70		≤ 2		≤ 1	–
Anforderung eingehalten	ja	ja	ja	ja	ja	ja	–

Tab. 13: Ergebnisse und Anforderungen an Typ 2 Gesteinskörnungen, Feess, 4/16

Korngröße	Anteile in [M.%]				
	Mauerwerk ¹	Beton ²	natürliche GK ³	Holz ⁴ / Glas / schwimmendes Material	Rest, unsortiert
	Rb	Rc	Ru	X / Rg / FL	
16 - 31,5 mm	0,61	4,48	4,91	–	–
8 - 16 mm	7,00	27,01	17,24	0,16	–
4 - 8 mm	5,70	16,22	9,44	0,03	–
2 - 4 mm	1,30	2,92	1,36	0,01	–
0 - 2,0 mm	–	–	–	–	1,62
Summe		50,63	32,94	0,20	
Zusammenfassung	14,61	83,57		0,20	1,62
Anforderung	≤ 30	≥ 70		≤ 2	–
Anforderung eingehalten	ja	ja	ja	ja	–

Die Bezeichnung der Art der Bestandteile in Tab. 12 und Tab. 13 entspricht der Kategorisierung nach DAFStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13]

¹ Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton

² Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton

³ ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung

⁴ sonstige Materialien: bindige Materialien (d.h. Ton und Boden), verschiedene sonstige Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips
 Die Chargen 2/16 und 4/16 wurden aus dem laufenden Betrieb entnommen. Wie der Vergleich der Ergebnisse der Einzelproben mit dem Mittelwert aus dem Jahr 2014 (Tab. 14) zeigt, ist die Schwankung der stofflichen Zusammensetzung gering.

Tab. 14: Vergleich der Probenzusammensetzung mit Soll-Werten sowie dem Mittelwert mehrerer 2014 entnommener Proben [30]

Bestandteile		Anforderung	Mittelwert	Projektergebnis,	Projektergebnis,
			2014, RC-Splitt	RC-Splitt 2/16	RC-Splitt 4/16
		[M.%]	[M.%]	[M.%]	[M.%]
Mauerwerk	Rb	≤ 30	15,5	10,9	14,6
Beton/Kies	Rc + Ru	≥ 70	83,6	82,7	83,6
Bitumen	Ra	≤ 1	0,7	0,4	–
Holz/Glas	X + Rg	≤ 2	0,2	0,1	0,2
Schwimmendes Material	FL	≤ 2	–	–	–

Aus den Tabellen 12 und 13 geht hervor, dass alle Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach [13] und [16] eingehalten wurden. Der geringe Anteil an Störstoffen ist auf eine hochwertige Aufbereitung zurückzuführen.

Es kann geschlussfolgert werden, dass der Anteil an Mauerwerk noch deutlich unterhalb des Grenzwertes von 30 % liegt. Damit besteht Potential noch weitere Anteile des Beton/Kies-Anteils gegen Mauerwerkbruch auszutauschen.



Abb. 29: Fraktionierung und stoffliche Sortierung einer RC-Gesteinskörnung

5.5. Wasseraufnahme und Rohdichte

Wasseraufnahme

Die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten wurde in Anlehnung an die DAFStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] durchgeführt. Dabei wurden folgende Proben berücksichtigt.

Tab. 15: Beschreibung der Proben

Probe Nr. 1 + 2:	GWV RC-Betonsplitt 2/16 Typ 2 vom 11.3.2016
Probe Nr. 3 + 4:	Scherer & Kohl RC-Betonsplitt 2/8 Typ 2 vom 3.5.2016
Probe Nr. 5 + 6:	Scherer & Kohl RC-Betonsplitt 8/16 Typ 2 vom 3.5.2016
Probe Nr. 7 + 8:	Feess RC-Betonsplitt 2/16 Typ 2 vom 21.1.2016

Die Mittelwerte der Untersuchungsergebnisse sind in Abb. 30 dem Grenzwert für RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 nach [13] gegenübergestellt worden.

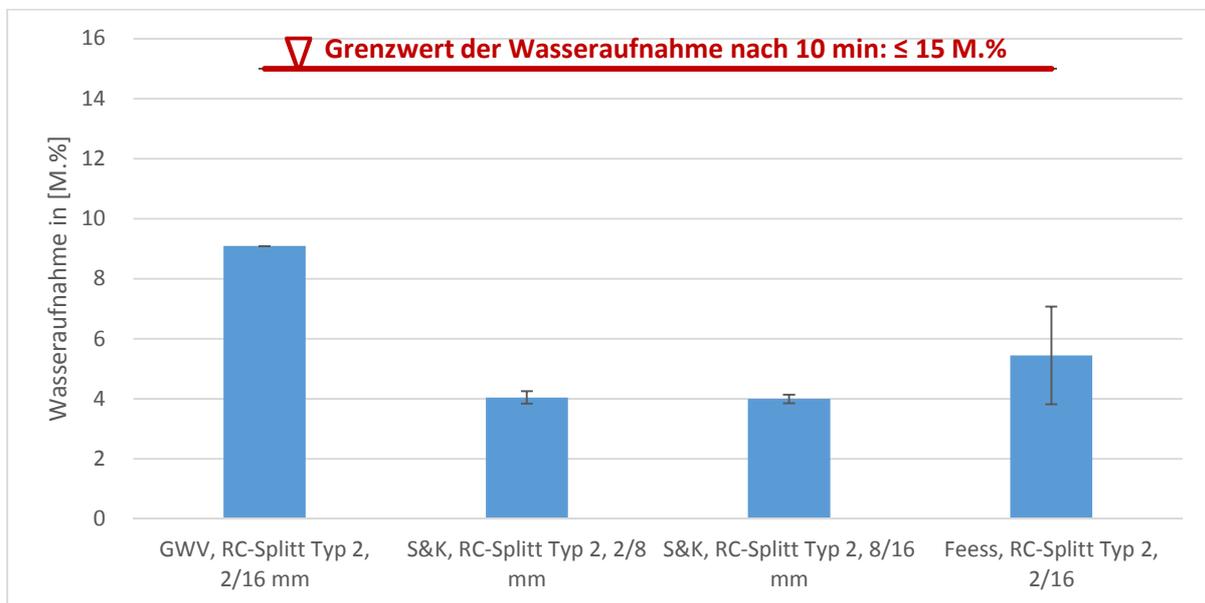


Abb. 30: Wasseraufnahme nach 10 Minuten

In Abb. 31 wurden die Wasseraufnahme der Feess 4/16 RC-Gesteinskörnung des Typs 2 in Abhängigkeit der Bestandteile und Korngrößen dargestellt. Zur Untersuchung des Einflusses der unterschiedlich saugfähigen Stoffe wurden die Bestandteile des Mauerwerks noch weiter unterteilt in natürliche Gesteinskörnung (Kies), Beton, Ziegel, Mörtel und Porenbeton.

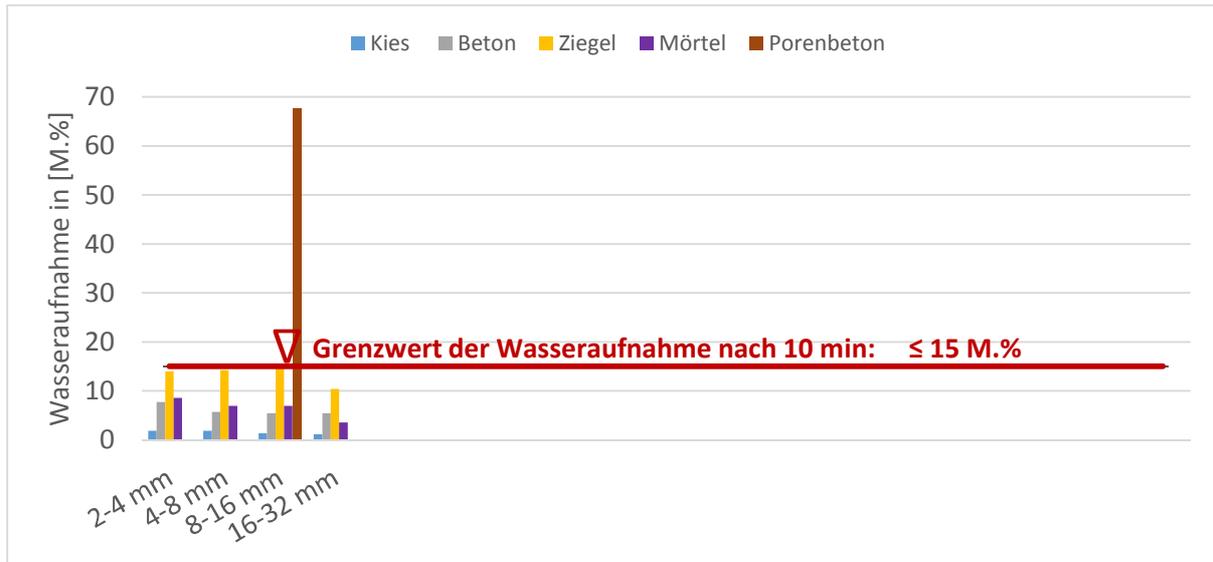


Abb. 31: Wasseraufnahme der Feess 4/16 RC-Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Bestandteile und Korngröße

Der Porenbetonanteil ist im Vergleich zum Ziegelanteil sehr gering. Er liegt unter 1 M.%, d.h. die hohe Wasseraufnahme hat in dem Fall keine Auswirkung auf das Gemisch (siehe Abb. 30).

Die max. Wasseraufnahme von 15 % wird von allen untersuchten Proben unterschritten. Auch wenn der Anteil an Mauerwerkbruch bis zum Grenzwert von 30 % erhöht würde, kann bei der vorliegenden Qualität der Körnung der Grenzwert der Wasseraufnahme eingehalten werden.

Rohdichte

Die Rohdichte der RC-Gesteinskörnungen wurde in Anlehnung an die DIN EN 1097-6 [31] bestimmt. Die Volumenermittlung erfolgte mittels Geo-Pyc Messgeräts. In einer ersten Messreihe wurden die sortierten Anteile aus Mauerwerkbruch untersucht. In Abb. 32 wurden die Ergebnisse dem Grenzwert nach [13] gegenübergestellt.

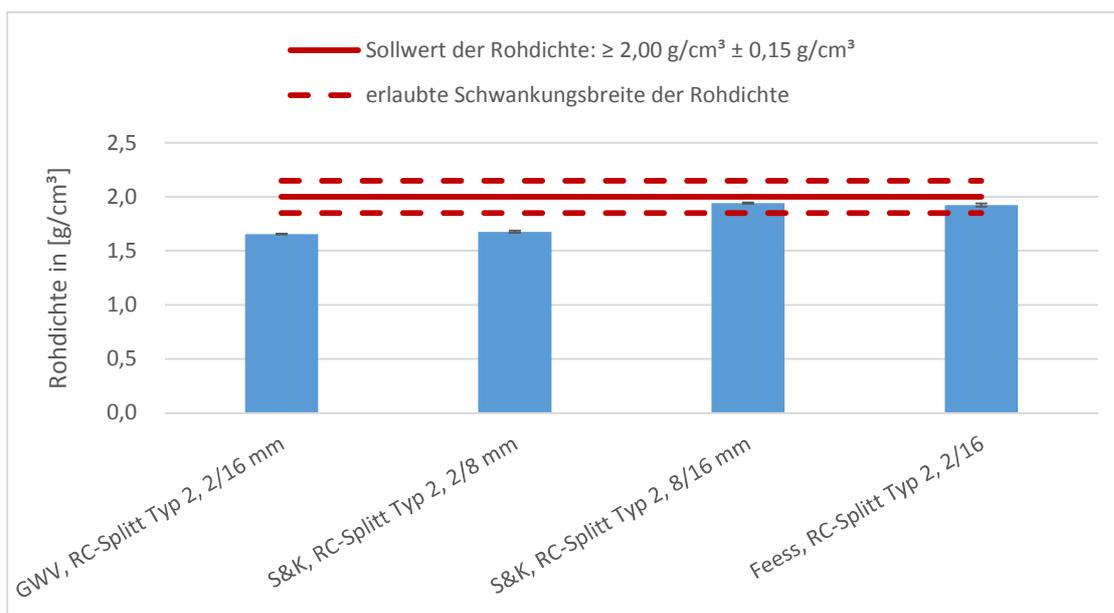


Abb. 32: Ergebnisse der Rohdichtebestimmung der Mauerwerksanteile der RC-Gesteinskörnungen

In einer zweiten Messreihe wurde die Rohdichte der einzelnen Bestandteile und Fraktionen sowie der Gesamtprobe der Feess RC-Gesteinskörnung 2/16 bestimmt. Die Ergebnisse wurden in Tab. 16 zusammengefasst.

Tab. 16: Ergebnisse Rohdichte Feess 2/16, Messreihe 2

Fraktion [mm]	Rohdichten der RC-GK-Bestandteile [g/cm ³]				
	Beton	Kies	Mörtel	Mauerziegel	Mörtelsand
1/2	-	-	-	-	1,881
2/4	2,253	2,555	2,134	1,915	1,992
4/8	2,319	2,612	2,109	1,909	-
8/16	2,295	2,612	2,115	1,941	-
16/32	2,303	2,646	2,186	1,895	-
2/16 (Gesamt- körnung)	2,320				

Die Rohdichte von RC-Gesteinskörnungen muss gemäß der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] $> 2 \text{ g/cm}^3$ betragen. Die Rohdichte der Ziegel in den Feess-Körnungen ist verglichen mit modernen Ziegeln hoch, was auf höher gebrannte Ziegel (Klinker, Vormauerziegel) schließen lässt. Obwohl die Ziegelrohddichte $< 2 \text{ g/cm}^3$ beträgt, hält die Typ 2 Körnung mit den Beton/Kies-Anteilen, den Sollwert deutlich ein. Das wäre auch noch gegeben, wenn der Mauerwerkbruchanteil auf den max. Wert von 30 % erhöht wird.

5.6. Sulfatgehalte

Da die Sulfat- und Chloridgehalte zu den Hemmnissen bzw. Kritikpunkten der Typ 2-Körnung zählen, wurden die Körnungen aller Hersteller untersucht und auch die bisher nicht für Beton genutzten RC-Sande einbezogen.

Die Ablehnung beruht auf der Annahme, dass durch zu hohe Sulfatgehalte ggf. durch Reaktionen mit dem Zementstein treibfähige Minerale (z.B. Ettringit, Thaumasit) gebildet werden könnten. Im Fall erhöhten Chloridgehalts könnte die Bewehrung im Stahlbeton angegriffen werden.

Deshalb wurden auch die wasserlöslichen Gehalte erfasst, die in DIN 4226-100 [21] geregelt sind.

Die größte Anzahl an basischen Sulfaten ist wasserlöslich. Einige Sulfate wie $BaSO_4$, $SrSO_4$, $PbSO_4$ und anteilig $CaSO_4$ können nur durch einen Säureaufschluss nachgewiesen werden. [32]

Es wurden die Typ 2 - Splitte (> 2 mm), welche für die Betonherstellung eingesetzt werden, und zusätzlich die Sande < 2 mm untersucht, da sich die Sulfate und Chloride erfahrungsgemäß dort „anreichern“.

5.6.1. Säurelösliche Sulfatgehalte

Der säurelösliche Sulfatgehalt wurde entsprechend der Arbeitsvorschrift nach Hach/Lange mittels Salpetersäureaufschluss bestimmt. Folgende Proben wurden in den Versuchsreihen berücksichtigt:

Tab. 17: Übersicht der untersuchten Proben

Nr.	Hersteller	Bezeichnung	Fraktion
1	GWV	RC-Splitt	2/16 mm
2	Scherer & Kohl	RC-Splitt	2/8 mm
3	Scherer & Kohl	RC-Splitt	8/16 mm
4	Feess	RC-Splitt	2/16 mm
5	GWV	RC-Brechsand	0/2 mm
6	Feess	RC-Brechsand	0/2 mm

In der ersten Versuchsreihe wurden die Proben 1 bis 6 über den gesamten Korngrößenbereich untersucht. In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Proben 1 bis 4 zunächst mittels Trockensiebung in Fraktionen geteilt und anschließend Korngrößenabhängig analysiert.

In den Abb. 33 und 34 wurden die Ergebnisse des säurelöslichen Sulfatgehalts den Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] gegenübergestellt.

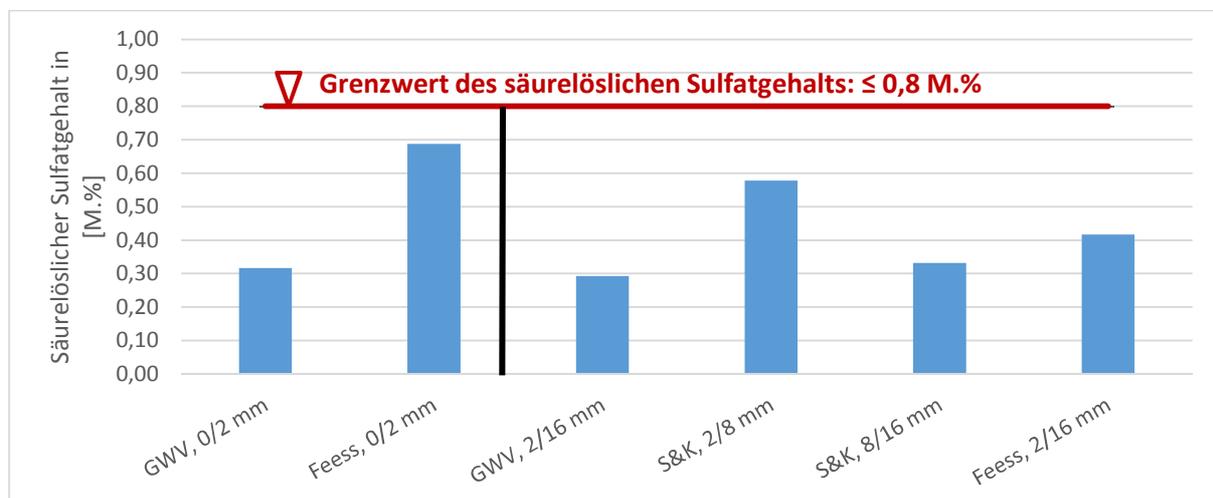


Abb. 33: Ergebnisse zum säurelöslichen Sulfatgehalt

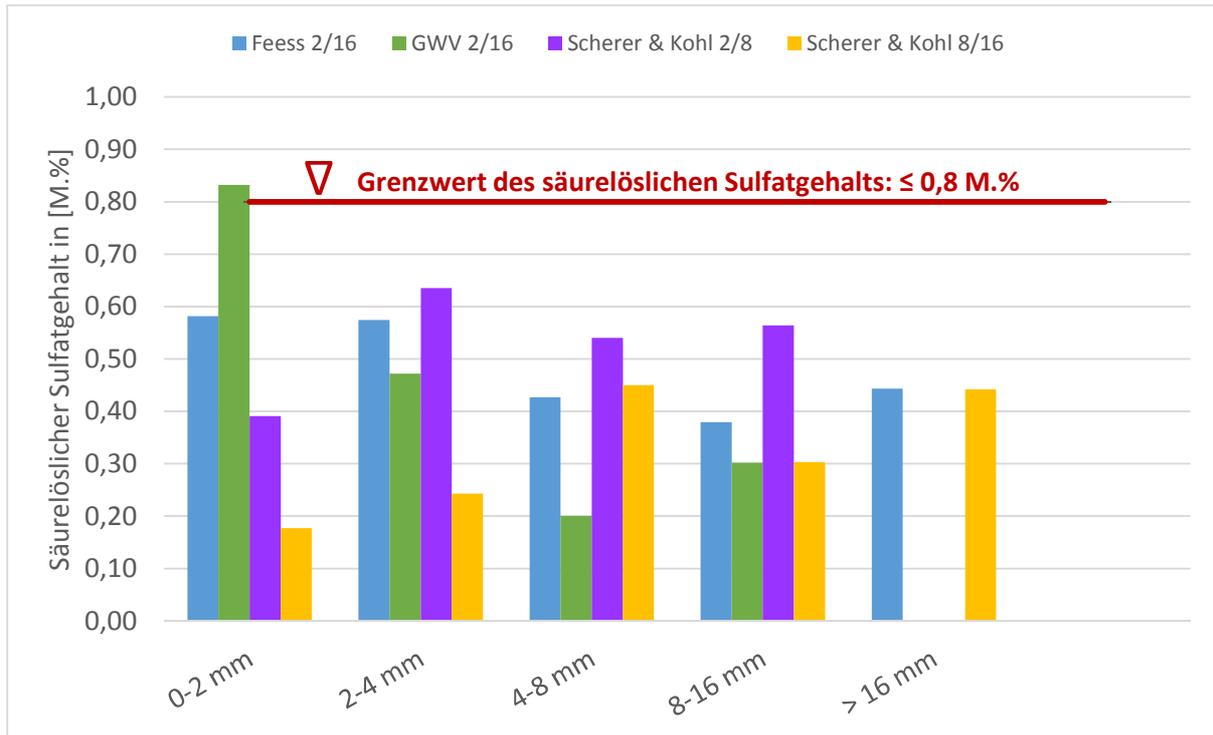


Abb. 34: Ergebnisse des säurelöslichen Sulfatgehalts in Abhängigkeit der Korngröße

Der Grenzwert für den säurelöslichen Sulfatgehalt wird von allen Proben deutlich unterschritten. Selbst die nicht zugelassenen RC-Brechsandfraktionen 0/2 halten den Grenzwert deutlich ein (Abb. 33).

Die Fraktion 0-2 mm in Abb. 34 stellt den Unterkornanteil der Gesamtkörnung 2/16 dar, welche im Mittel 4,0 M.% (Feess), 2,3 M.% (GWV), 4,3 M.% (S&K 2/8) bzw. 3,4 M.% (S&K 8/16) betrug.

Einzig der Unterkornanteil der GWV RC-Körnung zeigte einen säurelöslichen Sulfatgehalt von 0,83 M.%, der Grenzwert in der Gesamtprobe wird jedoch eingehalten (siehe Abb. 33). An dieser Stelle wird nochmal darauf hingewiesen, dass die GWV-Körnung aktuell nicht für R-Beton eingesetzt wird und rein aus Vergleichsgründen mit in das Versuchsprogramm aufgenommen wurde.

5.6.2. Wasserlösliche Sulfat- und Chloridgehalte

Die wasserlöslichen Sulfat- und Chloridgehalte wurden mittels Ionenaustauschchromatographie ermittelt. In [13] werden keine Grenzwerte dazu angegeben. In DIN 4226-100 [21] wurden die Grenzwerte für Sulfat auf 600 mg/l und für Chlorid auf 150 mg/l festgelegt. In den Abbildungen 35 und 36 werden die Messwerte den Grenzwerten gegenübergestellt.

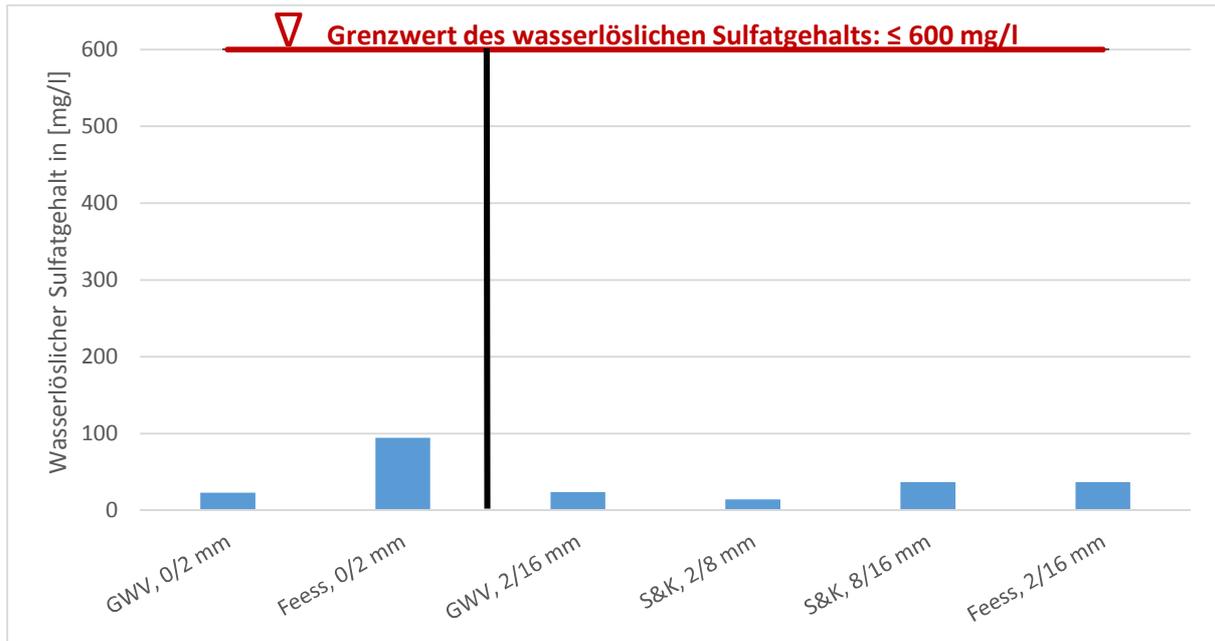


Abb. 35: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt

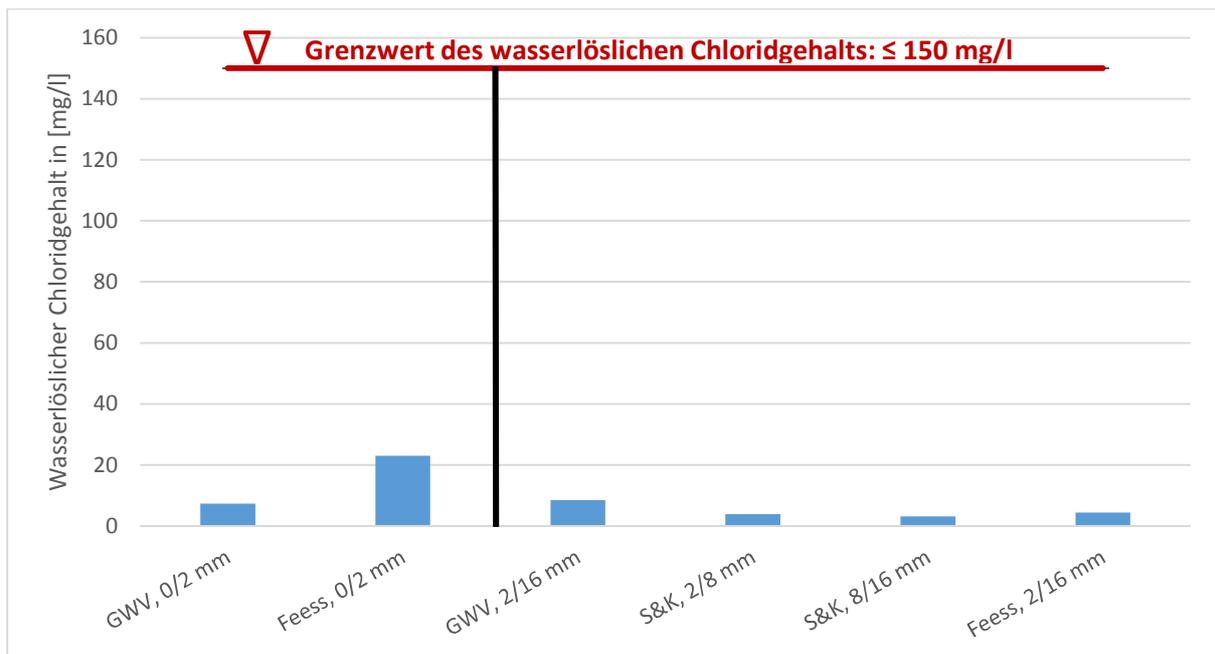


Abb. 36: Ergebnisse zum wasserlöslichen Chloridgehalt

Aus den Abbildungen 35 und 36 wird deutlich, dass die Grenzwerte des wasserlöslichen Sulfat- und Chloridgehalts entsprechend DIN 4226-100 [21] sehr deutlich unterschritten werden.

In DIN EN 12620 [16] werden die Kategorien $SS_{0,2}$ (wasserlöslicher Sulfatgehalt $\leq 0,2$ M.%) und SS_{NR} (keine Anforderungen) für den wasserlöslichen Sulfatgehalt definiert. In den Abb. 37 und 38 wurden die Ergebnisse der wasserlöslichen Sulfatgehalte der Kategorie $SS_{0,2}$ gegenübergestellt. Dazu muss erwähnt werden, dass dies keine Anforderung an Gesteinskörnungen darstellt, sondern ausschließlich zum Vergleich dient.

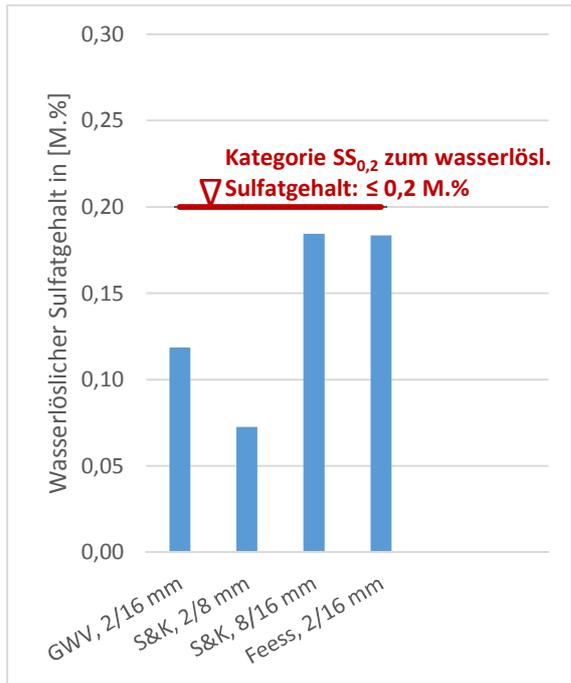


Abb. 37: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt

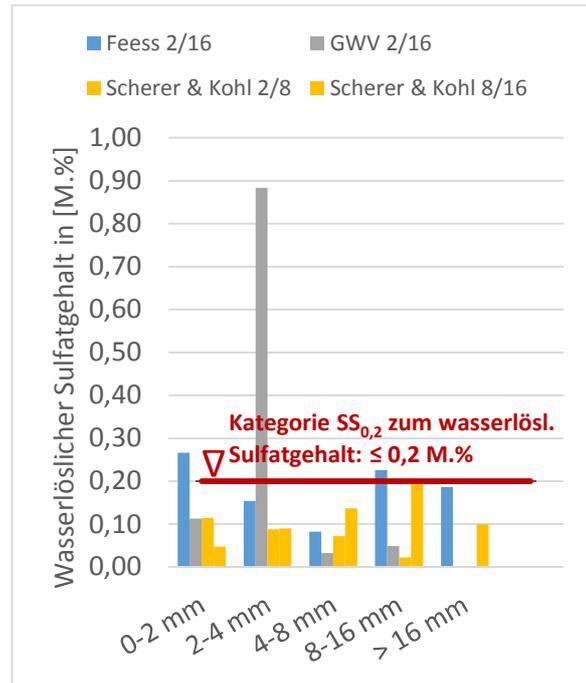


Abb. 38: Ergebnisse zum wasserlöslichen Sulfatgehalt in Abhängigkeit der Korngröße

Im Vergleich mit der Kategorie $SS_{0,2}$ nach DIN EN 12620 [16] zeigt sich, dass alle Proben den Grenzwert des Gemischs dieser Kategorie einhalten (Abb. 37). In Abhängigkeit der Korngröße zeigt sich, dass einzelne Korngruppen in den feinen Fraktionen über 0,2 M.% wasserlösliche Sulfate enthalten (Abb. 38).

5.6.3. Schnelltest für wasserlösliche Sulfate

Damit die Praktiker in den Recycling-Unternehmen auch vor Ort die Größenordnung des Sulfatgehaltes in dem Haufwerk des gebrochenen Mauerwerkbruchs abschätzen können, wurde ein Schnelltest mit Stäbchen auf seine prinzipielle Eignung geprüft. Dieser wird auch als Vor-Ort-Methode bei der Prüfung von betonangreifendem Wasser oder der Schadsalzbelastung im Mauerwerk eingesetzt. Dazu werden 10 g (ungefähr ein gestrichener Esslöffel, siehe Abb. 39) der RC-Typ 2-Körnungen mit jeweils 100 ml destilliertem Wasser gemischt, von Hand 1 min geschüttelt und für 5 min ruhen gelassen, so dass sich die Feststoffe absetzen können (siehe Abb. 40), ggf. könnte man die Feststoffe mithilfe eines Siebs abtrennen. Abschließend wird in der zum Teil geklärten Suspension mittels Teststäbchen der Sulfatgehalt halbquantitativ abgeschätzt.

Bestimmungsmethode

Die vier Testzonen auf den Stäbchen enthalten unterschiedliche Mengen des roten Thorin-Barium-Komplexes. Bei Anwesenheit der entsprechenden Menge Sulfationen erfolgt ein Umschlag in das gelbe Thorin. Der Farbumschlag muss mit den 4 Farbvorlagen auf dem Behälter der Stäbchen verglichen werden, um die Sulfationenkonzentration halb-quantitativ einzuschätzen (siehe Abb. 41). Dazu werden die Teststäbchen 1 s so in die zu prüfende Lösung eingetaucht, dass alle vier Reaktionszonen voll benetzt werden. Überschüssige Flüssigkeit wird abgeschüttelt und die Färbung nach 2 min beurteilt.



Abb. 39: 10 g Probe



Abb. 40: Die nach 5 min geklärte Suspension



Abb. 41: Sulfat-Schnelltest mit Stäbchen

In Tab. 18 sind die Ergebnisse des Schnelltests der RC-Typ 2-Körnung der Fa. Feess den mittels Ionenchromatographie erfassten quantitativen Werten gegenüber gestellt. Auch wenn der Schnelltest nur die Abschätzung in den Bereichen < 200 mg/l bis > 1600 mg/l zulässt, ist die Einordnung in die Bereiche korrekt. Dabei wurde weiterhin geprüft, welchen Einfluss die Dauer des Schüttelns und damit des Kontakts mit Wasser auf das Messergebnis hat. Dazu wurden einzelne Versuche sowohl mit 1 min Schütteldauer per Hand und 1 h Schütteldauer mittels Rollengerät gegenübergestellt. Ein Beispiel zeigt exemplarisch Tab. 18.

Tab. 18: Sulfatgehalt gleicher Proben, unterschiedlich aufbereitet

Analysemethode	Handgeschüttelt	Schüttelapparat
	1 Minute [mg/l]	1 Stunde [mg/l]
Sulfat-Schnelltest mit Stäbchen	< 200 mg/L	< 200 mg/L
Ionenchromatographische Analyse	66,9 mg/L	99,7 mg/L

In einer weiteren Analyse (Tab. 19) wurden fraktionierte RC-Brechsandproben der Fa. Feess untersucht. Die etwas erhöhten Gehalte in den Fraktionen < 2 mm wurden mit dem Schnelltest sicher erfasst.

Tab. 19: Vergleich des Sulfat-Schnelltest mit IC-Analysen

Körnung	Schnelltest in mg/L	IC-Messwert in mg/L
	[mg/l]	[mg/l]
0/0,063	200-400	347,2
0,063/0,125	200-400	345,3
0,125/0,25	200-400	293,4
0,25/0,5	200-400	231,2
0,5/1	<200	116,2
1/2	<200	96,6
2/4	<200	56,3

Die Methode ist für die Anwendung vor Ort, d.h. beim Recycler und beim RC-Körnung abnehmenden Betonwerk, geeignet. Da die Sulfatgehalte bekanntermaßen in den unteren Korngrößen angereichert werden, ist zu empfehlen, bei der Erst-Einschätzung bevorzugt feine Körnungen zu prüfen.

Der Zeitbedarf dafür beträgt ca. 8 min. Für die Wägung reicht eine batteriebetriebene Haushaltswaage aus.

5.7. Zusammenfassung und Bewertung

Die Typ 2-Körnungen von Feess und S&K erfüllen alle Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13], der DIN EN 12620 [16] und der DIN 4226-100 [21] und der Zulassungen (Feess: Z-3.43-2079, S&K: Z-3.43-2119).

Korngrößenverteilung

Der Nachweis der Anforderungen an die granulometrische Kornzusammensetzung dient der Bestimmung, ob durch Nutzung einzelner RC-Gesteinskörnungen (z.B. die untersuchten Fraktionen 2/16, 2/8, 8/16) in der Betonrezeptur, eine Korngrößenverteilung ähnlich der Regelsieblinien nach DIN 1045-2 [20] ermöglicht wird. Eine abgestimmte Korngrößenverteilung beeinflusst die Verarbeitbarkeit des Betons. Weiter kann eine ausreichende Packungsdichte erzielt werden, wodurch die Festigkeit und der notwendige Zementleimanteil beeinflusst werden. Die untersuchten Fraktionen der Firmen Feess (2/16), GWV (2/16) und Scherer & Kohl (2/8, 8/16) weisen vergleichbare Korngrößenverteilungen und mittlere Korndurchmesser auf. Im Vergleich zu den Regelsieblinien nach DIN 1045-2 [20] liegen alle unterhalb der A16 Sieblinie, d.h. sie liegen im in Bezug auf die Verarbeitbarkeit und die technischen Eigenschaften ungünstigen Bereich. In der praktischen Anwendung wird dies durch die Nutzung von natürlichen Gesteinskörnungen mit feineren Partikeln (z.B. Fraktionen 0/2, 2/8 mm) in der Betonrezeptur ausgeglichen (siehe Kapitel 6.1).

Beim Vergleich von 20 Messungen der Feess 2/16 Körnung über 2 Jahre zeigte sich eine geringe Schwankungsbreite, d.h. es liegt eine gleichmäßige Qualität auch bei Lieferchargen über längere Zeiträume vor. Dadurch wird den Betonherstellern ermöglicht bei Nutzung von Typ 2-Körnungen eines Anbieters nach der Rezepturanpassung gleichmäßige R-Betone herstellen zu können.

Art der Bestandteile

Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung der untersuchten rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 2 nach der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] und DIN EN 12620 [16] wurden von allen untersuchten Proben eingehalten.

Der geringe Anteil an Störstoffen ist auf eine hochwertige Aufbereitung zurückzuführen. Der Mauerwerksanteil liegt mit 11 bis 16 % deutlich unterhalb des Grenzwertes von 30 %. Damit besteht weiteres Potential, einen Teil des Betonbruchs gegen Mauerwerkbruch auszutauschen.

Wasseraufnahme und Rohdichte

Die Wasseraufnahme und Rohdichte sind gemeinsam zu betrachten, da die Wasseraufnahme von der Rohdichte abhängig ist. Vereinfacht bedingt eine erhöhte Wasseraufnahme eine erhöhte Porosität und damit eine niedrige Rohdichte. Die porösen Anteile der RC-Körnungen müssen vor der Betonherstellung wassergesättigt sein, damit sie dem Zementleim kein Wasser entziehen.

Bei der Wasseraufnahme unterscheiden sich Typ 1 und Typ 2 bzw. auch der Betonabbruch in Typ 2 vom Mauerwerkbruch dahingehend, dass der Betonbruch bereits innerhalb der ersten 10 min stärker saugt, während der Mauerwerkbruch noch zwischen 10 min und 24 h mehr nachsaugt. Das hat jedoch bei feuchten RC-Körnungen nach der Umhüllung mit Zementleim keine Auswirkungen auf die Wasseraufnahme des R-Betons (siehe Kapitel 6.3).

Alle untersuchten Proben unterschritten mit Werten $< 10\%$ den Grenzwert von 15% Wasseraufnahme deutlich. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass der Anteil an Mauerwerk deutlich unterhalb des Grenzwertes liegt (siehe Kapitel 5.4). Je nach Art der Ziegel (z.B. Klinker, Hintermauerziegel) weisen diese eine höhere Porosität als Betonrezyklat auf, wobei die Porosität des Betonrezyklats von der Menge und Art des anhaftenden Zementsteins abhängt.

RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 müssen gemäß der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] eine Rohdichte von $\geq 2,0 \text{ g/cm}^3$ aufweisen. Dies wird von der Gesamtprobe (Feess 2/16) deutlich eingehalten. Auch wenn einzelne Bestandteile bei $< 2 \text{ g/cm}^3$ liegen, erfüllen die Typ 2-Gemische die Anforderung in jedem Fall. Aufgrund des anhaftenden Zementsteins und der niedrige-

ren Rohdichte von Ziegeln weisen RC-Gesteinskörnungen im Vergleich zu quarzitischer oder carbonatischer Gesteinskörnung geringere Rohdichten auf.

Sulfat- und Chloridgehalte

Der Grenzwert für den säurelöslichen Sulfatgehalt wird in der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] bzw. DIN EN 12620 [16] definiert. Die untersuchten Proben der Fraktion 2/16 halten diesen Grenzwert alle ein. Selbst die RC-Brechsande der Fraktion 0/2 erfüllen die Vorgaben klar. In Abhängigkeit der Korngröße zeigt sich bei einigen Proben, dass mit kleinerem Korndurchmesser der Sulfatgehalt ansteigt. Dies ist auf eine im Vergleich zu Mauerwerks- und Betonbruch geringere Festigkeit und bessere Mahlbarkeit der sulfatischen Baustoffe zurückzuführen.

Für die wasserlöslichen Sulfat- und Chloridgehalte liegen keine Grenzwerte nach der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] bzw. DIN EN 12620 [16] vor. Die ermittelten Gehalte können mit Grenzwerten der DIN 4226-100 [21] und einer Kategorisierung nach DIN EN 12620 [16] verglichen werden. Die Grenzwerte nach DIN 4226-100 [21] werden von allen Proben sehr deutlich eingehalten. Im Vergleich zur Kategorisierung nach DIN EN 12620 [16] können alle Proben in die Kategorie $SS_{0,2}$ mit den höchsten Anforderungen eingeordnet werden. In Abhängigkeit der Korngröße zeigt sich bei einzelnen Proben ein Ansteigen des wasserlöslichen Sulfatgehalts bei geringeren Korngrößen.

Zusammenfassung

Alle untersuchten RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 erfüllen die Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] bzw. DIN EN 12620 [16]. Es besteht Potential den Anteil an Mauerwerkbruch zu erhöhen und trotzdem noch die Grenzwerte einzuhalten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass Mauerwerksanteile eine höhere Porosität besitzen, was zu einer erhöhten Wasseraufnahme und Porosität der gesamten RC-Gesteinskörnung gegenüber Typ 1 und natürlichen Primärkörnungen führt.

Die dadurch beeinflusste Konsistenz wird in der Betonrezeptur und beim Mischen durch Anfeuchten der RC-Körnungen und Fließmittel kompensiert.

Die gleichmäßige Qualität der RC-Körnungen ist auf eine sorgfältige Aufbereitung zurückzuführen. Die geringe Schwankung beim Mauerwerkbruch der Fa. Feess ist wahrscheinlich damit begründet, dass der Abbruch aus einem begrenzten Anlieferungsgebiet mit ähnlichen Mauerwerksbaustoffen aus den 50er bis 80er Jahren des 20. Jh. stammt.

Positive Ergebnisse wurden auch an den RC-Brechsanden des Typs 2 der Fraktion 0/2 erzielt. Um deren Anwendbarkeit in der Baupraxis zu bestimmen wurden Zementmörtel mit 100 % RC-Brechsand bzw. mit Normsand miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 8.2 zusammengefasst.

6. Untersuchungen an R-Beton mit Typ 2-Körnung

In dem Forschungsvorhaben wurden keine neuen R-Beton-Rezepturen entwickelt, sondern handelsübliche R-Betone eingesetzt. Die Aufgabe bestand darin, an diesen R-Betonen technische und Gefügeeigenschaften zu prüfen, die über das normale Maß der Betoneigenschaften gemäß geltender Regelwerke hinauszugehen.

Die R-Beton-Rezepturen und Prüfkörper wurden von der Fa. Holcim erstellt und sind in ihrem Produktportfolio vorhanden. In den verwendeten Betonrezepturen wurden RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 in der Fraktion 2/16 der Fa. Feess genutzt. Zum direkten Vergleich wurden Probekörper derselben Betonfestigkeitsklasse mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung untersucht.

6.1. Rezepturen und Betonherstellung

Innerhalb des Projekts wurden bewährte Rezepturen der Fa. Holcim verwendet, um praxisrelevante Betone zu untersuchen. Die von der Fa. Holcim entwickelten R-Betonrezepturen werden seit 2013 bis zur Festigkeitsklasse C25/30 und seit 2016 bis Festigkeitsklasse C30/37 angeboten. Im Projekt wurden Proben der Festigkeitsklasse C20/25, C25/30 und C30/37 berücksichtigt, in welchen der Anteil von RC-Gesteinskörnung des Typs 2 25 bzw. 35 Vol.% bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung betrug.

In den R-Betonrezepturen sind neben der Typ 2 RC-Gesteinskörnung, Sand, Kies sowie Kalksteinsplitt in unterschiedlichen Fraktionen enthalten. Diese Mischungszusammensetzung beruht darauf, dass mangels nahe gelegener Kiesvorkommen im Umkreis von Stuttgart überwiegend Kalksteinsplitt verwendet wird. In den Rezepturen der Referenz- und R-Betone wurde der Kalksteinsplittanteil variiert (Tab. 20).

Als Zement wurde ausschließlich ein CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ der Fa. Holcim verwendet. Der Anteil liegt bei den R-Betonen zwischen 285 und 295 kg/m³ (DR 35, DR 28, DR 38, DR 321) sowie bei den Referenzbetonen zwischen 310 und 320 kg/m³. Der Unterschied des Zementanteils bei gleicher Betonfestigkeitsklasse ist dadurch zu erklären, dass in den R-Betonrezepturen ein Teil des Zements durch Steinkohlenflugasche substituiert wurde.

Die Steinkohlenflugasche ist ein puzzolanischer Zusatzstoff und bildet zusammen mit dem bei der Zementhydratation entstehenden Calciumhydroxid festigkeitsbildende CSH Phasen. Die feinen Partikel wirken auch als „Füller“ zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Durch die feinen kugelförmigen Partikel wird durch Steinkohlenflugasche die Konsistenz des Betons weicher. Das heißt, sie dient zur Optimierung der Packungsdichte und der rheologischen Eigenschaften in der Rezeptur.

Die reaktive Flugasche kann zum Bindemittelanteil nach DIN EN 206 [19] und DIN 1045 [20] über den sogenannten k-Wert zugerechnet werden. Auf Grundlage von Untersuchungsergebnissen wird Flugasche mit einem Faktor von 0,4 (entspricht 40 %) berücksichtigt. Die anrechenbare Höchstmenge von Flugasche muss bei CEM II Zementen folgender Bedingung genügen:

Flugasche / Zement \leq 0,25 Masseanteilen.

Damit liegen bei allen Rezepturen Bindemittelanteile von 309 bis 321 kg/m³ vor und sind dementsprechend vergleichbar.

Bei dem verwendeten Zement der Fa. Holcim „Optimo 4“ handelt es sich um einen Portlandkompositzement (CEM II/B-M (T-LL) - AZ "Dotternhausen") der Festigkeitsklasse 42,5 N, mit den Hauptkomponenten Portlandzementklinker, gebranntem Schiefer und ausgewähltem, hochwertigem Kalkstein (\leq 0,20 M.% an organischem Kohlenstoff (TOC) und niedrigen Gehalten an Ton). Der gebrannte Schiefer besitzt puzzolanische Eigenschaften und ist damit im Gegensatz zum inerten Kalkstein reaktiv, d.h. er trägt zur Festigkeitsbildung bei. Der Portlandkompositzement entspricht in seiner Zusammensetzung den Anforderungen und Konformitätskriterien der DIN EN 197-1 [33]. Die Übertragbarkeit auf andere CEM II/B-Zementarten ist damit gegeben.

Die Betonprobekörper wurden von der Fa. Holcim hergestellt, 28 Tage normgerecht gelagert und dort auch die üblichen Kennwerte wie Druckfestigkeit und Rohdichte geprüft. Anschließend erfolgte die Abholung von Betonwürfeln aus der gleichen Charge wie für die Normprüfungen, um darüber hinausgehende Versuche und Analysen durchführen zu können. An allen Betonen wurde eine Konsistenz F3 (weich) nach DIN EN 206 [19] eingestellt. Diese wurde über die Sieblinie, den w/z-Wert sowie die Anteile des Betonverflüssigers und Fließmittels eingestellt. In der Tab. 20 sind die einzelnen Betonrezepturen zusammengefasst.

Tab. 20: Betonrezepturen

		R-Beton (Standard)			R-Beton (Objekt)	Referenzbeton		
Interne Probenbezeichnung		DR 28	DR 35	DR 38	DR 321 ¹	DN 35	DN 38	
Betonfestigkeitsklasse		C20/25	C25/30	C25/30	C 30/37	C25/30	C25/30	
Natürliche Gesteinskörnung	Rundsand 0/2	[kg/m ³]	578	588	625	599	628	673
	Kies 2/8	[kg/m ³]	319	260	453	367	263	405
	Kalksteinsplitt 8/16	[kg/m ³]	242	–	263	393	471	731
	Kalksteinsplitt 16/22	[kg/m ³]	–	523	–	–	471	–
RC-Gesteinskörnung Typ 2	Splitt 2/16	[kg/m ³]	547	410	401	405	–	–
RC-Anteil Typ 2, 2/16 mm		[M.%]	35%	25%	25%	25%	0%	0%
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ		[kg/m ³]	285	295	295	295 ²	310	320
Steinkohlenflugasche		[kg/m ³]	60	35	60	65	–	–
Flugasche/Zement ³			0,21	0,09	0,20	0,21	–	–
Bindemittelanteil mit k-Wert Berücksichtigung, k-Wert = 0,4		[kg/m ³]	309	309	319	321	310	320
Betonverflüssiger		[kg/m ³]	1,43	1,48	1,48	–	0,78	0,80
Fließmittel		[kg/m ³]	–	0,74	0,74	2,95	0,78	0,80
w/z - Wert		–	0,66	0,59	0,61	0,57	0,58	0,58

¹ in dieser Rezeptur wurde ein Luftporenbildner (1,5 M.%) verwendet

² in dieser Rezeptur wurde abweichend ein CEM II/B-M (T-LL) 52,5 N-AZ verwendet

³ nach DIN EN 206 [19] muss bei Verwendung der Zementart CEM II die Höchstmenge an Flugasche, die auf den Wasserzementwert angerechnet werden darf, folgender Bedingung genügen:
Flugasche/Zement ≤ 0,25 in Massenanteilen.

Die Betone DR 35 und DN 35 enthalten höhere und gröbere Anteile an Kalksteinsplitt (Größtkorn 22 mm) als DR 38 und DN 38 (Größtkorn 16 mm), welche mehr Sand und Kies enthalten.

Die Betone DR 35 und DR 38 mit 25 % RC-Körnungsanteil können in allen in Abb. 7 angegebenen Feuchtigkeits- und Expositionsklassen verwendet werden. Die Rezeptur DR 28 mit 35 % Typ 2 Körnung ist nur in Feuchtigkeitsklasse WO und Expositionsklasse XC1 anwendbar.

6.2. Festigkeiten und E-Modul

Die Druckfestigkeit wurde nach normgerechter Lagerung von 28 Tagen an Betonwürfeln entsprechend DIN EN 12390-3 [34] bestimmt. Die Ermittlung der Biegezugfestigkeit erfolgte gemäß DIN EN 12390-5 [35]. Die Untersuchung des dynamischen Elastizitätsmoduls wurde in Anlehnung an DIN EN 14146 [36] durchgeführt. In Tab. 21 sind die Ergebnisse zusammengefasst und den Rezepturen gegenübergestellt. In Abb. 42 werden die ermittelten Druckfestigkeiten mit den Mindestanforderungen der jeweiligen Betonfestigkeitsklasse verglichen.

Tab. 21: Festigkeiten und dynamisches Elastizitätsmodul nach 28 Tagen

			R-Beton (Standard)			R-Beton (Objekt)	Referenzbeton	
Interne Probenbezeichnung			DR 28	DR 35	DR 38	DR 321 ¹	DN 35	DN 38
Betonfestigkeitsklasse			C20/25	C25/30	C25/30	C 30/37	C25/30	C25/30
Natürliche Gesteinskörnung	Rundsand 0/2	[kg/m ³]	578	588	625	599	628	673
	Kies 2/8	[kg/m ³]	319	260	453	367	263	405
	Kalksteinsplitt 8/16	[kg/m ³]	242	–	263	393	471	731
	Kalksteinsplitt 16/22	[kg/m ³]	–	523	–	–	471	–
RC-Gesteinskörnung Typ 2	Splitt 2/16	[kg/m ³]	547	410	401	405	–	–
RC-Anteil Typ 2, 2/16 mm		[M.%]	35%	25%	25%	25%	0%	0%
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ		[kg/m ³]	285	295	295	295 ²	310	320
Steinkohlenflugasche		[kg/m ³]	60	35	60	65	–	–
Bindemittelanteil mit k-Wert Berücksichtigung, k-Wert = 0,4		[kg/m ³]	309	309	319	321	310	320
Betonverflüssiger		[kg/m ³]	1,43	1,48	1,48	–	0,78	0,8
Fließmittel		[kg/m ³]	–	0,74	0,74	2,95	0,78	0,8
w/z - Wert		–	0,66	0,59	0,61	0,57	0,58	0,58
Druckfestigkeit		[N/mm²]	30,2	35,2	36,9	59,8	35,0	34,5
Spaltzugfestigkeit		[N/mm²]	2,5	2,5	–	–	2,5	2,4
Dynamische Elastizitätsmodul		[kN/mm²]	25,7	28,2	33,3	36,7	30,9	29,5
Rohdichte		[kg/m³]	2254	2318	2310	2322	2346	2341

¹ in dieser Rezeptur wurde ein Luftporenbildner (1,5 M.%) verwendet

² in dieser Rezeptur wurde abweichend ein CEM II/B-M (T-LL) 52,5 N-AZ verwendet

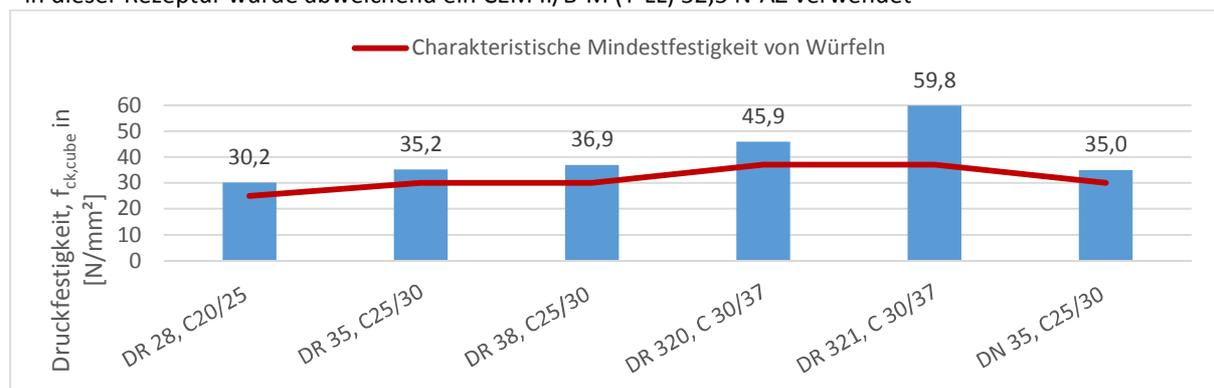


Abb. 42: Vergleich der Druckfestigkeiten mit den Anforderungen der Betonfestigkeitsklasse

Im Vergleich der Rezepturen mit RC-Gesteinskörnung des Typs 2 mit den Referenzbetonen ist feststellen, dass sich für Betone in derselben Betonfestigkeitsklasse bei ähnlichen Bindemittelanteilen und w/z-Werten vergleichbare Druck- und Spaltzugfestigkeiten erzielen lassen. Alle betontechnologischen Anforderungen gemäß Regelwerken werden erfüllt.

Die Anpassungen der Rezepturen bei der Verwendung von RC-Gesteinskörnungen sind aufgrund der höheren Wasseraufnahme und der eher splittigen Kornform der Rezyklate notwendig.

Im Vergleich der R-Betonrezepturen DR 35 und DR 38 mit den Referenzbetonen DN 35 und DN 38 (Tab. 21) lässt sich jedoch feststellen, dass bei Berücksichtigung des k-Wert Ansatzes (Berücksichtigung der Flugasche, siehe Tab. 20) nach DIN EN 206 [19] vergleichbare Festigkeiten bei nahezu übereinstimmenden Bindemittelgehalten und w/z-Werten erzielt wurden.

Die RC-Körnungs- und unterschiedliche Kalksteinsplittanteile beeinflussen die Druckfestigkeit und den E-Modul. Bei vergleichbaren w/z-Werten weisen R-Betone i.d.R. geringere Druckfestigkeiten auf. Beim Vergleich der R-Betone bei gleicher Druckfestigkeitsklasse (DR 35: höherer Splittanteil, DR 38: geringerer Splittanteil) führen höhere Kalksteinsplittanteile zu abnehmenden Druckfestigkeiten und E-Moduln. Dies ist auch an den Referenzbetonen in geringerem Ausmaß festzustellen.

Die splittige Kornform fördert den Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung und kann damit zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit führen. Demgegenüber kann die splittige Kornform eine schlechtere Verarbeitbarkeit sowie Verdichtung und damit geringere Druckfestigkeit verursachen. [26]

R-Betone der bisher höchst zulässigen Druckfestigkeitsklasse C30/37 wurden von der Fa. Feess bei der Errichtung einer Werkhalle und eines Bürogebäudes verwendet und innerhalb des Projekts untersucht. Diese Rezeptur wies einen vergleichbaren Bindemittelgehalt zu den Betonen des Projekts auf (siehe Tab. 20). Durch die Verwendung eines CEM II/B 52,5 N wurde bei vergleichbaren Gesteinskörnungszusammensetzungen und w/z-Werten zu den R-Betonen des Projekts eine deutliche Druckfestigkeitssteigerung erzielt.

Der Elastizitätsmodul von R-Betonen ist je nach Art der RC-Körnungen geringer als bei herkömmlichen Betonen und weist nach [38] größere Streuungen auf. In [38] wird beschrieben, dass sich der E-Modul bei den bisher zugelassenen RC-Körnungsanteilen um ca. 26 % bei Betonbruch und um ca. 30 % bei Ziegelsplitt verringert. Eine deutliche Reduzierung der E-Moduln wurde im Projekt nicht nachgewiesen.

Bei der Charakterisierung der Rezyklate in den Regelwerken wird bei Typ 2 die Summe von Rc und Ru und Rb angegeben, siehe Tab. 12 und Tab. 13. Bei gleichem Rb- Anteil (= Mauerwerkbruch) und gleicher Summe aus Rc und Ru (= Betonbruch und sekundäre natürliche Gesteinskörnung) können ganz unterschiedliche Anteile an Zementstein enthalten sein. Ein Beton mit Rezyklat aus z.B. 10 % Rc + 70 % Ru + 20 % Rb verhält sich eher wie ein Beton, der mit natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt wurde – im Gegensatz zu einem Rezyklat aus 70 % Rc + 10 % Ru und 20 % Rb, der bei vergleichbarem Mauerwerkbruchanteil (bei unseren Körnungen vor allem Ziegelgehalt) deutlich mehr Zementstein aus Rc enthält. Die Eigenschaften werden deutlich mehr durch den Zementsteingehalt als durch den Ziegelbruchgehalt beeinflusst (z. B. der E-Modul). Gleiches gilt für Typ 1-Körnungen, nur dass diese generell geringere Rb-Anteile aufweisen.

Es wurde bestätigt, dass mit Typ 2 Gesteinskörnungen R-Betone unterschiedlicher Druckfestigkeitsklassen durch Anpassungen der Rezeptur herstellbar sind. Die erzielten Spaltzugfestigkeiten bei übereinstimmender Druckfestigkeitsklasse sind mit denen von Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung vergleichbar. Der E-Modul ist je nach Anteil an Mauerwerkbruch in der RC-Körnung geringer als bei Betonen mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen.

Trotz der höheren Wasseraufnahme der Gesteinskörnung und der eher splittigen Kornform der Rezyklate, ist bei R-Betonen kein erhöhter Zementanteil notwendig, um vergleichbare Festigkeiten wie bei herkömmlichen Betonen zu erzielen.

6.3. Wasseraufnahme und Rohdichte

Die Wasseraufnahme wurde an Probekörpern im Alter von 28 Tagen nach 10 min und 24 h bestimmt. Dazu wurden die Proben nach einer Darrtrocknung vollständig unter Wasser gelagert. Die Ermittlung der Festbetonrohddichten erfolgte nach DIN EN 12390-7 [39]. In Tab. 22 sind die Ergebnisse der Untersuchungen der Rohdichte und Wasseraufnahme zusammengefasst und den Zementgehalten und w/z-Werten gegenübergestellt.

Tab. 22: Ergebnisse der Rohdichte und Wasseraufnahme am Festbeton

		R-Beton (Standard)			R-Beton (Objekt)	Referenzbeton	
Interne Probenbezeichnung		DR 28	DR 35	DR 38	DR 321 ¹	DN 35	DN 38
Betonfestigkeitsklasse		C20/25	C25/30	C25/30	C 30/37	C25/30	C25/30
CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ	[kg/m ³]	285	295	295	295 ²	310	320
Steinkohlenflugasche	[kg/m ³]	60	35	60	65	–	–
w/z - Wert	–	0,66	0,59	0,61	0,57	0,58	0,58
Druckfestigkeit	[N/mm ²]	30,2	35,2	36,9	59,8	35,0	34,5
Biegezugfestigkeit	[N/mm ²]	2,9	5,1	4,2	6,1	2,3	4,9
Dynamische Elastizitätsmodul	[kN/mm ²]	25,7	28,2	33,3	36,7	30,9	29,5
Rohdichte	[kg/m³]	2254	2318	2310	2322	2346	2341
Wasseraufnahme nach 10 min	[M.%]	1,7	1,3	1,2	0,7	1,2	1,2
Wasseraufnahme nach 24 h	[M.%]	7,9	6,4	6,0	4,4	6,0	5,7

¹ in dieser Rezeptur wurde ein Luftporenbildner (1,5 M.%) verwendet

² in dieser Rezeptur wurde abweichend ein CEM II/B-M (T-LL) 52,5 N-AZ verwendet

An den R-Betonen wurden, bei gleicher Druckfestigkeitsklasse leicht geringere Rohddichten gemessen. Die Anforderung an die Rohdichte für Normalbetone > 2000 kg/m³ wurde von allen R-Betonen deutlich eingehalten.

Die Wasseraufnahmen zeigen ein differenziertes Bild. Zum Teil wurden übereinstimmende bzw. leicht erhöhte Wasseraufnahmen an den R-Betonen im Vergleich zu den Referenzbetonen bestimmt. Einzig der R-Beton der Festigkeitsklasse C20/25 (DR 28) zeigt im Vergleich eine erhöhte Wasseraufnahme, was durch den erhöhten RC-Gesteinskörnungsanteil (35 % statt 25 %) und w/z-Wert zu begründen ist.

Die geringe Wasseraufnahme und hohe Rohdichte der R-Betone ist auf die hohe Rohdichte der RC-Gesteinskörnungen (siehe Kapitel 5.5) und ein ausreichendes Vornässen der RC-Gesteinskörnung zurückzuführen. Bei den geprüften R-Betonen besteht keine exakte Korrelation zwischen Wasseraufnahme und Rohdichte, da R-Betone mit geringerer Rohdichte im Vergleich zu den Referenzbetonen z.T. gleiche, geringere oder höhere Wasseraufnahmen aufwiesen.

6.4. Frostwiderstand

Der Frostwiderstand muss für Betone im Hochbau für die üblichen Expositionsklassen nicht nachgewiesen werden. Im vorliegenden Untersuchungsprogramm wurde er als Maß zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit herangezogen.

Der Frostwiderstand wurde nach DIN EN 12390-9 [40] mittels des CIF Verfahrens (auch CF Verfahren) bestimmt. Bei diesem Verfahren kommt destilliertes Wasser als Prüfmedium zur Anwendung. Entsprechend der Prüfvorschrift wurden 56 Frost-Tau-Wechsel (FTW) durchgeführt.

In nationalen und internationalen Regelwerken werden keine Grenzwerte angegeben. Im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) [41] wird angegeben, dass Probekörper nach 28 Frost-Tau-Wechseln eine durchschnittliche Abwitterung von max. 1000 g/m² aufweisen dürfen. Der dynamische E-Modul soll noch 75 % des Ursprungswerts betragen. Der Beton gilt als geschädigt, wenn dieser Grenzwert unterschritten wird. Die Anforderungen der BAW sind erhöhte Anforderungen für Wasserbauwerke, die hier als Richtwerte herangezogen werden. R-Betone sind bisher nicht für Wasserbauwerke vorgesehen und werden nur in den Feuchtigkeitsklassen WO und WF eingesetzt (siehe Abb. 7).

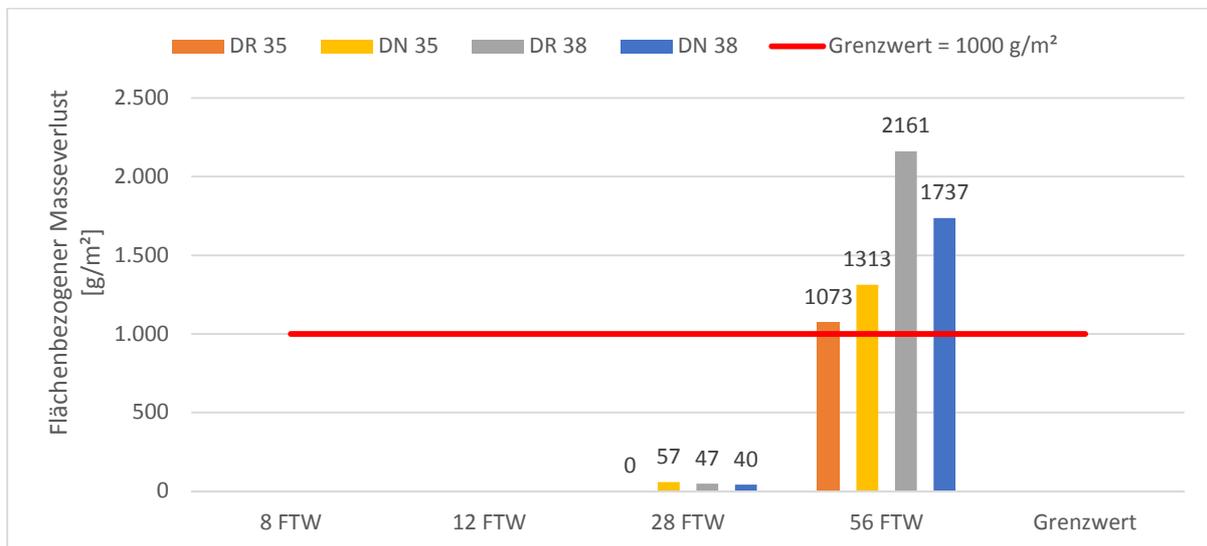


Abb. 43: Gegenüberstellung der flächenbezogenen Masseverluste zum Grenzwert nach [41]

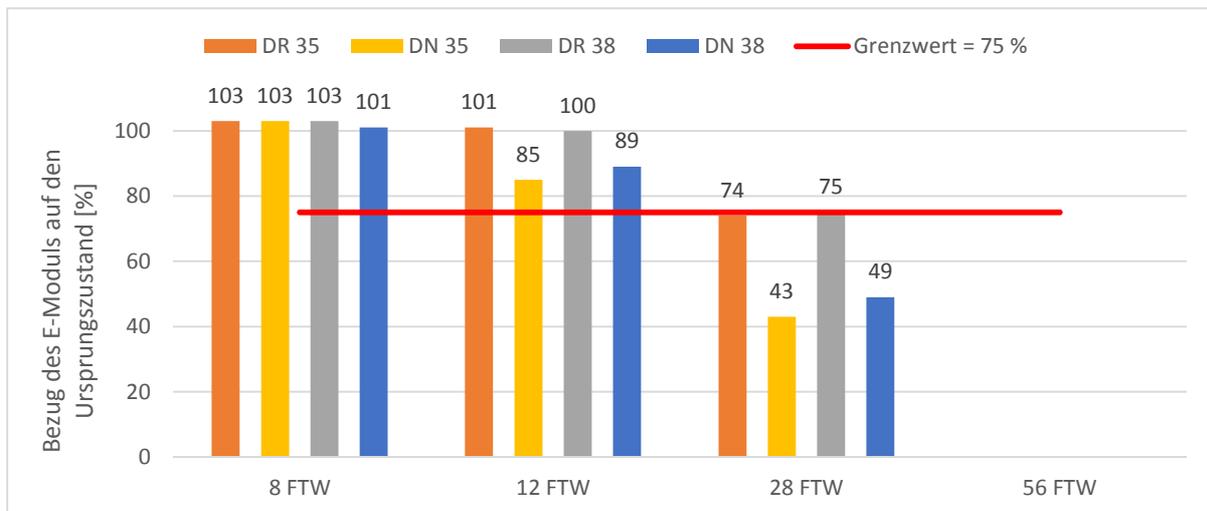


Abb. 44: Gegenüberstellung des prozentualen Bezugs der E-Moduln auf den Ursprungszustand zum Grenzwert nach [41]

Abb. 43 zeigt, dass nach 28 FTW alle untersuchten Proben den Grenzwert von 1000 g/m² flächenbezogenem Masseverlust einhalten. Der Abb. 44 ist zu entnehmen, dass zu diesem Zeitpunkt die R-Betone der Festigkeitsklasse C25/30 den Grenzwert für den E-Modul einhalten bzw. leicht unterschreiten. Die Referenzbetone der gleichen Festigkeitsklasse weisen deutlich geringere E-Moduln und damit eine höhere innere Schädigung auf. Damit erfüllt der R-Beton DR 38 der Festigkeitsklasse C25/30 die Kriterien nach [41] für die Frost-Tau-Wechselbeständigkeit. Der R-Beton DR 35 unterschreitet die Anforderungen an das E-Modul nur sehr knapp. Der R-Beton der Festigkeitsklasse C20/25 sowie die Referenzbetone der Festigkeitsklasse C25/30 wiesen zu geringe E-Moduln und zu starke Gefügeveränderungen auf, um den E-Modul erfassen zu können.

Nach 56 FTW zeigt sich ein differenziertes Bild. Die flächenbezogenen Masseverluste bei den R-Betonen und Referenzbetonen der Festigkeitsklasse C25/30 zeigen ein leichtes bzw. deutliches Überschreiten des Grenzwertes für den Masseverlust nach 28 FTW. Hervorzuheben ist hierbei die vergleichsweise hohe Beständigkeit des R-Betons DR 35, welcher nach 56 FTW den Grenzwert für die Masseabnahme nach 28 FTW nur leicht überschreitet. Nach 56 FTW waren aufgrund der Abwitterung der Probekörper keine Bestimmungen der dynamischen E-Moduln möglich.

Eine Verbesserung der Frost-Tau-Wechselbeständigkeit bei hoher Frostbeanspruchung (> 28 FTW) ist durch den Einsatz von Luftporenbildnern möglich. R-Betone mit LP-Mitteln wurden als Objektbetone (u.a. DR 321) bereits in der Baupraxis eingesetzt, jedoch im Projekt nicht auf Frostwiderstand geprüft, da die Frostprüfungen des Projekts zum Zeitpunkt des Baus des Kompetenzzentrums abgeschlossen waren.

In den Abbildungen 165 bis 172 im Anhang A sind die Probekörper vor und nach der CIF Prüfung dargestellt, wo die oberflächliche Abwitterung sichtbar ist.

6.5. Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde nach DIN EN 12390-9 [40] mittels des CDF Verfahrens bestimmt. Bei diesem kommt im Gegensatz zum CIF Verfahren statt destilliertem Wasser eine 3 %-ige NaCl-Lösung als Prüfmedium zur Anwendung. Entsprechend der Prüfvorschrift wurden 28 Frost-Tausalz-Wechsel (FTSW) durchgeführt.

Die Auswertung orientiert sich ebenfalls an den Grenzwerten des Merkblatts „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau [41]. Demnach dürfen Probekörper nach 28 FTSW eine durchschnittliche Abwitterung von max. 1500 g/m² aufweisen.

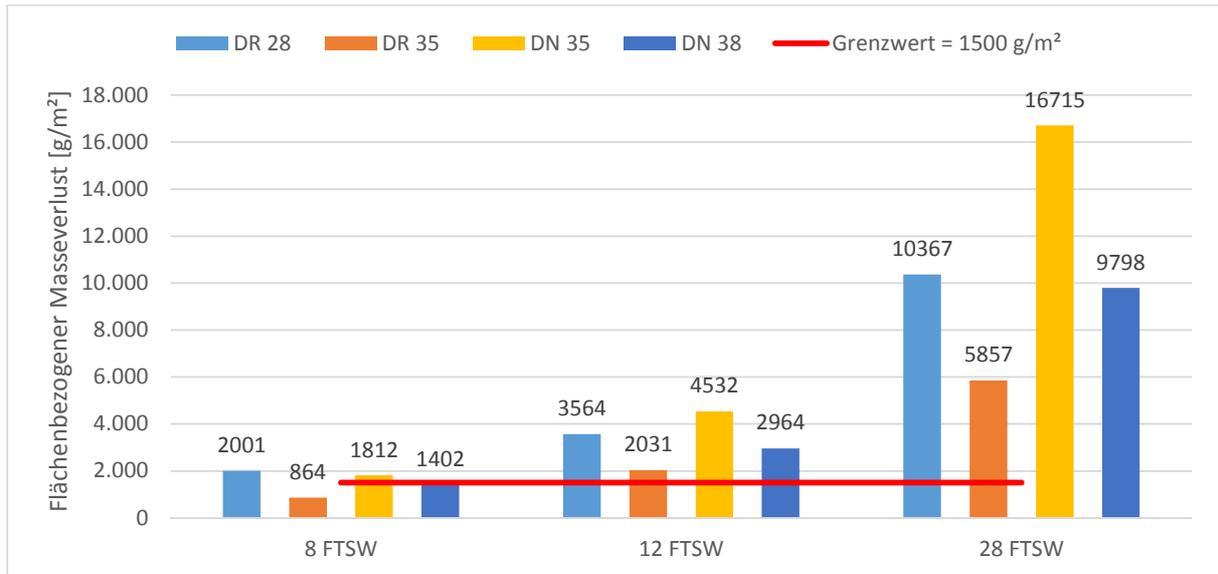


Abb. 45: Gegenüberstellung der flächenbezogenen Masseverluste zum Grenzwert nach [37]

Im Vergleich zur Frost-Tau-Prüfung wirkt bei der Frost-Tausalz-Prüfung zusätzlich der Kristallisationsdruck der Salze im Austrocknungszyklus auf das Betongefüge ein. Dadurch wird vor allem der oberflächennahe Bereich des Betons beeinträchtigt, was zu charakteristischen Masseverlusten durch Abwitterung führt.

Durch Taumittel wird die Schädigung im oberflächennahen Bereich erhöht. Die Taumittel entziehen beim Wechsel des Aggregatzustands der Umgebung schlagartig Wärmeenergie, was zu erhöhten Spannungen führt.

Aus den Ergebnissen des flächenbezogenen Masseverlusts (Abb. 45) wird deutlich, dass keine der untersuchten Proben den Grenzwert nach 28 FTSW einhält. Im Vergleich des R-Betons und der Referenzbetone der gleichen Druckfestigkeitsklasse sind dennoch deutliche Unterschiede zu erkennen. Der R-Beton DR 35 weist über die gesamte Prüfdauer eine deutlich geringere Abwitterung auf als beide Referenzbetone.

Die Abwitterung betraf bei allen Proben nur die Oberfläche. Gefügeschädigungen, wie z.B. Risse im Inneren wurden nicht festgestellt.

Die Abbildungen 46 bis 61 zeigen makroskopische und lichtmikroskopische Aufnahmen der Proben vor und nach dem CDF-Test. Aus diesen geht hervor, dass bei den R-Betonen sowie den Referenzbetonen auch nach der FTS-Beanspruchung ein guter Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung vorliegt.

Die für die Untersuchungen genutzte CDF-Truhe ist im Anhang in Abb. 173 dargestellt.



Abb. 46: Oberfläche DR 28 vor dem CDF-Test



Abb. 47: Oberfläche DR 35 vor dem CDF-Test



Abb. 48: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test



Abb. 49: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test



Abb. 50: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung



Abb. 51: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung



Abb. 52: Oberfläche DR 28 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung



Abb. 53: Oberfläche DR 35 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung

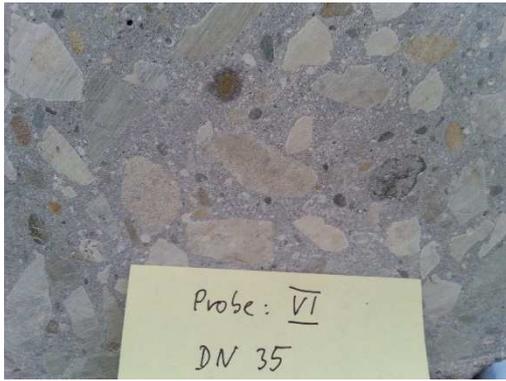


Abb. 54: Oberfläche DN 35 vor dem CDF-Test



Abb. 55: Oberfläche DN 38 vor dem CDF-Test



Abb. 56: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test



Abb. 57: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test



Abb. 58: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung



Abb. 59: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test, 6-fache Vergrößerung



Abb. 60: Oberfläche DN 35 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung



Abb. 61: Oberfläche DN 38 nach dem CDF-Test, 25-fache Vergrößerung

6.6. Gefügeuntersuchungen

Das Gefüge von Betonen beeinflusst maßgebend deren Festigkeit und Dauerhaftigkeit, wird aber bei Standardbetonprüfungen der Eigen- und Fremdüberwachungen nicht erfasst. Deshalb ist ein wichtiges Anliegen des Projekts, u.a. diese über die Regelwerke hinausgehende Untersuchungen durchzuführen, um die Einflüsse der RC-Körnungen auf den Beton genauer beschreiben zu können.

Für die Gefügeausbildung spielen die Festigkeit und Dichtigkeit des Zementsteins, Art und Form der Körnungen und die Verbundzone zwischen Zementstein und Körnung eine große Rolle. Die Zementart ist in den untersuchten Betonen vergleichbar. Deutliche Unterschiede liegen in der

- Kornform
- Rauigkeit
- Rohdichte und
- spezifischen Oberfläche

der Körnungen und in der Ausbildung des Verbundes an der Phasengrenze zwischen Zementstein und den eingesetzten unterschiedlichen natürlichen und rezyklierten Körnungen. Weitere Unterschiede ergeben sich z.T. durch die Verwendung der Flugasche in den R-Betonen.

Natürliche Gesteinskörnungen wie Kies oder gebrochener Naturstein weisen im Vergleich zur RC-Gesteinskörnungen des Typs 1 oder 2 i.d.R. eine geringere Porosität auf. Trotzdem bestehen auch bei natürlichen Gesteinskörnungen große Unterschiede: Quarz (Sande/Kiese), sind überwiegend glatt und nehmen kaum Wasser auf, während gebrochener Kalkstein (Splitt, Grobsplitt) rauer ist und mehr Wasser aufnimmt. Die Vergleichsbetone enthalten sowohl Quarz als auch Kalkstein in unterschiedlichen Anteilen.

In den verwendeten Typ 2 Körnungen liegen Betonbruch und größere Anteile von Splitten aus Mauerziegeln vor, anders als bei Typ 1 Körnungen. Deshalb beziehen sich die folgenden Gefügeuntersuchungen auf den Vergleich des Zementsteins im Verbund zu den natürlichen Körnungen und Ziegelsplitt.

Innerhalb des Forschungsprojekts wurde die Verbundzone Zementstein-Körnung anhand von Porositätsbestimmungen mittels Quecksilberdruckporosimetrie, mikroskopischer Analysen (Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie - REM) und spektroskopischer Elementanalysen (energie-dispersive Röntgenspektroskopie - EDX, laserinduzierte Plasmaspektroskopie - LIBS) untersucht.

Durch die innovative LIBS-Methode wurden erste Versuche durchgeführt, um die Sulfatverteilung (vgl. Kapitel 5.6) an repräsentativen Betonoberflächen zu ermitteln.

6.6.1. Porosität und Porengrößenverteilung

Die Porosität des Betongefüges beeinflusst die Festigkeit maßgebend. Bis zu einem w/z -Wert von ca. 0,4 wird bei Portlandzement das Wasser während der Hydratation chemisch und in den Gelporen gebunden. Bei höheren w/z -Werten wird das überschüssige Wasser an die Oberfläche transportiert und hinterlässt Kapillarporen. [42]

Der Einfluss der Verdichtung kann im vorliegenden Fall vernachlässigt werden, weil die verwendeten Prüfkörper im Transportbetonwerk unter Laborbedingungen vom gleichen Personal hergestellt worden sind.

Durch die Porosität des Betongefüges wird neben der Festigkeit auch die Dauerhaftigkeit (z.B. Carbonatisierung, Frostwiderstand, Eindringen von Chloriden) beeinflusst.

Ziel war es den Einfluss der unterschiedlich porösen Gesteinskörnung in den R- (DR 28, DR 35, Krieger) bzw. Referenzbetonen auf die Porosität des Zementsteins zu untersuchen. Dazu wurden Zementsteinproben an der Phasengrenze zu Ziegelsplitt (DR 28, DR 35, Krieger) und zu rundkörniger Quarzgesteinskörnung sowie Kalksteinsplitt (DN 35, DN 38) analysiert. Es wurde bewusst zusätzlich zu den in Tab. 20 angegebenen R-Betonen von Holcim ein weiterer R-Beton mit 25 % Typ 2 Körnung eines anderen Anbieters (Krieger Beton) in die Gefügeuntersuchungen einbezogen.

Die Porengrößenverteilung wurde mittels Quecksilberdruckporosimetrie nach DIN 66133 [43] bestimmt. Nachfolgend sind die Porengrößenverteilungen dargestellt. Dabei wurden zum Vergleich jeweils 2 Porengrößenverteilungen in einem Diagramm dargestellt.

Nach IUPAC⁷ Definition werden Porengrößen wie folgt eingeteilt:

- Mikroporen, $d \leq 2 \text{ nm}$ ($d \leq 0,002 \text{ }\mu\text{m}$)
- Mesoporen, $2 \text{ nm} \leq d \leq 50 \text{ nm}$ ($0,002 \text{ }\mu\text{m} \leq d \leq 0,05 \text{ }\mu\text{m}$)
- Makroporen, $d \geq 50 \text{ nm}$ ($d \geq 0,05 \text{ }\mu\text{m}$)

Gelporen weisen überwiegend Durchmesser von 1 bis 10 nm auf (Mikro-, Mesoporen). Der Durchmesser von Kapillarporen ist ca. 1000-mal so groß wie der der Gelporen und liegt damit im Mikrometerbereich (Makroporen). [44]

Die Quecksilberdruckporosimetrie ermöglicht die Erfassung von Poren ab einem Durchmesser von 2 nm. Dementsprechend werden die Anteile an Meso- und Makroporen bestimmt.

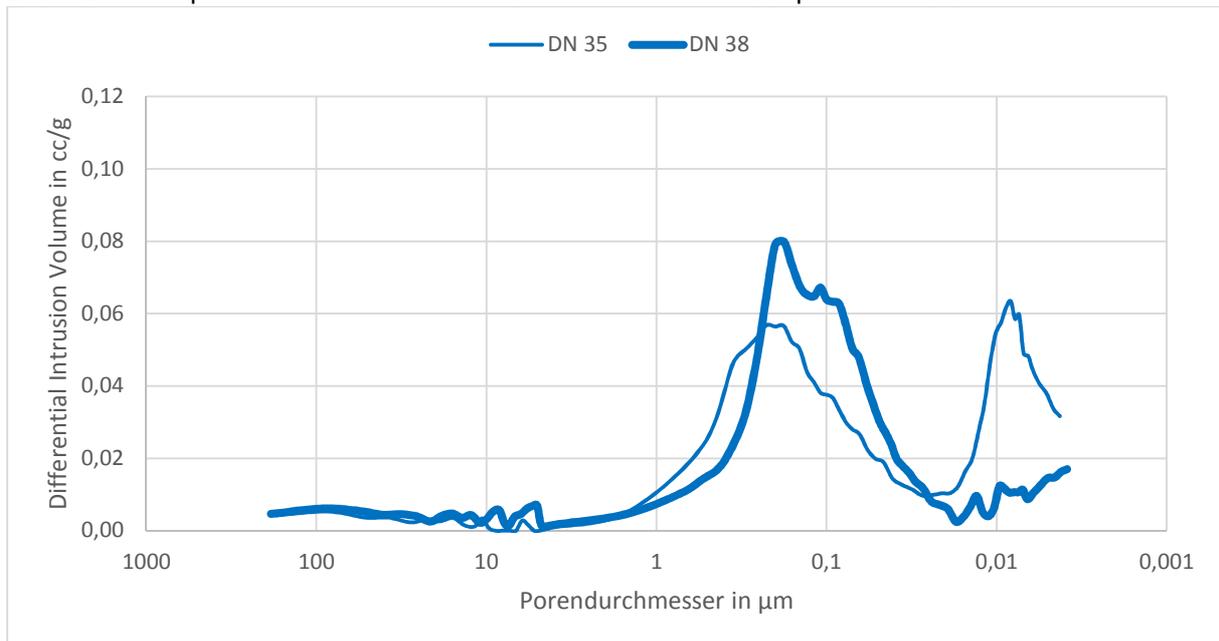


Abb. 62: Porengrößenverteilungen der Referenzbetone DN 35 und DN 38

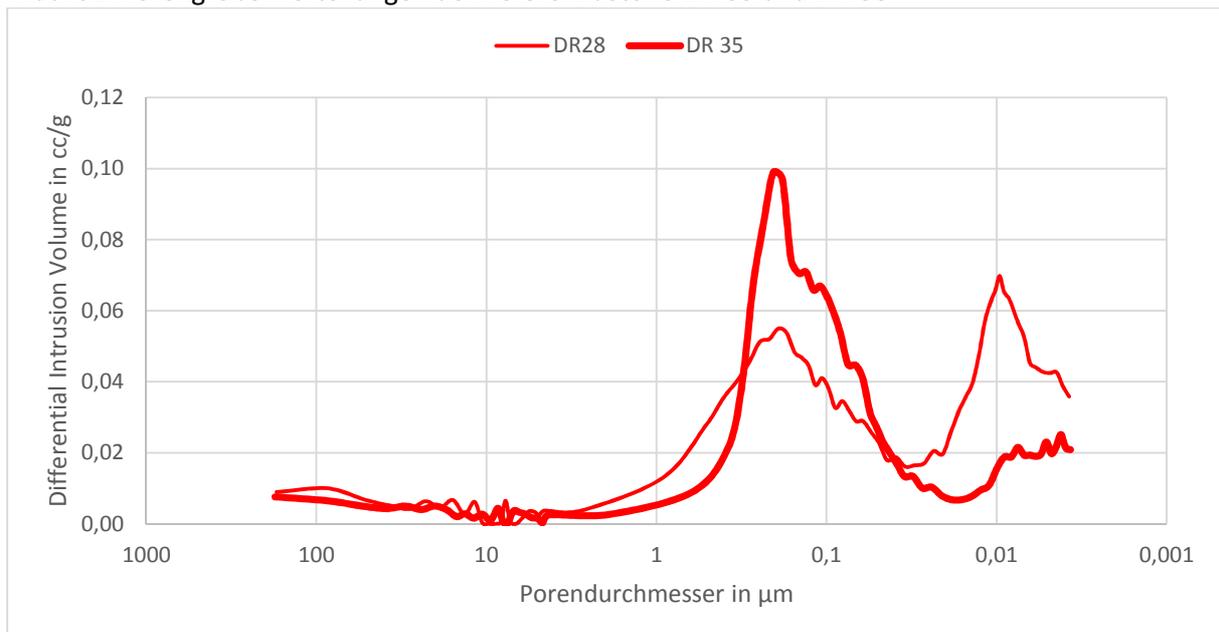


Abb. 63: Porengrößenverteilungen der R-Betone DR 35 und DR 28

⁷ IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry

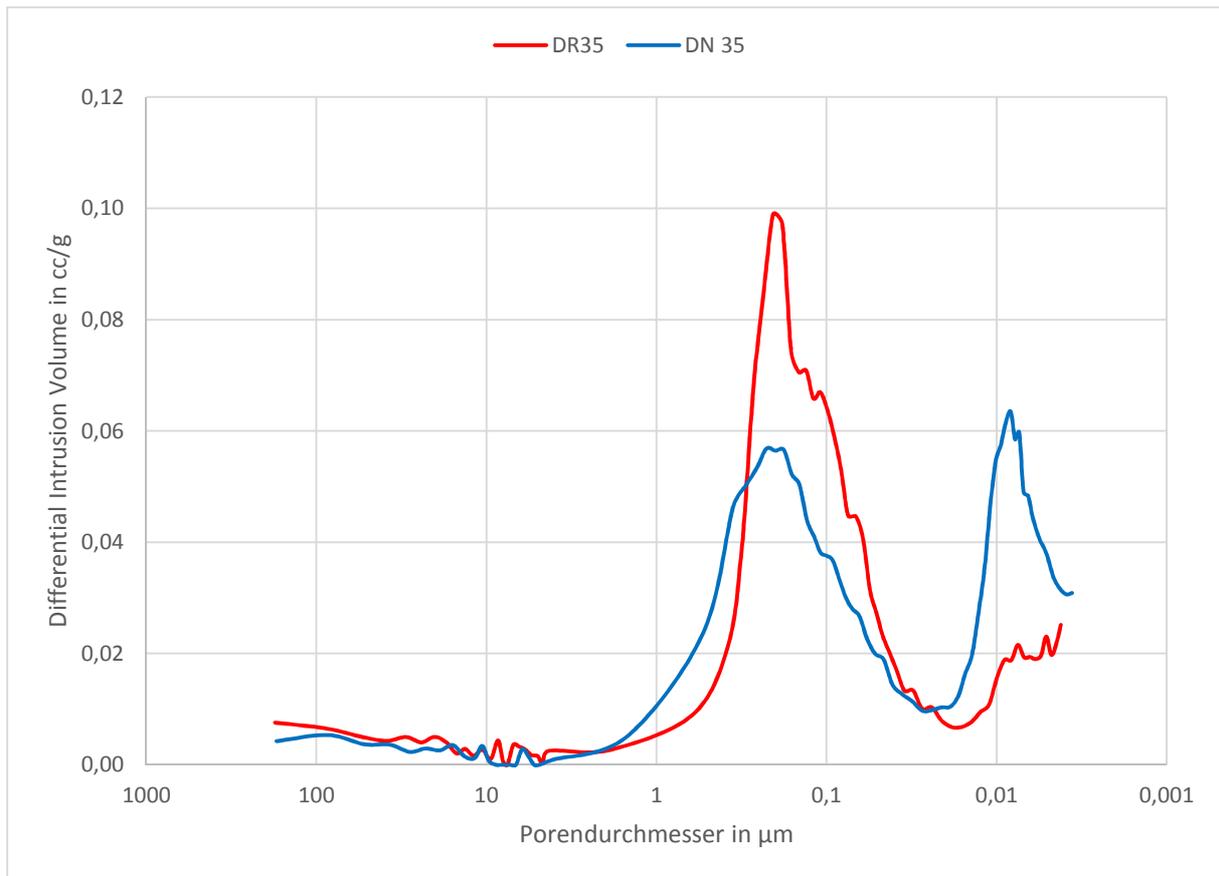


Abb. 64: Porengrößenverteilungen des R-Betons DR 35 und des Referenzbetons DN 35

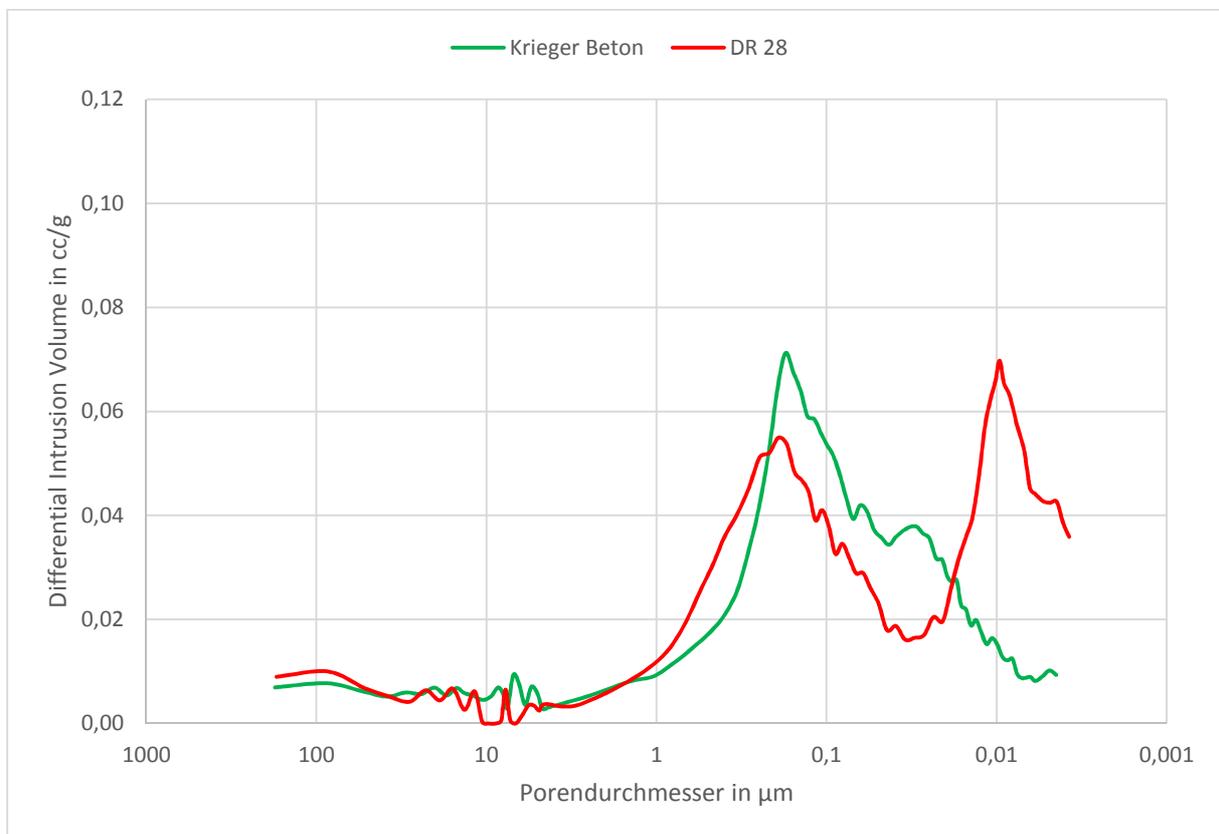


Abb. 65: Porengrößenverteilungen der R-Betone DR 28 und Krieger-Beton

Tab. 23: Auswertung der Porengrößenverteilungen

	DN35	DN38	DR28	DR35	Krieger K1 ¹
w/z Wert	0,58	0,58	0,66	0,59	0,59
Steinkohlenflugasche	nein	nein	ja	ja	ja
Mittler Porendurchmesser	0,02 µm	0,04 µm	0,02 µm	0,04 µm	0,04 µm
Median Porendurchmesser	0,005 µm	0,005 µm	0,005 µm	0,005 µm	0,006 µm
Gesamtporosität	19,5 %	17,7 %	23,0 %	18,6 %	19,4 %
Rohdichte Zementstein	2,25 g/cm ³	2,26 g/cm ³	2,26 g/cm ³	2,21 g/cm ³	2,21 g/cm ³
Relativer Anteil an der Gesamtporosität					
Mesoporen/ Gelporen, 2 nm ≤ d ≤ 50 nm	37,6 %	17,5 %	41,4 %	20,5 %	28,2 %
Makroporen/ Kapillarporen, d ≥ 50 nm	62,4 %	82,5 %	58,6 %	79,5 %	71,8 %
Absoluter Anteil an der Gesamtporosität					
Mesoporen/ Gelporen, 2 nm ≤ d ≤ 50 nm	7,3 %	3,1 %	9,5 %	3,8 %	5,5 %
Makroporen/ Kapillarporen, d ≥ 50 nm	12,2 %	14,6 %	13,5 %	14,8 %	13,9 %

¹ R-Beton, C25/30, Zementanteil: 290 kg/m³, Flugascheanteil: 70 kg/m³, 20 kg/m³ Kalksteinmehl, 25 % Anteil an RC-Körnung Typ 2

Das Maximum der Porendurchmesser liegt bei allen untersuchten Proben bei ca. 0,2 µm. Die Porengrößenverteilung der Proben DR 28 und DN 35 sind bimodal und weisen ein zweites Maximum bei ca. 0,01 µm auf. Aus Tab. 23 geht hervor, dass diese beiden Proben (DR 28 und DN 35) im Vergleich zu den anderen Proben einen geringeren mittleren Porendurchmesser aufweisen.

Aufgrund des im Vergleich höchsten w/z-Wertes weist die Probe DR 28 die höchste Gesamtporosität auf. Bei nahezu gleichen w/z Werten liegen beim R-Beton (DR 35) und den Referenzbetonen (DN 35, DN 38) vergleichbare Gesamtporositäten vor.

Im Vergleich weisen die Referenzbetone DN 35, DN 38 und der R-Beton DR 28 leicht höhere Zementsteinrohdsichten als die R-Betone DR 35 und der R-Beton vom TBW Krieger auf.

Alle untersuchten Proben weisen einen vergleichbaren Kapillarporenanteil auf. Der Anteil an Gelporen unterscheidet sich. An dem Referenzbeton DN 38 und dem R-Beton DR 35 wurden geringere Anteile an Gelporen bestimmt im Vergleich zum R-Beton DR 28 und Referenzbeton DN 35.

Ein Einfluss der unterschiedlich porösen Gesteinskörnungen auf die Porosität des Zementsteins konnte nicht festgestellt werden.

6.6.2. Mikroskopische Analyse

Methoden, Geräte und Ziele

Das Gefüge der R-Betone und Referenzbetone wurde mittels Auflichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie (REM) dokumentiert. Zur Identifikation einzelner Bestandteile in den REM Aufnahmen wurde die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) genutzt. Ziel war es den Verbund Zementstein-Gesteinskörnung zu untersuchen, zu vergleichen und zu bewerten.

Die splittige Kornform der Rezyklate kann zu einem besseren Verbund mit dem Zementstein führen. Der Zementleim dringt in die vorgehätsste poröse Struktur der Rezyklate ein, was zu einem besseren Verbund im Vergleich zu weniger und anders porösen, natürlichen Gesteinskörnungen führen kann.

Anhand der mikroskopischen Untersuchungen im Auflicht an gesägten Oberflächen sollte der bereits mit bloßem Auge deutlich erkennbare sehr gute Verbund zwischen dem Zementstein und den Ziegelsplittanteilen sowie den Betonanteilen der Typ 2 Körnung näher beschrieben werden. Um die störenden Feinstpartikel nach dem Sägen der Proben zu entfernen, wurden die Betonoberflächen mittels Ultraschallbad gereinigt. Die aufgrund der größeren offenen Poren an der Ziegelsplitt-Oberfläche bessere physikalische Verbundwirkung konnte mittels lichtmikroskopischer Methoden nicht detailliert genug beschrieben werden, weshalb zusätzlich die Möglichkeiten der REM genutzt wurden.

Der Verbund ist so gut, dass die Phasengrenze allein mit den Rückstreubildern schwer zu erkennen war. Aus diesem Grund wurden Bereiche mit Silbertropfen markiert und dort ein sogenanntes Element-Mapping anhand der EDX-Analysen abgebildet. Dafür wurden die Elemente Silicium und Calcium ausgewählt, da sich anhand dieser Elemente der calciumreiche Zementstein mit seinen C-S-H-Phasen und dem Calciumhydroxid deutlich von dem siliciumreicheren Ziegelmaterial unterscheiden lässt.

Die lichtmikroskopischen Aufnahmen wurden mit dem Lichtmikroskop „Olympus SZX10“ an der HTWG Konstanz durchgeführt. Die REM/EDX Untersuchungen erfolgten am Institut für Werkstoffsystemtechnik Thurgau (= An-Institut der HTWG Konstanz).

Für eine noch detailreichere Darstellung des Verbundbereichs wurden eine alternative Präparationsmethode und eine weitere REM-Geräte-Konfiguration verwendet. Dafür wurden aus den Betonprobekörpern repräsentative Proben heraus gesägt, um anschließend mittels einer Feinsäge ungestörte Proben mit Abmessungen von ca. 1 x 1 x 1 cm³ zu präparieren. Daraufhin erfolgte ein Anschliff bzw. Polieren der Oberfläche, eine dünne Beschichtung mit Gold zur Ausbildung einer guten elektrischen Leitfähigkeit und ein Einbetten der Proben in einen Kunstharz.

Die REM Untersuchungen erfolgten an einem ultrahochauflösenden Rasterelektronenmikroskop unter Hoch- und Niedrigvakuumbedingungen Nova NanoSEM 230 der Firma FEI am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar.

Untersuchte Betone

In diesen Analysen wurden folgende Proben berücksichtigt:

- R-Betone DR 28, DR 35, DR 320
- Referenzbetone DN 35, DN 38
- R-Beton Ökostone (siehe Kapitel 8.1)
- Historischer Ziegelsplittbeton aus dem Technischen Rathaus Tübingen (Kapitel 7.1)

Ergebnisse

Nachfolgend sind die licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der untersuchten Proben dargestellt. In der EDX-Analyse (Mapping) wurden Calcium und Silicium detektiert, um die vorliegenden Bestandteile dem Zementstein (Calcium) und der Gesteinskörnung (Silicium) zuzuordnen. In den Abbildungen der EDX-Analysen wurde das Calcium grün und das Silicium rot eingefärbt dargestellt.

In den Ergebnissen der Untersuchungen an der Bauhaus-Universität Weimar wurden die jeweiligen sichtbaren Phasenbestandteile in den Abbildungsbeschreibungen verzeichnet.

Verbundbereich Zementstein-Ziegelsplitt



Abb. 66: lichtmikroskopische Aufnahme DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

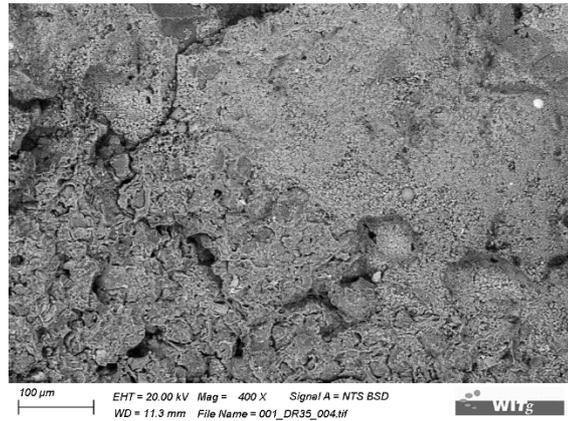


Abb. 67: REM Aufnahme DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 400-fach



Abb. 68: EDX Analyse DR 35, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Ziegelgesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 400-fach

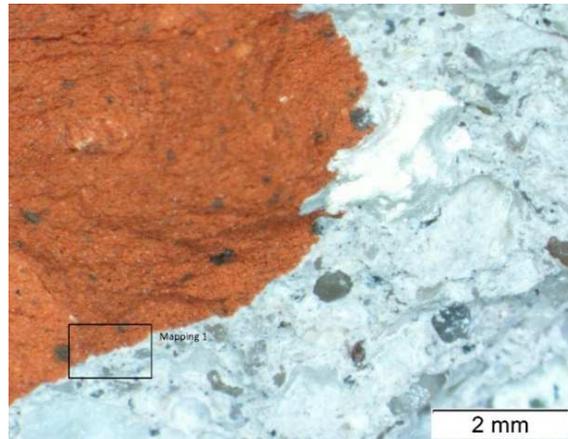


Abb. 69: lichtmikroskopische Aufnahme DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

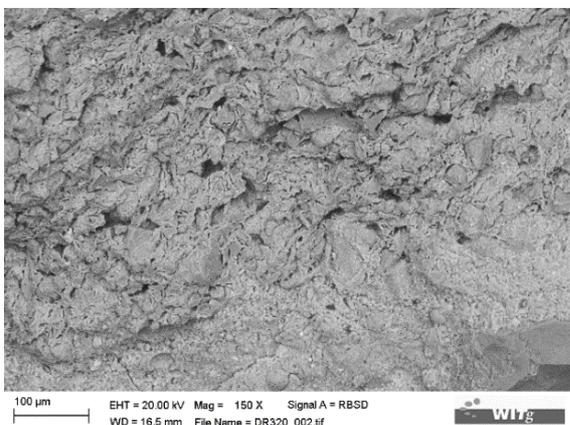


Abb. 70: REM Aufnahme DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach

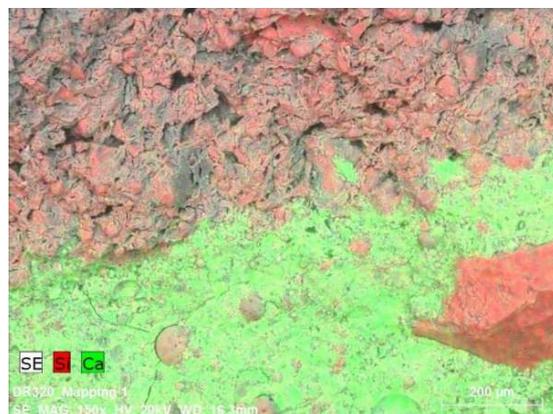


Abb. 71: EDX Analyse (Mapping 2) DR 320, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Ziegelgesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach



Abb. 72: lichtmikroskopische Aufnahme Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

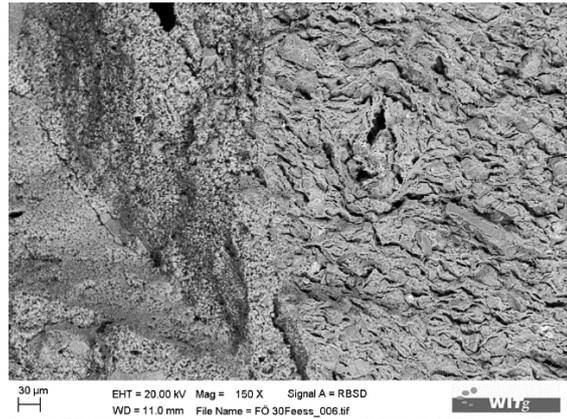


Abb. 73: REM Aufnahme Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach

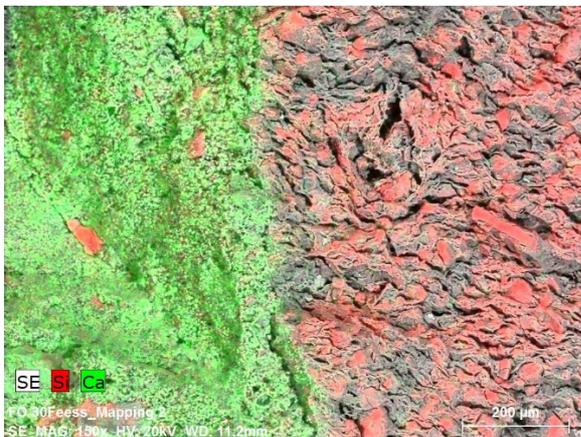


Abb. 74: EDX Analyse Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach

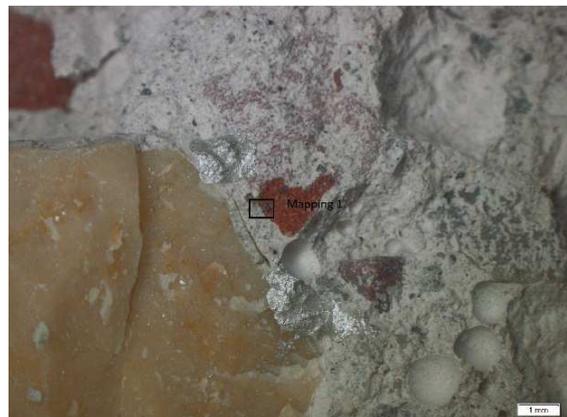


Abb. 75: lichtmikroskopische Aufnahme Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

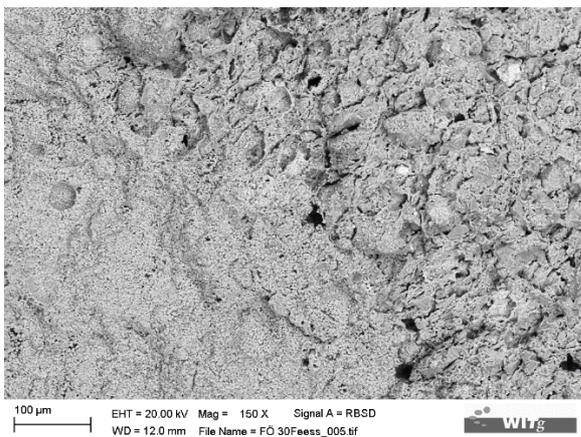


Abb. 76: REM Aufnahme Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, Vergrößerung 150-fach

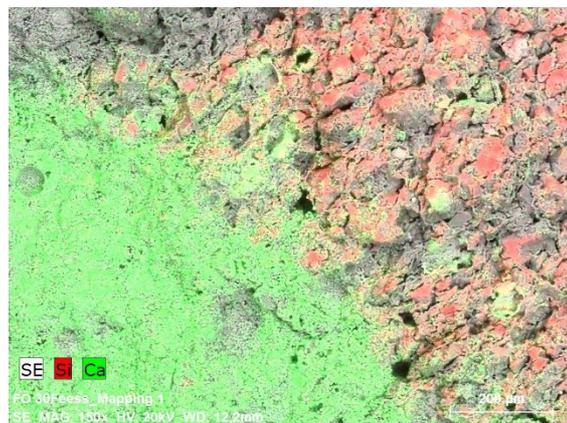


Abb. 77: EDX Analyse Ökosteine, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach

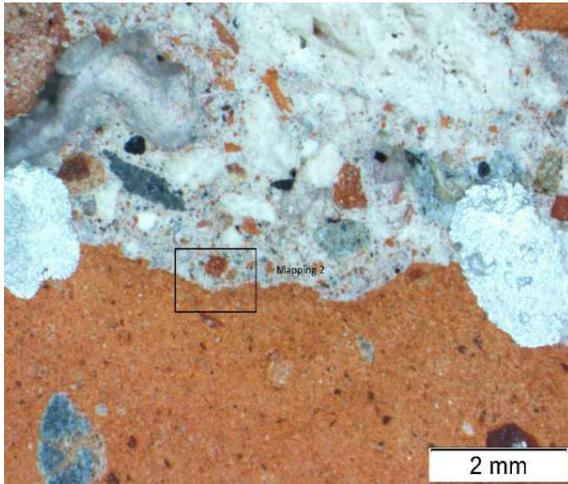


Abb. 78: lichtmikroskopische Aufnahme R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Ziegelgesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

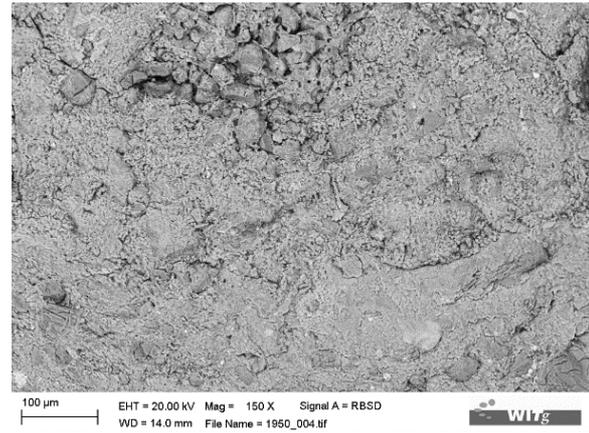


Abb. 79: REM Aufnahme R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, Vergrößerung 150-fach

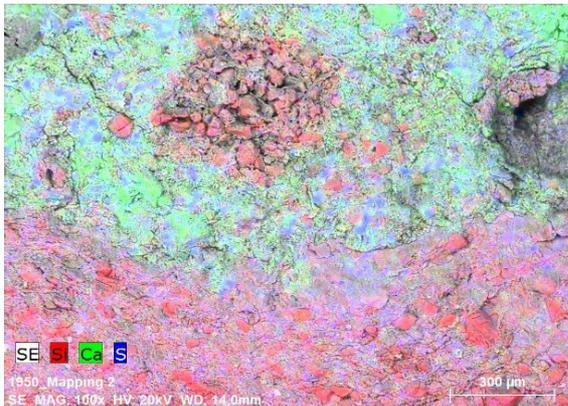


Abb. 80: EDX Analyse R-Beton Rathaus Tübingen, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 100-fach

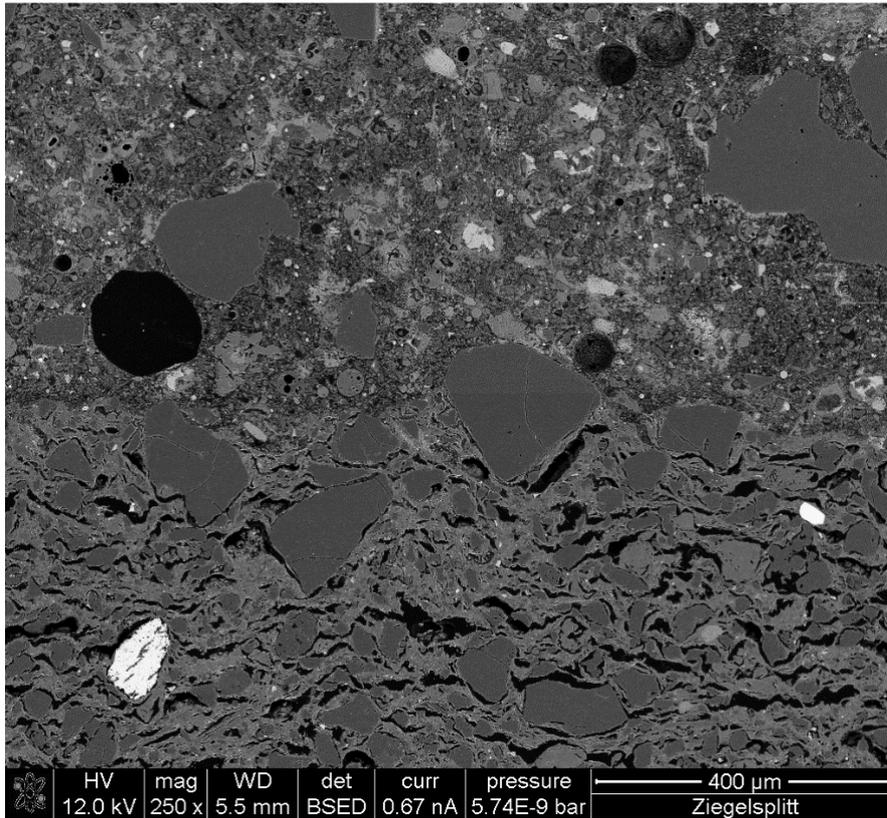


Abb. 81: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 250-fach, guter Verbund zwischen Zementsteinmatrix und Ziegelsplitt, Quarzkörner aus dem Ziegelsplitt an Grenzfläche, im porösen Zementstein sind recht viele Flugaschepartikel enthalten

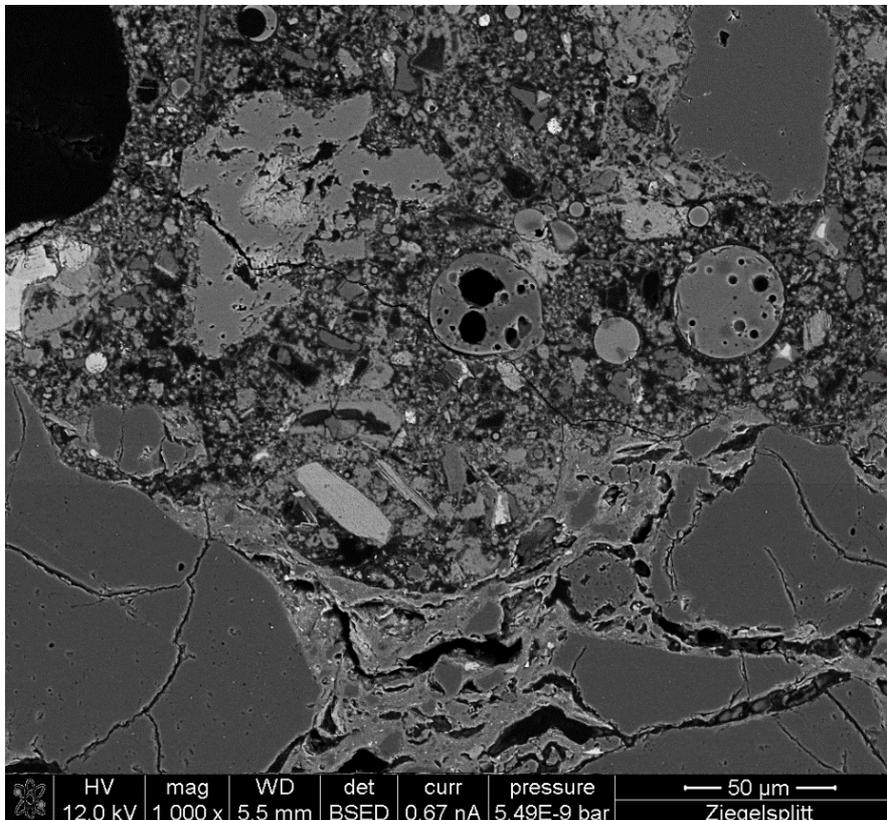


Abb. 82: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, guter Verbund zwischen Ziegelsplitt und Zementsteinmatrix, Flugaschepartikel in Zementsteinmatrix

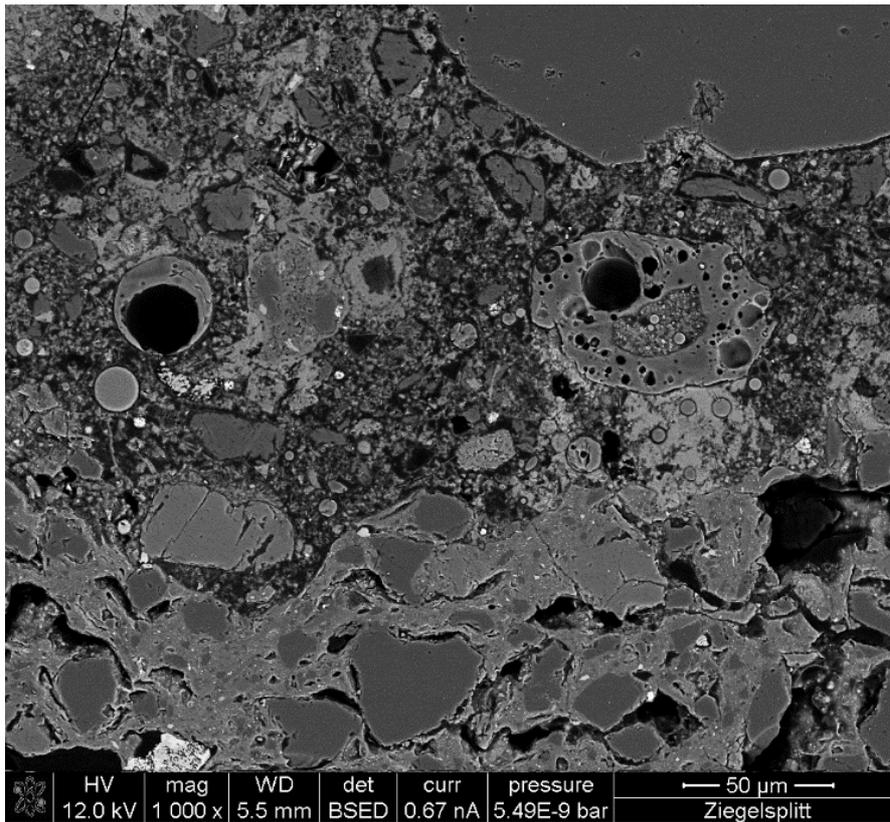


Abb. 83: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, guter Verbund zur Zementsteinmatrix, viele Flugaschepartikel in der Zementsteinmatrix, vereinzelt Portlanditanreicherungen (hellgrau)

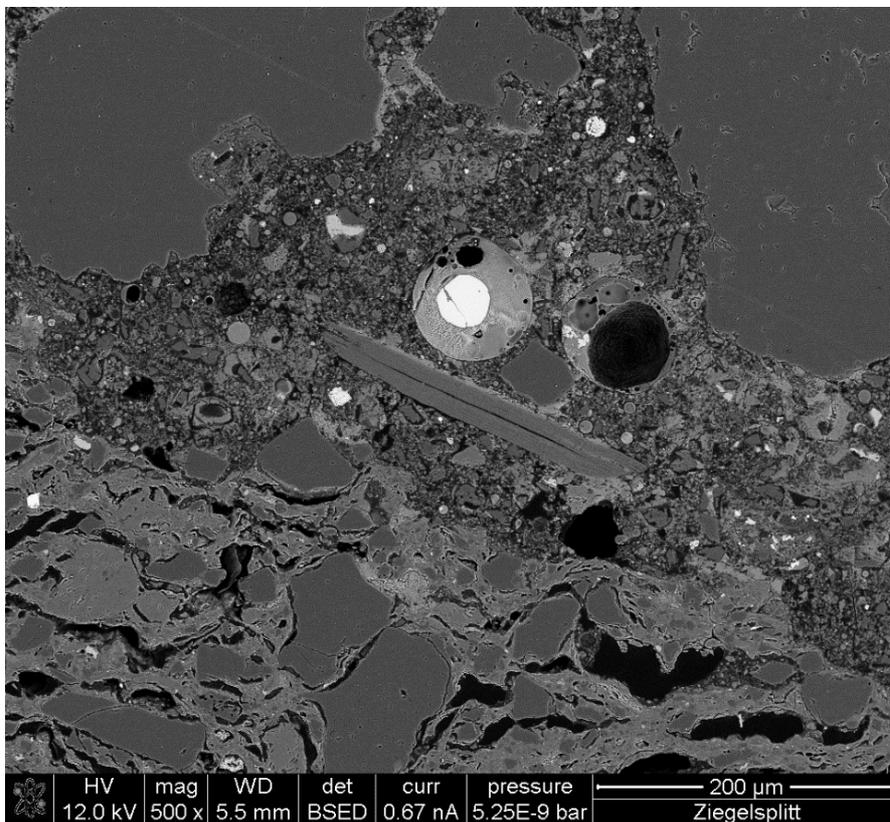


Abb. 84: REM Aufnahme DR 28, unten Ziegelsplitt, mittig Zementstein, Vergrößerung 500-fach, guter Verbund zur Zementsteinmatrix

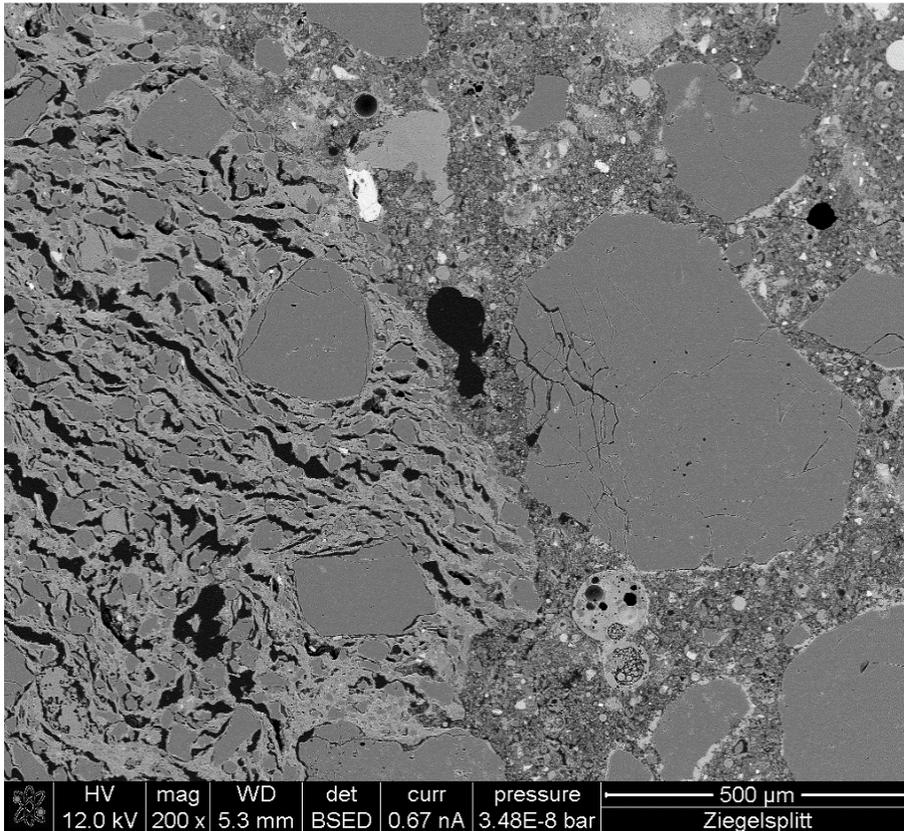


Abb. 85: REM Aufnahme DR 28, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche

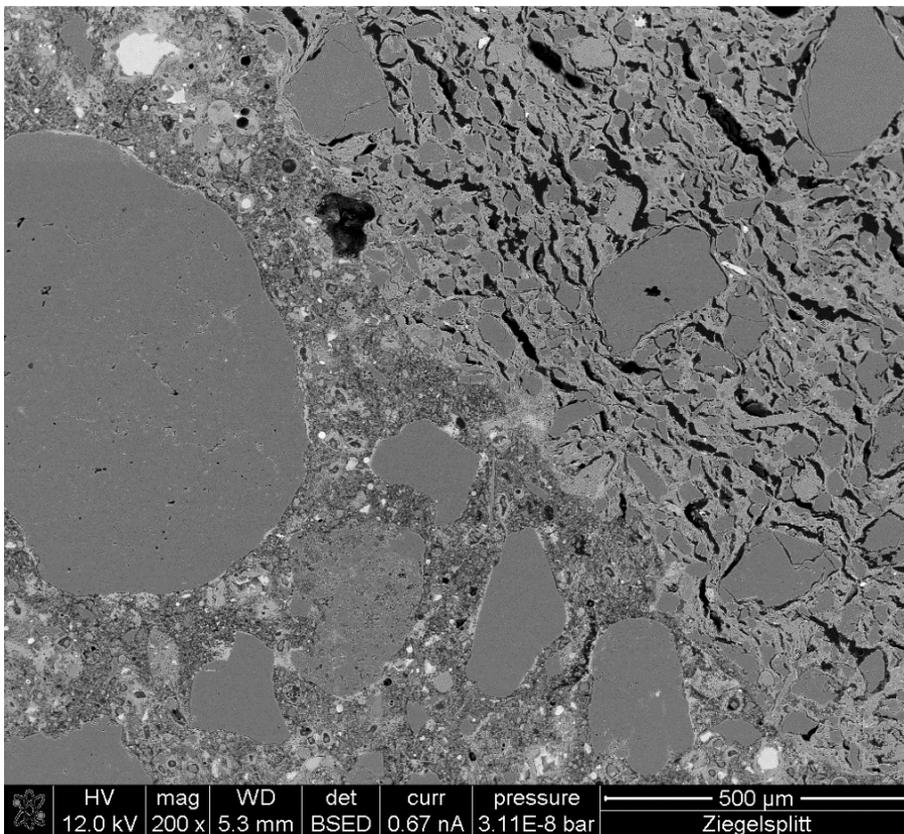
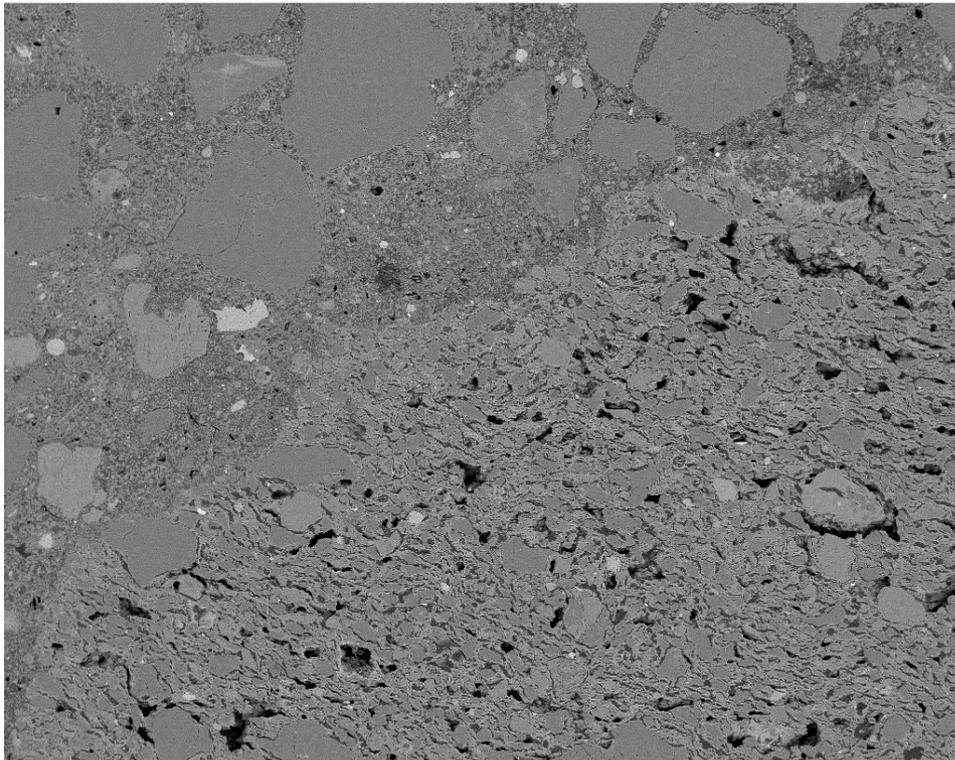
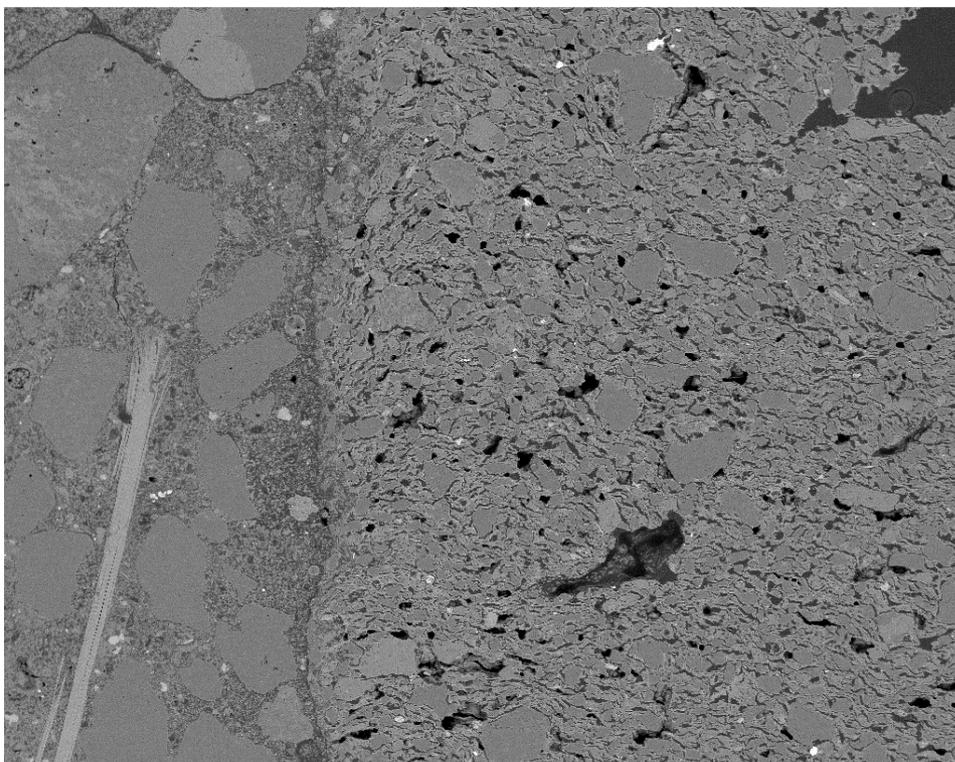


Abb. 86: REM Aufnahme DR 28, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche



Mic	HV	WD	Mag	Det	DR35
XL	15 kV	9,8 mm	50 x	BSE	—500 µm—

Abb. 87: REM Aufnahme DR 35, rechts/unten Ziegelsplitt, links/oben Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche



Mic	HV	WD	Mag	Det	DR35
XL	15 kV	9,8 mm	50 x	BSE	—500 µm—

Abb. 88: REM Aufnahme DR 35, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, links/oben Riss zwischen Zementsteinmatrix und Quarz bzw. Feldspat

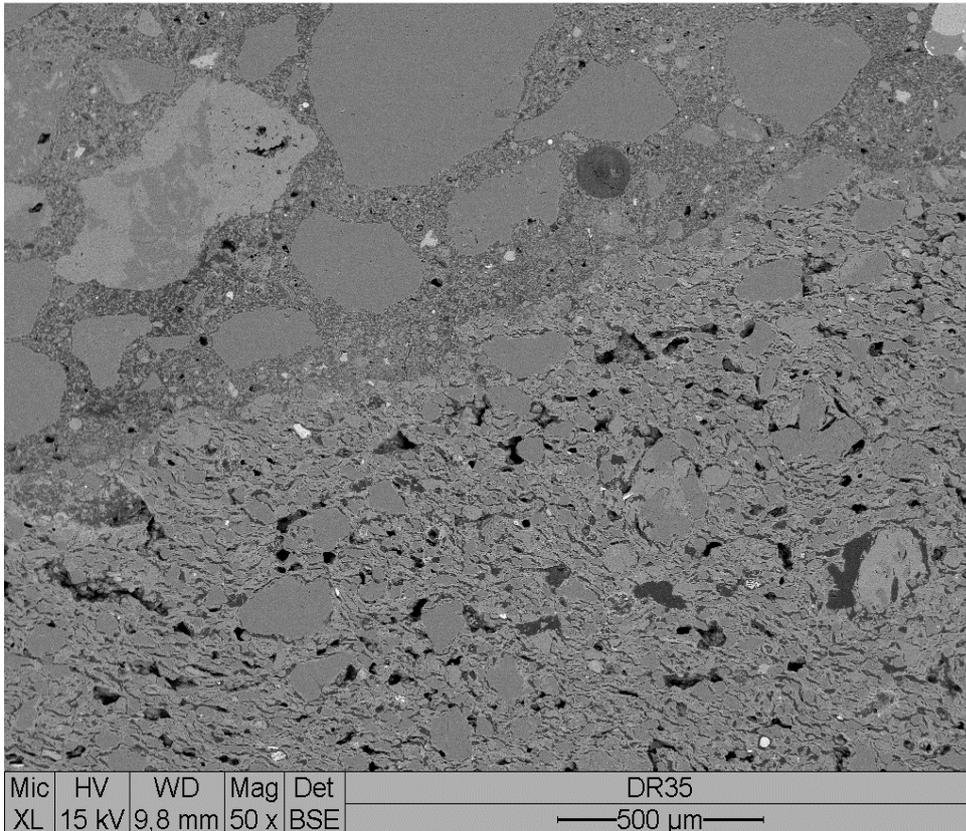


Abb. 89: REM Aufnahme DR 35, rechts/unten Ziegelsplitt, links/oben Zementsteinmatrix, Vergrößerung 50-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche

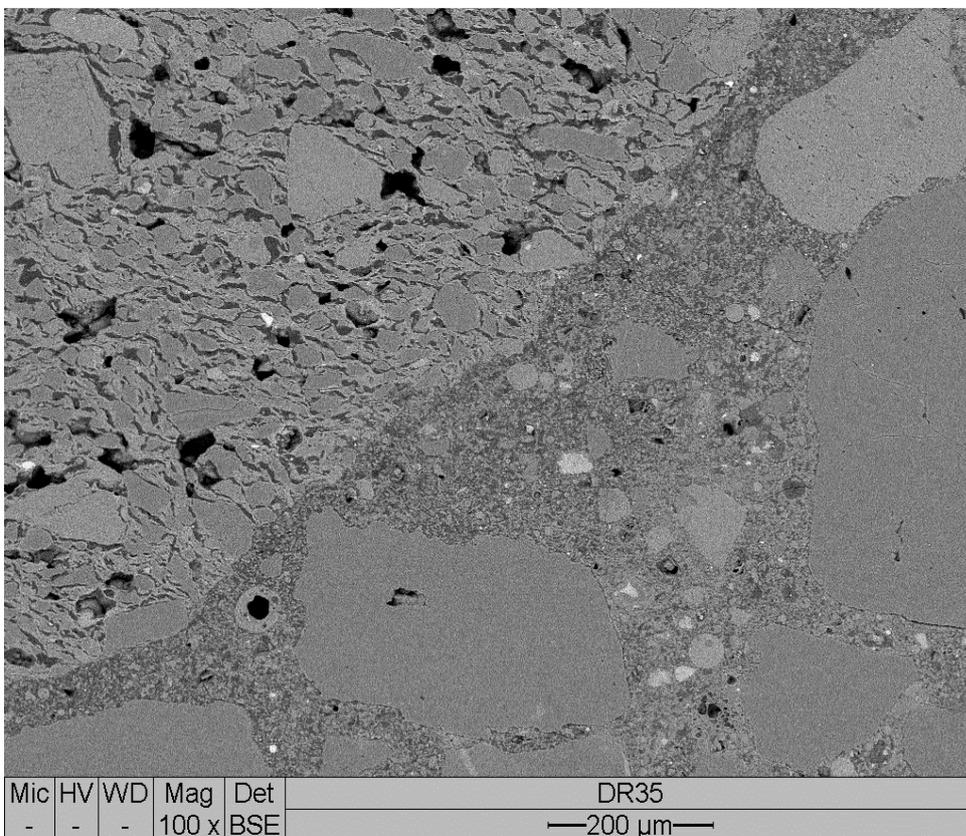


Abb. 90: REM Aufnahme DR 35, links/oben Ziegelsplitt, rechts/unten Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche

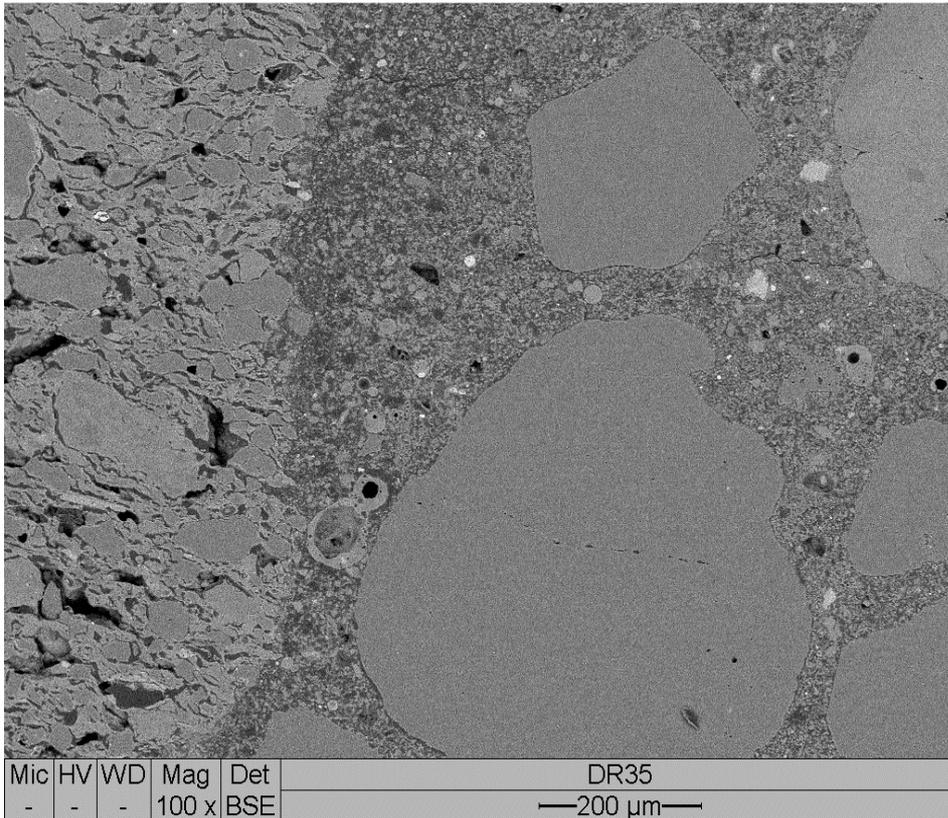


Abb. 91: REM Aufnahme DR 35, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche

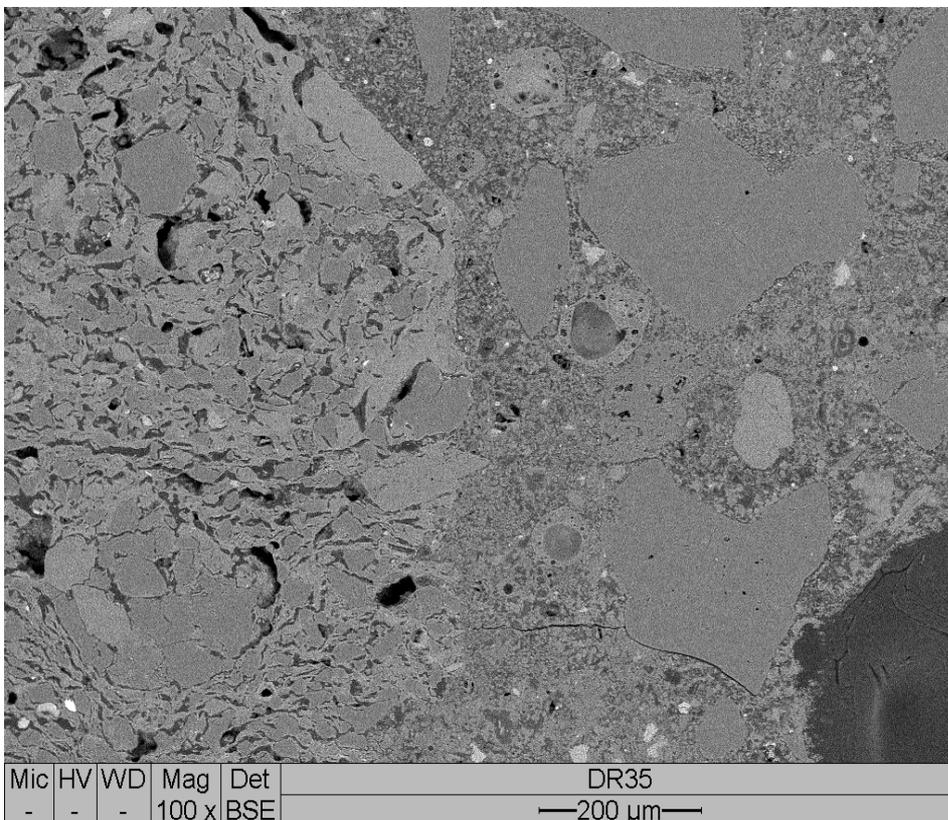


Abb. 92: REM Aufnahme DR 35, links Ziegelsplitt, rechts Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, rechts/unten Riss im Grenzbereich Zementstein/Kalkstein

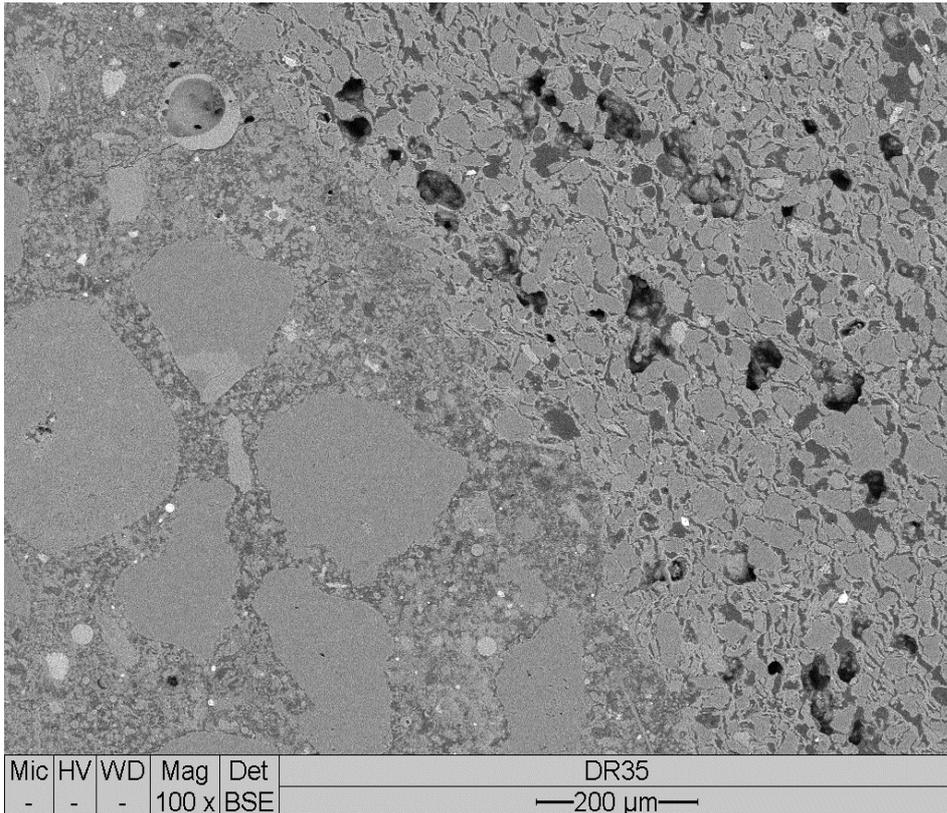


Abb. 93: REM Aufnahme DR 35, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche

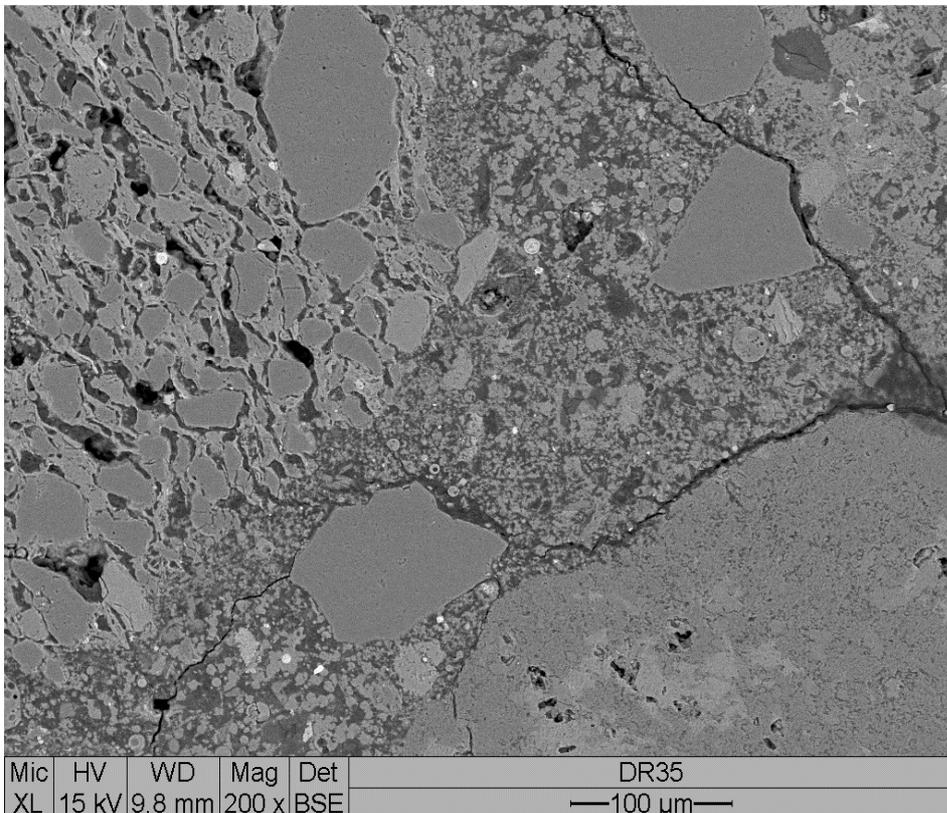


Abb. 94: REM Aufnahme DR 35, links/oben Ziegelsplitt, rechts/unten Zementsteinmatrix, Vergrößerung 100-fach, guter Verbund, wenig Poren an der Grenzfläche, rechts Risse im Grenzbereich Zementstein/Quarz/Kalkstein

Verbundbereich Zementstein-Quarz und Zementstein-Kalkstein

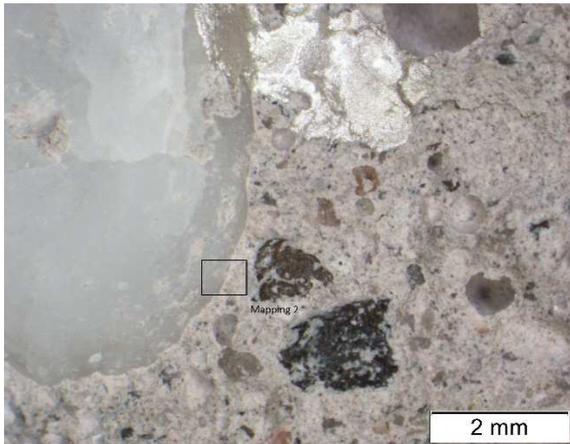


Abb. 95: lichtmikroskopische Aufnahme DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, eingezeichnete Stelle der REM/EDX Analyse, Vergrößerung 10-fach

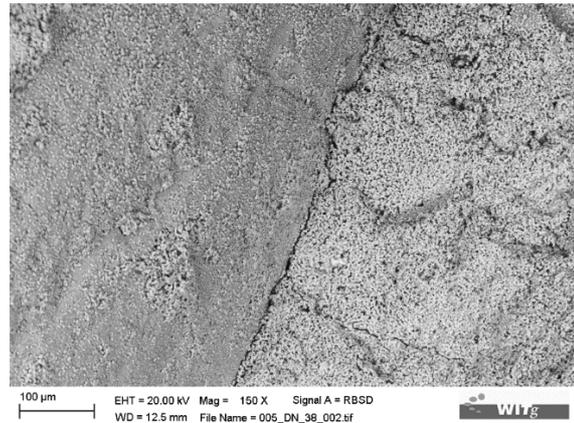


Abb. 96: REM Aufnahme DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, Vergrößerung 150-fach, Riss an im Grenzbereich Quarz/Zementstein



Abb. 97: EDX Analyse DN 38, Verbundbereich Zementstein-Gesteinskorn, rot-Silicium (Gesteinskorn), grün-Calcium (Zementstein), Vergrößerung 150-fach

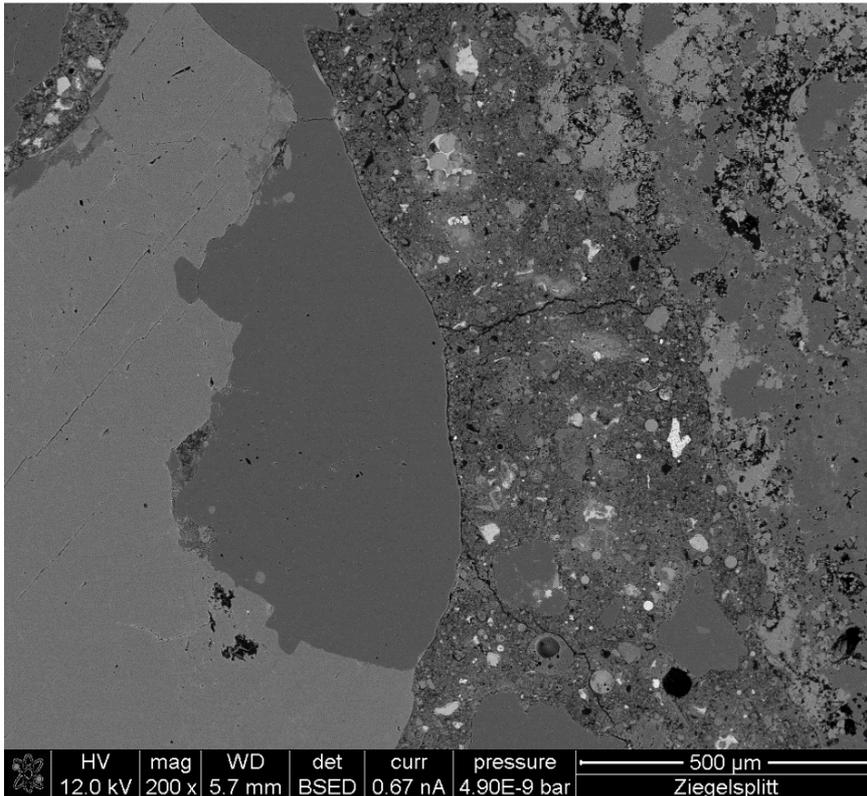


Abb. 98: REM Aufnahme DR 28, links GK Mischung aus K-Feldspat (links/hellgrau) und Quarz (rechts/dunkelgrau), rechts Zementstein, Vergrößerung 200-fach, Risse an der Grenzfläche und innerhalb der Zementsteinmatrix, Rissweite: 4 µm

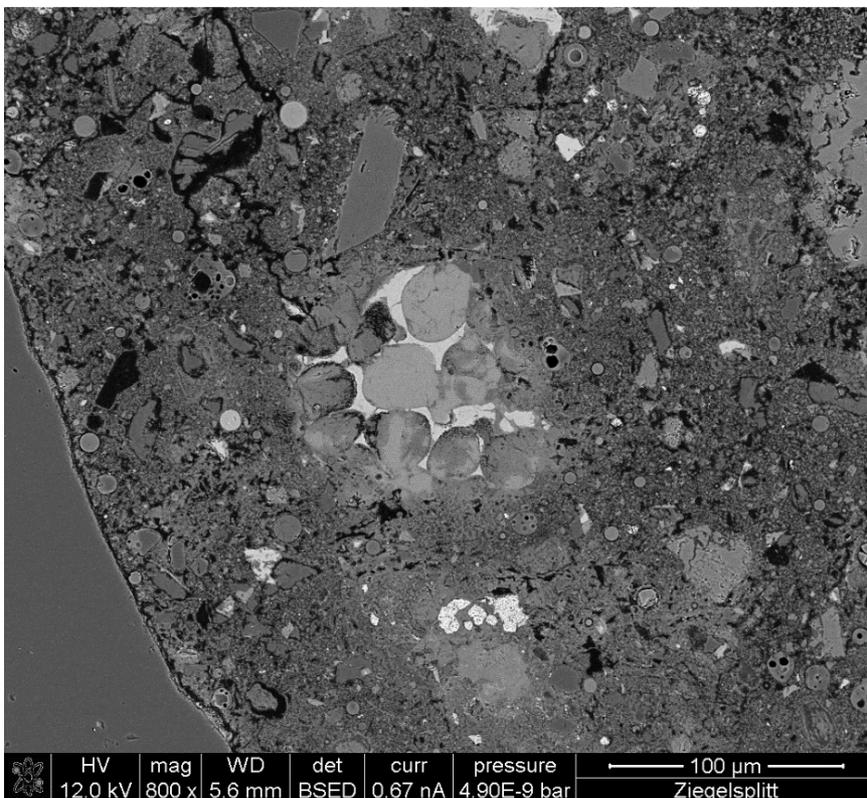


Abb. 99: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 98, helle Bereiche: unhydratisiertes C_2S , links Riss im Grenzbereich zwischen Quarzgesteinskorn und Zementstein, Vergrößerung 800-fach

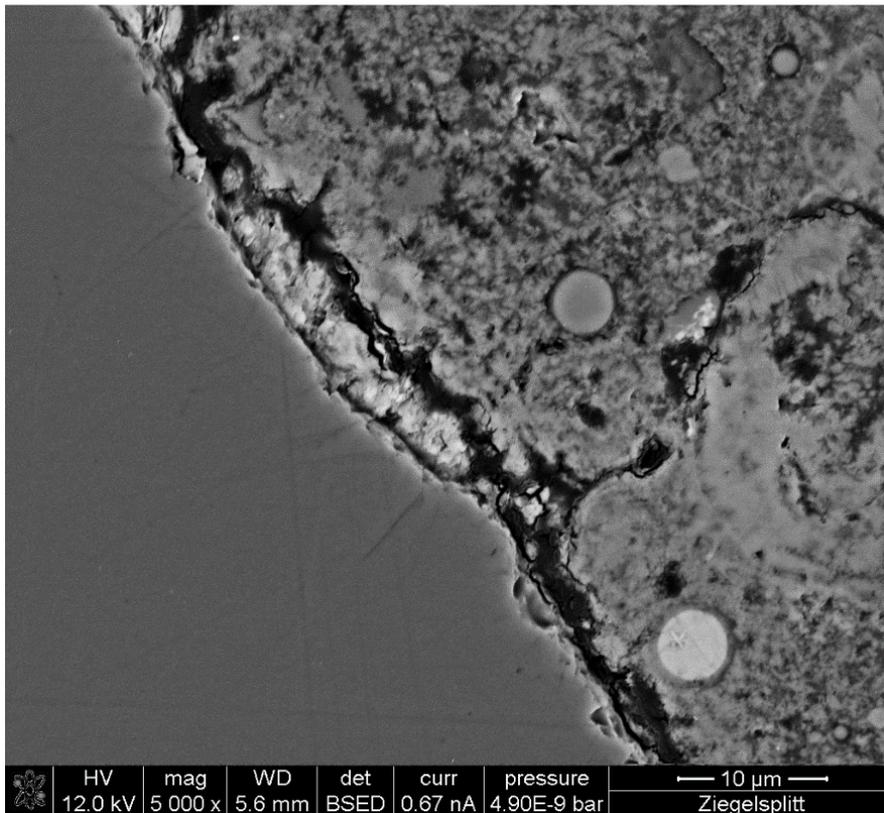


Abb. 100: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 99, Riss zwischen Quarzgesteinskorn (links) und Zementsteinmatrix, Vergrößerung 5000-fach, Riss zum Teil an Grenzfläche (Adhäsionsbruch) und zum Teil in Zementsteinmatrix (Kohäsionsbruch), unten rechts: Flugaschepartikel mit Reaktionssaum

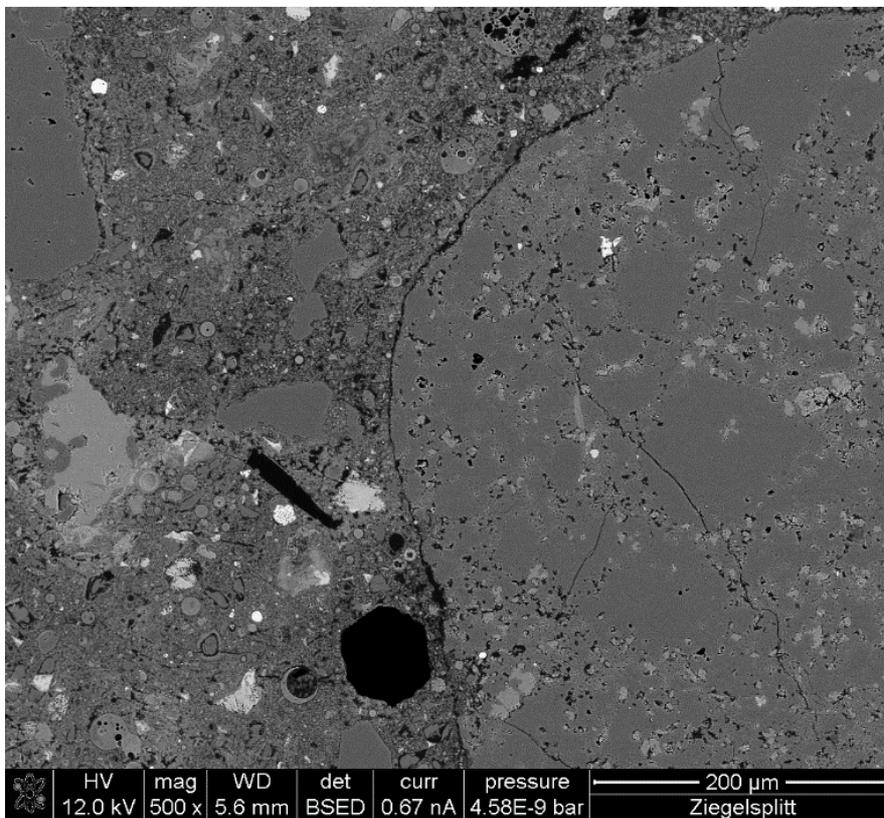


Abb. 101: REM Aufnahme DR 28, rechts Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 500-fach, Riss an Grenzfläche zur Zementsteinmatrix

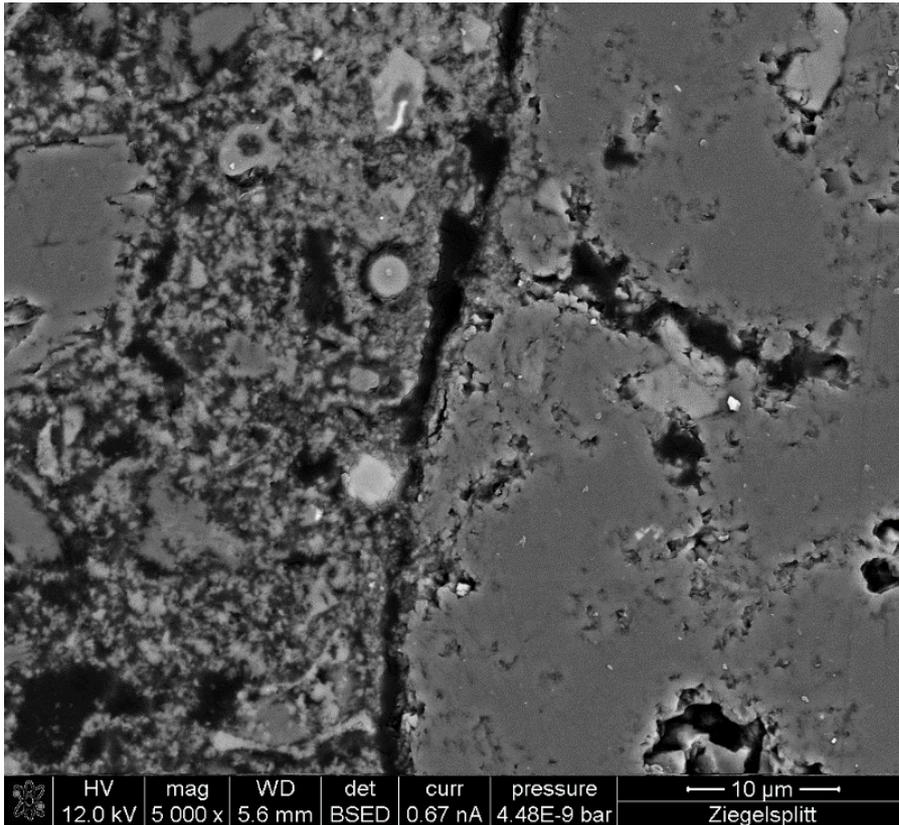


Abb. 102: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 101, rechts Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 5000-fach, teilweise haftet noch Zementstein am Quarz (Kohäsionsbruch)

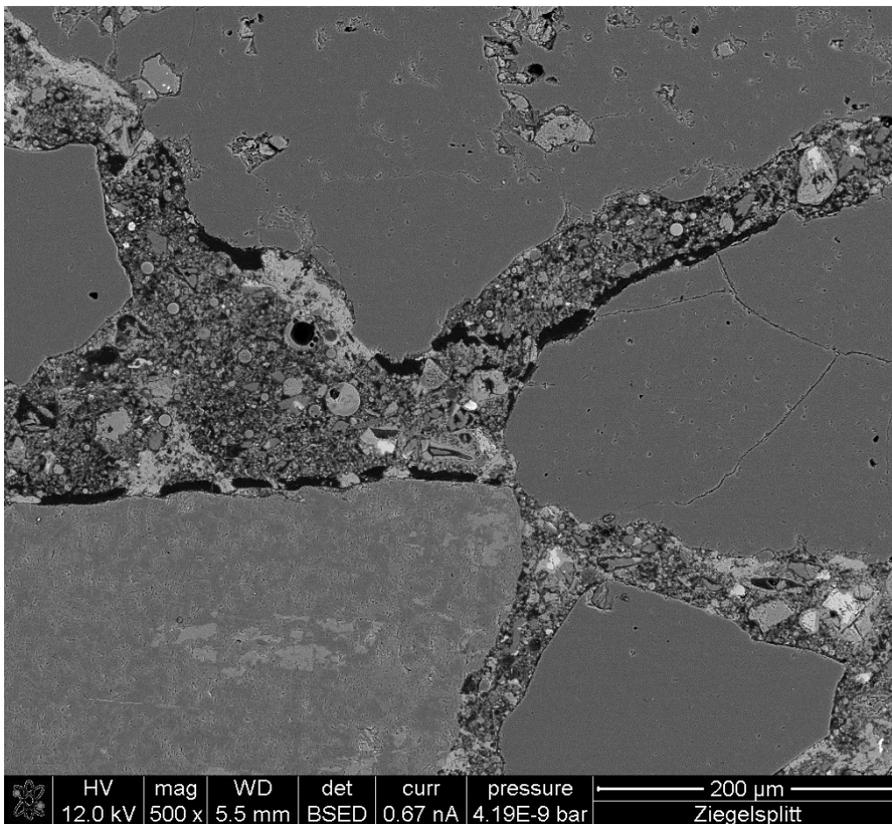


Abb. 103: REM Aufnahme DR 28, links/unten Na-Feldspat, restliche GK Quarz, dazwischen Zementstein, Vergrößerung 500-fach, deutliche Fehlstellen/Risse an den Grenzflächen, zum Teil Brückenbildungen aus Portlandit

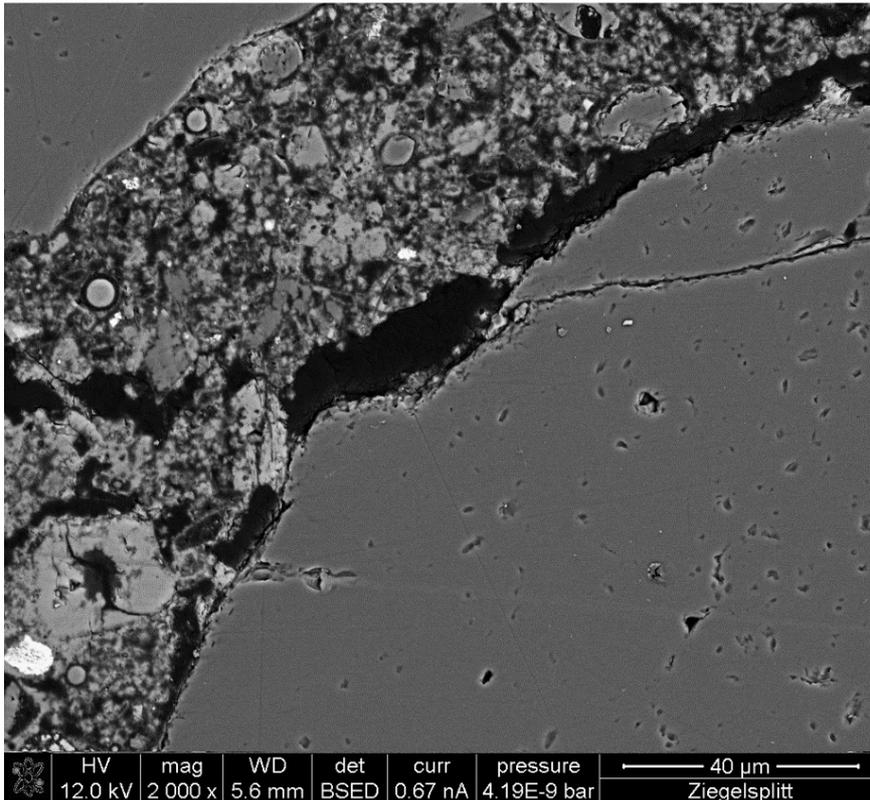


Abb. 104: REM Aufnahme DR 28, Detail zu Abb. 103, rechts/unten Quarz, links Zementstein, Vergrößerung 2000-fach, Riss an Grenzfläche, Brückenbildung aus Portlandit, teilweise Adhäsions- oder Kohäsionsbruch

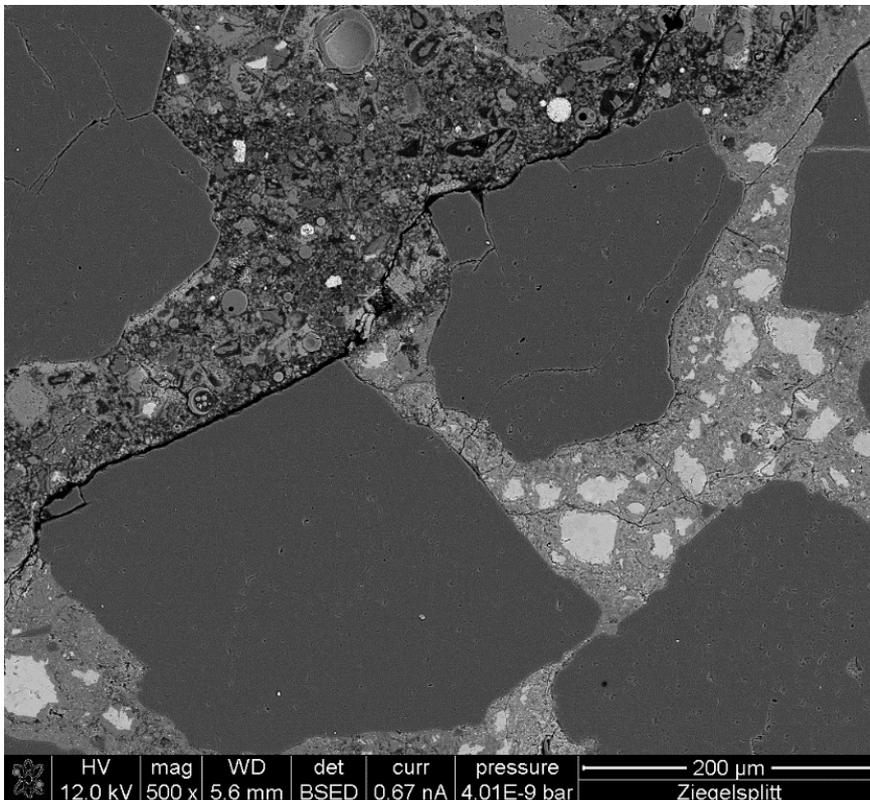


Abb. 105: REM Aufnahme DR 28, rechts/unten: GK aus rezykliertem Betonbruch, oben/dunkelgrau: neue Zementsteinmatrix, Vergrößerung 500-fach, Risse im Grenzbereich Quarz (im rezykliertem Betonbruch) zur neuen Zementsteinmatrix

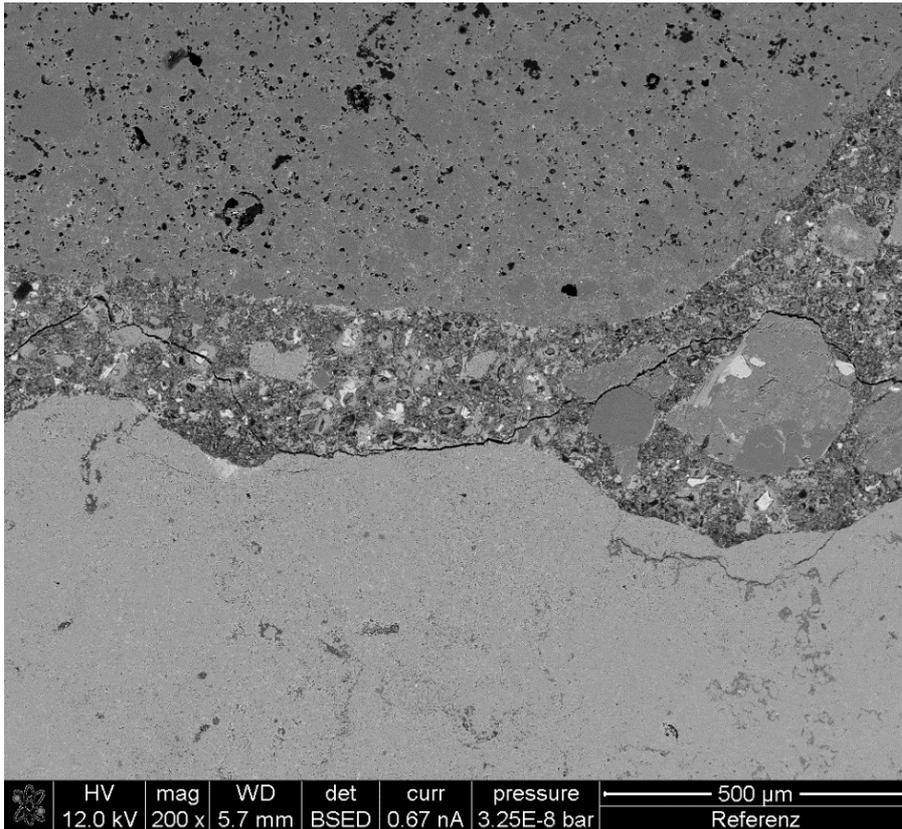


Abb. 106: REM Aufnahme DN 35, unten Kalkstein, mittig Zementstein, oben Quarz, Vergrößerung 200-fach, Risse an Grenzflächen und in Zementsteinmatrix, hauptsächlich Adhäsionsbruch

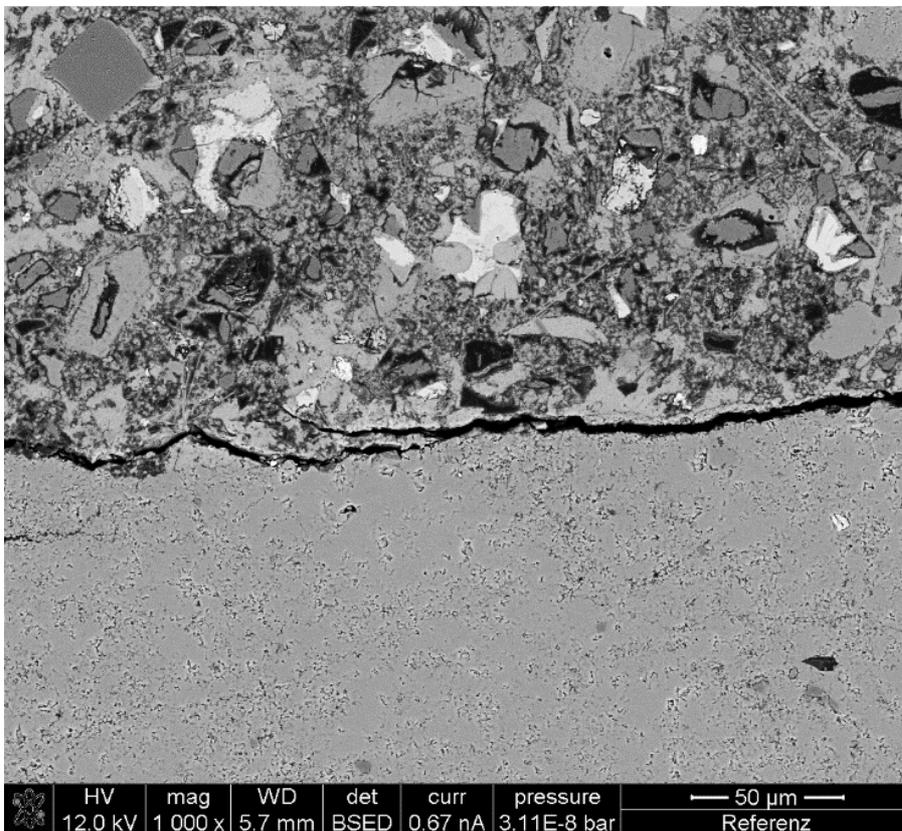


Abb. 107: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 106, unten Kalkstein, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Riss an Grenzfläche

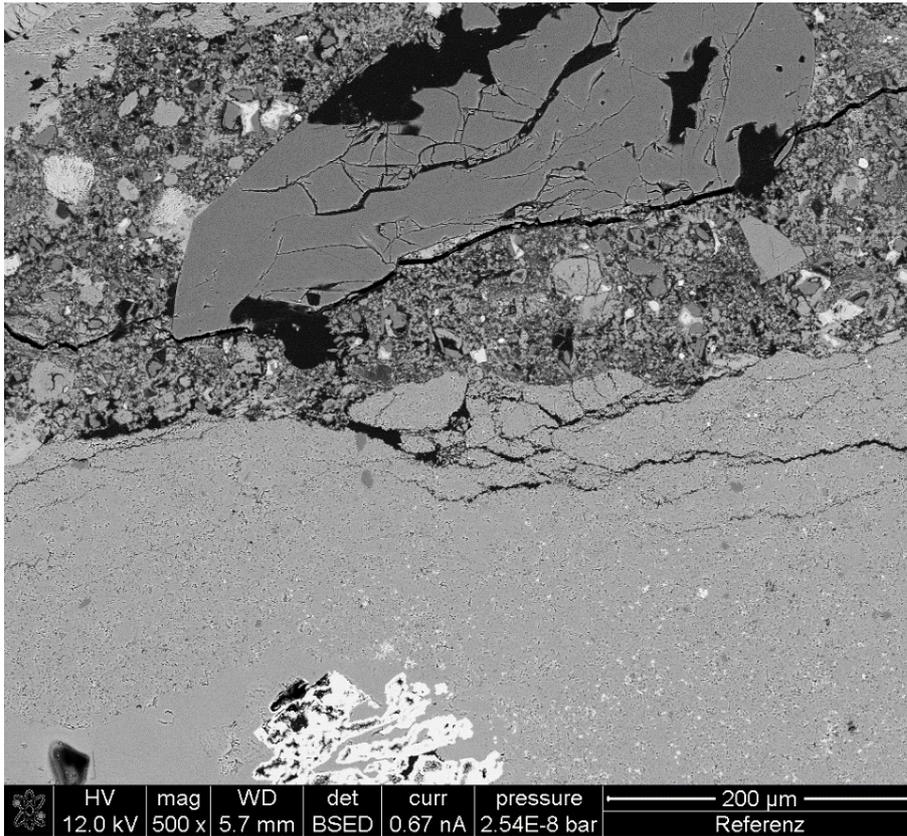


Abb. 108: REM Aufnahme DN 35, oben Quarz, mittig Zementstein, unten Kalkstein, Vergrößerung 500-fach, Risse an Grenzflächen, Störungen in GK

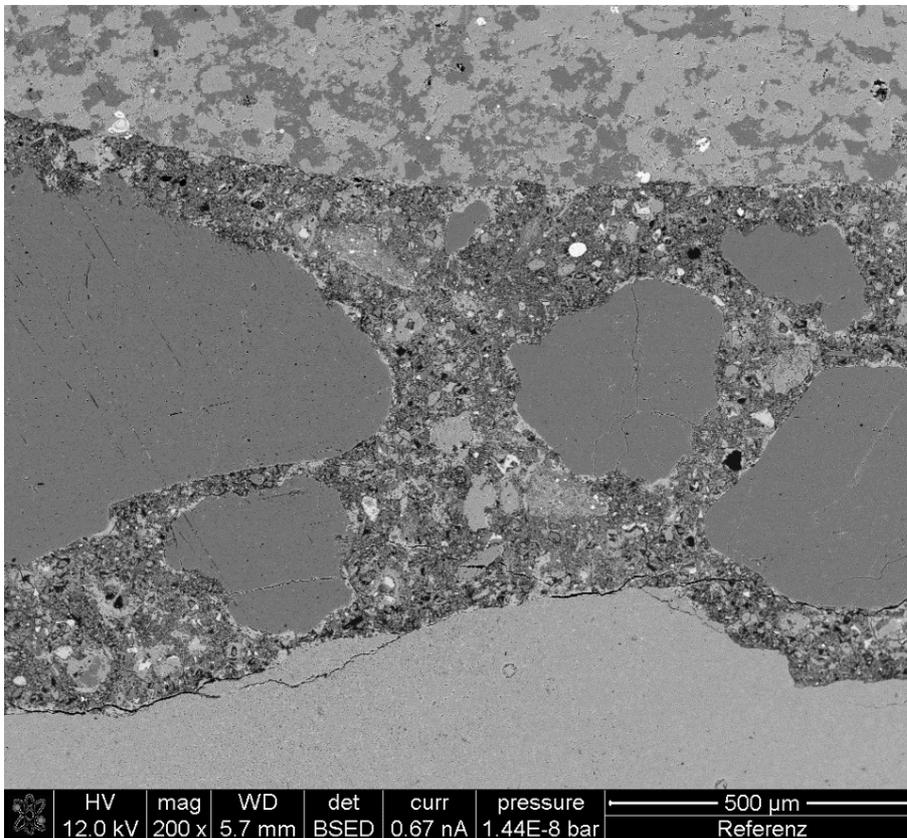


Abb. 109: REM Aufnahme DN 35, oben Mischung aus Kalkstein und Quarz, mittig Quarz und Zementstein, unten Kalkstein, Vergrößerung 200-fach, Risse an Grenzflächen zu Quarz und Kalkstein

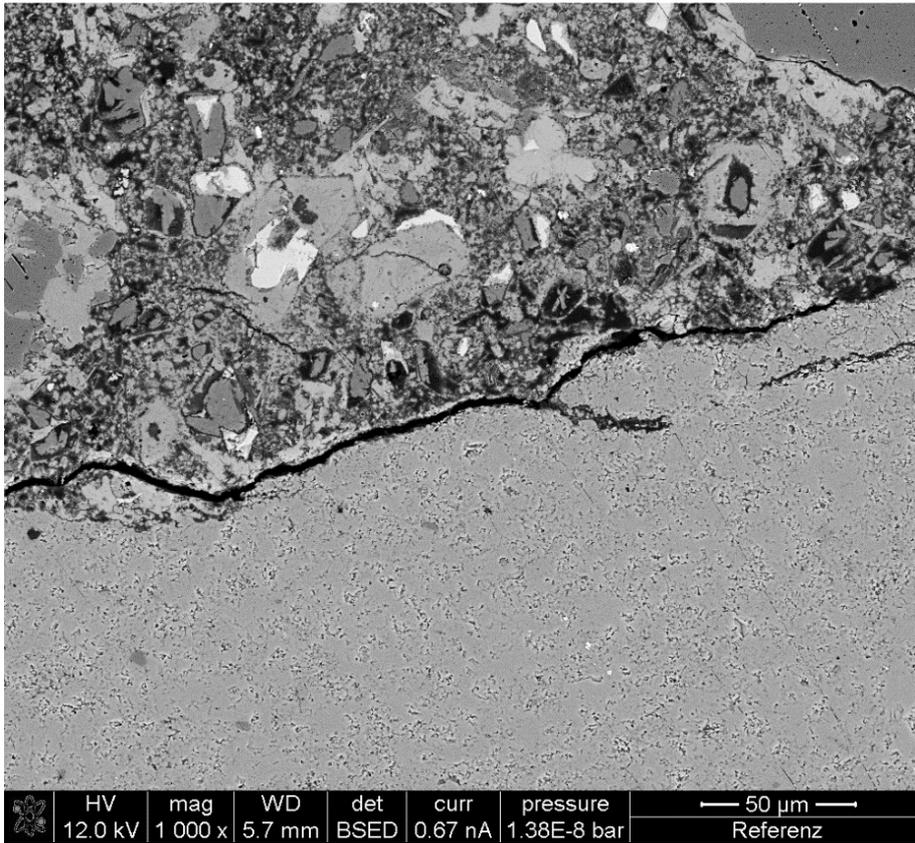


Abb. 110: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 109, unten Kalkstein, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Risse an Grenzfläche

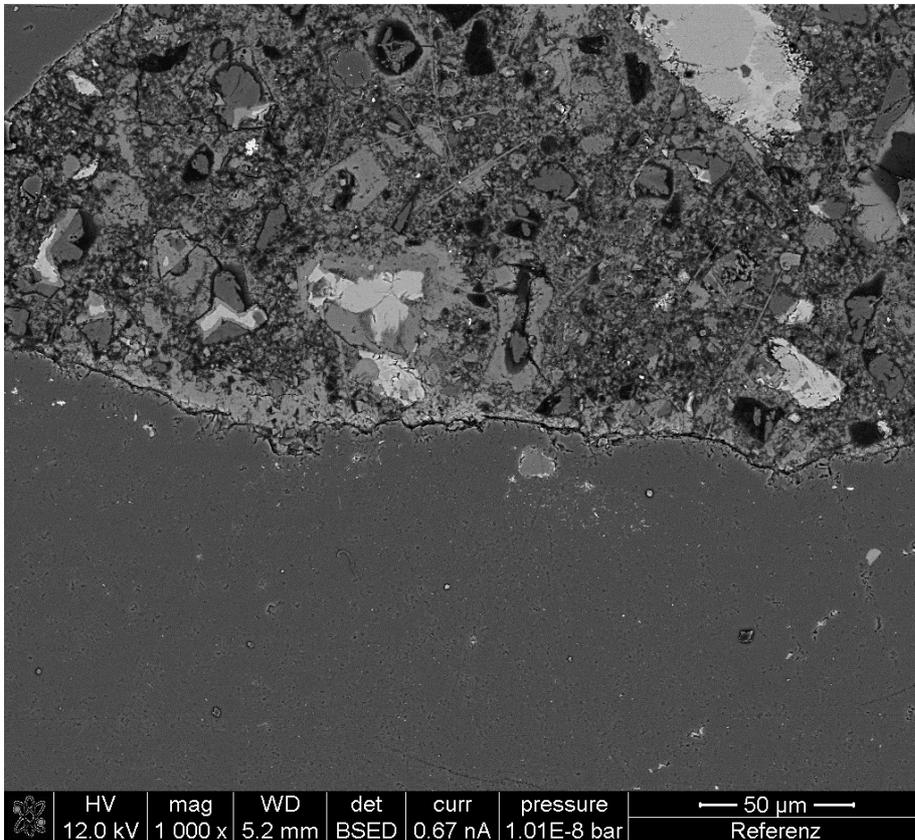


Abb. 111: REM Aufnahme DN 35, unten Quarz, oben Zementstein, Vergrößerung 1000-fach, Riss an Grenzfläche

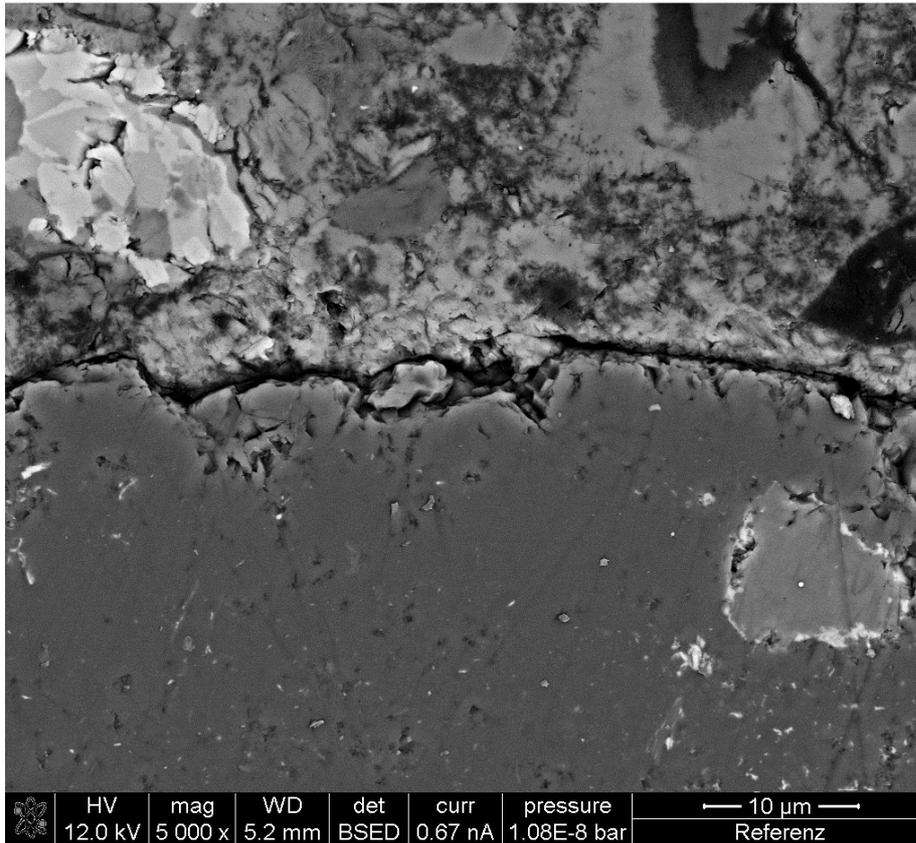


Abb. 112: REM Aufnahme DN 35, Detail zu Abb. 111, unten Quarz, oben Zementstein, Vergrößerung 5000-fach, Risse an Grenzfläche, links oben unhydratisiertes Klinkerkorn (heller Bereich), Portlandit an der Grenzfläche

Auswertung mikroskopische Analyse Verbundbereich Zementstein - Ziegelsplitt

An den licht- und rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen ist zu erkennen, dass ein sehr guter Verbund zwischen dem Zementstein und Ziegelgesteinskörnern vorliegt. Risse entlang der Phasengrenze Zementstein-Ziegelsplitt wurden nicht detektiert.

Die splittige Kornform der Ziegelsplitt kann zu einem besseren Verbund mit dem Zementstein führen. Der Zementleim dringt in das vorgenasste poröse Gefüge der Rezyklate ein, was zu einem optimierten Verbund im Vergleich zu weniger und anders porösen, natürlichen Gesteinskörnungen führen kann.

Insgesamt wurde eine gute und gleichmäßige Umhüllung der Gesteinskörnungen ohne sichtbare Haufwerksporigkeit oder Fehlstellen dokumentiert. Vereinzelt Poren an der Phasengrenze Zementstein – Ziegelsplitt sind vorhanden. Diese sind in ihrem Ausmaß jedoch nicht häufiger als im Verbundbereich Zementstein – natürliche Gesteinskörnung (Quarz, Kalkstein).

Calciumhydroxid- und Aluminatferrit-Trisulfat-Phasen (Aft) reichern sich nach [42] an den Grenzflächen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein an. Diese Phasengrenzfläche kann eine Schwachstelle im Beton darstellen. In den R-Betonrezepturen wurde im Gegensatz zu den Referenzbetonen Flugasche verwendet (siehe Kapitel 6.1). Dadurch liegt bei den R-Betonen ein deutlich geringerer Anteil an Portlandit an den Phasengrenzen vor.

Es wurden R-Betone mit unterschiedlichen Anteilen an RC-Gesteinskörnung des Typs 2 untersucht. Es wurde in keinem Fall ein nachteiliger Einfluss des Anteils an Ziegelsplitt auf das Verbundverhalten festgestellt – eher eine positive Wirkung. Selbst der ca. 60 Jahre alte R-Beton aus dem Technischen Rathaus Tübingen mit einem sehr hohen Anteil an Ziegelsplitt zeigte immer noch einen sehr guten

Verbund zwischen dem Ziegelsplitt und dem Zementstein auf. Trotz des haufwerksporigen Gefüges und des hohen Alters wurden relativ hohe Festigkeiten erzielt (siehe Kapitel 7.1). Das bestätigt den sehr guten Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung, der mikroskopisch nachgewiesen wurde.

Auswertung mikroskopische Analyse Verbundbereich Zementstein – Quarz/Kalkstein

Durch die mikroskopischen Analysen wurden zum Teil Fehlstellen und Risse an der Phasengrenze Zementstein – natürliche Gesteinskörnung (Quarz/Kalkstein) ermittelt. Dies stellt einen deutlichen Unterschied im Vergleich zu Gesteinskörnungen aus Ziegelsplitt dar. Zum Teil wurden Rissstrukturen in den natürlichen Gesteinskörnungen dokumentiert, welche möglicherweise durch die Aufbereitung der Gesteinskörnung verursacht wurden oder natürliche, durch geologische Prozesse verursachte Störungen darstellen.

Dabei wurden leichte Unterschiede zwischen den Gesteinskörnungen Quarz, Kalkstein und Feldspat bestimmt. Aufgrund der leicht höheren Porosität des Kalksteins und Feldspats wiesen die Verbundflächen zum Zementstein einen geringeren Anteil an Rissen und Fehlstellen auf. Zum größten Anteil lagen Adhäsionsbrüche direkt an der Phasengrenze zwischen Zementstein und natürlichem Gesteinskorn vor. In geringerem Ausmaß wurden auch Kohäsionsbrüche dokumentiert, bei denen der Riss durch die Zementsteinmatrix führte und geringe Anteile an Zementstein an den Gesteinskörnungen hafteten (Abb. 100).

Der Verbund des neuen Zementsteins zu Rezyklaten aus Betonbruch (exemplarisch Abb. 105) ist ebenfalls zum Teil besser als zu primären Quarzkörnern. Die Phasengrenze zwischen altem und neuem Zementstein weist keine Risse oder Fehlstellen auf, im Gegensatz zur Grenzfläche neuer Zementstein – Quarzgesteinskorn. Zugspannungen führen dort wahrscheinlich zuerst zu Mikrorisse in dieser Verbundzone auf – als Ursache der vereinzelt Risse an den Phasengrenzen der gepüfften Referenzbetone. Bis in eine Tiefe von 10 bis 20 μm an der Phasengrenze Zementstein-Gesteinskörnung liegt nach [44] neben der Anreicherung von Calciumhydroxid eine erhöhte Porosität vor. Dies wurde bei den eigenen Untersuchungen bestätigt. Die Referenzbetone, in welchen keine Flugasche verwendet wurde, weisen einen höheren Anteil an Portlanditanreicherungen an der Phasengrenze zu den Gesteinskörnungen auf, was nach [42] eine Schwachstelle im Beton darstellen kann. An vorhandenen Rissen haben sich zum Teil „Brücken“ aus Portlandit ausgebildet (Abb. 103).

Vereinzelt lagen in allen untersuchten Betonen unhydratisierte Zementklinkerphasen vor. In den R-Betonen wurde auch vereinzelt nicht vollständig reagierte Flugasche vorgefunden. Beides kann zu einer Nachhydratation führen, wodurch ggf. Poren im Zementstein in gewissem Ausmaß verkleinert bzw. ausgefüllt werden können.

6.7. Untersuchungen mittels LIBS

Die Qualitätsüberwachung der chemischen Zusammensetzung großer Stoffströme ist sowohl bei der Herstellung von Primärrohstoffen als auch bei der Aufbereitung von Sekundärrohstoffen von großer Bedeutung. Ein weiterer Aspekt ist die genaue Untersuchung dauerhaftigkeitsrelevanter Kennwerte, die sich aus dem Einsatz von RC-Gesteinskörnungen in Betonen ergeben. Eine Möglichkeit, mit der diese Aufgabenstellung realisiert werden kann, stellt die Laser-Emissionspektroskopie (Laser-induced Breakdown Spectroscopy - LIBS) dar.

Ausgangspunkt der Analyse ist ein Lasersystem, mit dem Lichtpulse erzeugt werden, die fokussiert auf das zu untersuchende Material gerichtet werden. Der gepunktete Eintrag eines gepulsten Laserstrahls auf eine Probenoberfläche erzeugt ein Plasma, welches Licht emittiert. Das emittierte Licht kann mit Hilfe geeigneter Spektrometer gemessen und elementspezifischen Atomkennlinien zugeordnet werden, wodurch Rückschlüsse auf die enthaltenen Elemente und deren Konzentrationen möglich sind. Für jedes Element müssen zuvor Kalibrierkurven erstellt werden. Abb. 113 zeigt das innerhalb des Projekts verwendete Gerät.



Abb. 113: LIBS am IAB Weimar

Die Anwendungsgebiete für die LIBS-Methode sind sehr vielfältig und reichen von der Lebensmittelindustrie bis zum Metallrecycling. Aus dem Rohstoff- und Baustoffbereich sind folgende Beispiele zu nennen [45]-[51]:

- Online-Analyse bei der Rohstoffexploration während des Bohrens
- Online-Analyse für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung beispielsweise für die Ermittlung des Sulfat- und Chloridgehaltes von Beton
- Quantitative Elementanalyse in der Wareneingangskontrolle, der Prozessüberwachung und der Qualitätskontrolle
- Sortierung von Kalkstein anhand des MgO-Gehaltes
- Analyse, Klassifikation und Sortierung von Metallen in Recyclingprozessen
- Sortierung von Feuerfestmaterialien aus Ofen- oder Wannenausbrüchen als Voraussetzung für deren Recycling

Bei Untersuchungen zur LIBS-Technologie als Werkzeug für die Sortierung von Betonbruch zu nutzen [55], wurden zunächst die Störstoffe wie Schwermetalle und Chloride erfasst. Im zweiten Schritt wurden die Hauptoxide bestimmt, anhand derer das Material als Beton klassifiziert werden kann.

Derzeit werden seitens der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. unter Beteiligung der Bundesanstalt für Materialwissenschaften sowie weiterer Unternehmen Untersuchungen durchgeführt, LIBS vermehrt zum Nachweis spezifischer Dauerhaftigkeitskennwerte in der Betonanalytik (Chlorideindringung, Karbonatisierung) zu nutzen. Eine Übersicht zum Nachweis verschiedener Elemente in zementgebundenen Baustoffen ist u. a. in [52] enthalten. Hinweise zum Umgang sowie zur Kalibration sind in [52] enthalten.

Innerhalb des vorliegenden Projekts wurden Voruntersuchungen zur Qualitätsüberwachung von RC-Betonen durchgeführt. Dabei geht es vorerst um die Erfassung der Verteilung der Sulfate im Beton, die unter bestimmten Einsatzbedingungen des Betons (hohe Feuchtigkeit, niedrige Temperatur) einen Einfluss auf dessen Dauerhaftigkeit haben können. Die Sulfate im Beton können anteilig sowohl von Erstarrungsreglern des Zements als auch von den RC-Körnungen stammen.

Qualitative und quantitative Messungen wurden anhand der Schwefellinie S@921,6 nm [54] durchgeführt. Als Prozess-Gas wurde Helium verwendet, um das Signal innerhalb der Schwefellinie S@921,4 nm zu verstärken und eine Reaktion der Schwefelatome mit atmosphärischem Sauerstoff zu vermeiden [54]. Die Kalibrierfunktion wurde mit Hilfe der Software SEC Analysis unter Verwendung von mit unterschiedlichen Schwefelgehalten versetzten Zementsteinen (bis 5,0 M.-%) und Gipsputzen erstellt (Abb. 114). Hierbei wurde in Kauf genommen, dass die Kalibrierfunktion möglicherweise in einen nicht-linearen Sättigungsbereich übergeht.

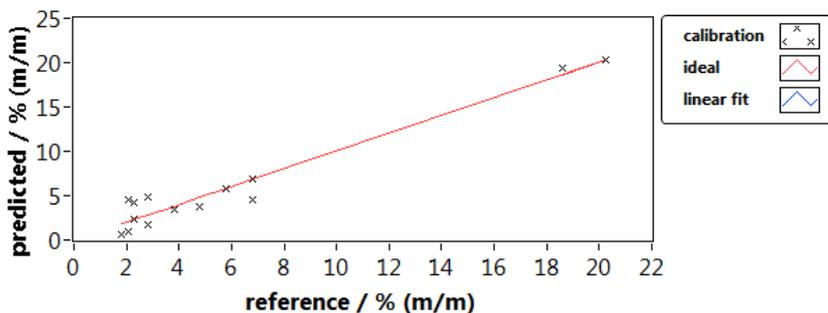


Abb. 114: Kalibrierfunktion mittels SEC Analysis mit Filterfunktion

Abb. 115 zeigt ein Beispiel von einem R-Beton-Probestück, dessen Oberfläche mittel des LIBS in einem üblichen rechteckigen Raster mit einem Messabstand von 0,25 mm vermessen wurde. Wird die Kalibrierfunktion zu Hilfe genommen, ergibt sich eine Schwefelverteilung über die gesamte 2D-Ebene, die hier als Maximalintensitäten dargestellt sind. Die Intensitäten korrelieren direkt mit der Elementkonzentration. Werden die Ausreißer eliminiert und der Intensitätsbereich zwischen 50 % und 100 % aufgezeigt, ergibt sich ein klareres Bild über die Schwefelverteilung. Es ist festzustellen, dass der Schwefel sowohl aus der Zementsteinmatrix als auch aus den Gesteinskörnungen kommen kann. Im Fall des weißen Gesteinskorns, welches durchaus aus RC-Material stammen kann, sind geringere Schwefelkonzentrationen als in der umgebenden Matrix festzustellen. Durch die Unebenheit der Probenfläche ist jedoch nicht auszuschließen, dass in Poren ein größeres Rauschen erzeugt wird.

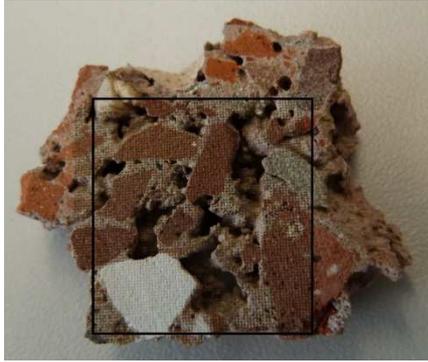


Abb. 115: Probe mit Rasterbereich

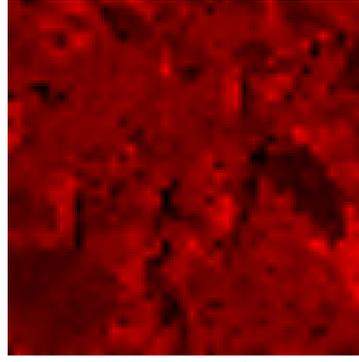


Abb. 116: Vollständiger Intensitätsbereich

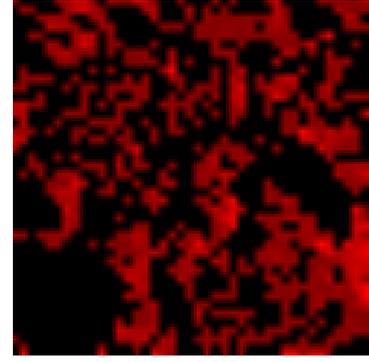


Abb. 117: Intensitätsbereich 50 % bis 100 %

Für praktische Gemische wurden einige weitere LIBS-Untersuchungen durchgeführt, darunter an einem Ökostone der Fa. Feess (Abb. 118). Die höchsten Schwefelkonzentrationen werden nicht im Bereich der enthaltenen grobkörnigen Ziegel-RC-Gesteinskörnungen festgestellt, sondern resultieren aus der umliegenden Matrix. Die Schwefelquellen sind hier Alkalisulfate aus den Zementanteil (u.a. Abbinderegler).



Abb. 118: Probe mit Rasterbereich (Ökostone Feess)

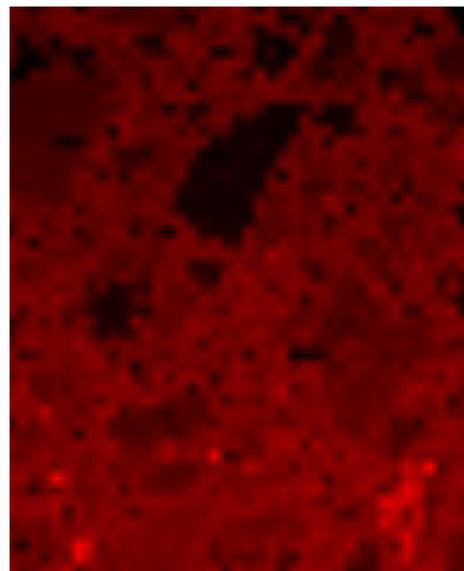


Abb. 119: Vollständiger Intensitätsbereich

6.8. Zusammenfassung und Bewertung

Die betontechnischen Untersuchungen belegen, dass sich mit Typ 2 Körnungen gemäß Regelwerken gleichwertige R-Betone im Vergleich zu herkömmlichen Betonen mit ausschließlich natürlichen Körnungen herstellen lassen. Die Qualität der verwendeten Körnungen der Fa. Feess ist so hoch und war im Untersuchungszeitraum gleichbleibend, die Betone wiesen zum Teil bessere Festbetoneigenschaften auf als die Referenzbetone gleicher Betongüte. Das betrifft vor allem die Dauerhaftigkeit, die anhand des Frostwiderstands geprüft wurde.

Diese guten Eigenschaften lassen sich anhand der mikroskopischen Gefügeuntersuchungen wie folgt erklären: Durch die gegenüber natürlicher Körnung höhere Rauigkeit, Porosität und spezifische Oberfläche des Ziegelbruches in der Typ 2 Körnung mit anderer Porengrößenverteilung kann in der Frühphase der Betonherstellung ein Teil des Zementleims in die Oberfläche der Ziegel eindringen. Durch die fortschreitende Zementhydratation tritt so durch chemische Verwachsung eine Art „Dübelwirkung“ ein, die zu einem sehr guten Verbund der Körnung mit dem Zementstein führt. Dieser ist für die Betone des Versuchsprogramms besser als an der Phasengrenze zwischen Zementstein und natürlicher Körnung aus Kies und Kalksteinsplitt.

Die Bildung zusätzlicher Hydratphasen durch Reaktion des Zementes mit sehr feinen, puzzolanischen Komponenten der Ziegeloberfläche könnte zusätzlich zur Verbesserung des Verbundes beitragen. Dieser Frage sollte in zukünftigen Untersuchungen nachgegangen werden.

7. Objektbeispiele

Dieses Kapitel behandelt Projekte, die bisher mit R-Beton im Rahmen von Forschungs- und Demonstrationsprojekten realisiert wurden bzw. werden. Zur Übersicht ist in Abb. 120 eine Deutschlandkarte mit den Standorten von veröffentlichten R-Beton-Projekten abgebildet.

Über die hier aufgezeigten Projekte hinausgehend wurde mittlerweile möglicherweise eine dreistellige Zahl an R-Betonhaltigen Bauwerken errichtet. Diese sind nur begrenzt nachzuverfolgen, weil einige Betonwerke erfreulicherweise R-Beton zwar im Portfolio führen, aber die Auslieferungsstellen an die Kunden des Betonwerks dem Datenschutz unterliegen.

Der Zeitstrahl soll einen Überblick über die Ausführung von R-Beton Demonstrationsprojekten ab 1994 bis 2017 geben (Abb. 121). Es wurden Projekte aufgenommen, zu denen Informationen verfügbar waren oder die durch persönliche Gespräche erfasst wurden. Anhand der zeitlichen Abfolge ist zu erkennen, dass anfänglich hauptsächlich R-Beton mit Typ 1-Gesteinskörnungen (= blauer Zeitstrahl in Abb. 121) verwendet wurden. Erst in den letzten Jahren wurden auch Projekte mit Typ-2-Körnungen (= grüner Zeitstrahl) realisiert. Auf die Projekte:

- Kompetenzzentrum Feess, Kirchheim unter Teck
- Technisches Rathaus, Tübingen

wird unter 7.1 und 7.2 näher eingegangen.



Abb. 120: Lage von veröffentlichten R-Betonprojekten [56]

7.1. Technisches Rathaus Tübingen

Das Objekt befindet sich nahe der Altstadt Tübingens an der Brunnenstraße 3, 72074 Tübingen. Abb. 122 zeigt eine Luftaufnahme des Technischen Rathauses im Bauzustand mit Blick aus Süden. Zu erkennen sind der Altbau, der erhalten bleibt, sowie die Anfänge der Bauarbeiten des vorangestellten Neubaus.



Abb. 122: Luftaufnahme Technisches Rathaus Tübingen. Unverändert entnommen aus [57]



Abb. 123: Rendering des Technischen Rathauses [58]

Informationen zum Objekt

Das bestehende Technische Rathaus Tübingen stammt aus den 1950er-Jahren. Da es den heutigen Anforderungen einer Stadtverwaltung nicht mehr gerecht wird und weitere Arbeitsplätze hinzukommen, wurde eine Erweiterung notwendig.

In einem Wettbewerbsverfahren wurden die eingereichten Entwürfe anhand von Nachhaltigkeitskriterien (z.B. Primärenergieinhalt, Ressourcenschonung, Dauerhaftigkeit), „Entwurfsgrundlagen Nachhaltige Architektur“ und verschiedenen Ausführungsvarianten bewertet. Als grundsätzliche Ziele der Planung galten:

- Erhalt des Bestandgebäudes
- Kompaktheit des Gesamtgebäudes
- Sparsamer Umgang mit Flächenversiegelung
- Beachtung der „Energieleitlinie Universitätsstadt Tübingen“
- Beachtung der „Entwurfsgrundlage Nachhaltige Architektur“

Den Wettbewerb gewann das Architekturbüro Ackermann & Raff aus Stuttgart, das den Rohbau des Bestandsgebäudes erhalten und mit einem Neubau ergänzen wollte. Hierfür wird das Bestandsgebäude mit einem bogenförmig der Krümmung der Straße folgenden Anbaus erweitert (siehe Abb. 123). Zwischen diesen Gebäudeteilen ist ein Atrium entstanden, in dem ein Teil der alten Fassade des Bestandsgebäudes ersichtlich bleiben soll. Im Februar 2016 wurde mit den Bauarbeiten begonnen. Mit einer geplanten Bauzeit von 2 Jahren soll im März 2018 das Projekt fertiggestellt werden. Die Gesamtkosten des Projekts belaufen sich auf 19,2 Mio. €. Die Nettogröße soll 7.200 m² betragen, der Bruttorauminhalt 32.800 m³. [58]

In Bezug auf die nachhaltige Ressourcenverwendung haben sich die Beteiligten für den Erhalt des Bestandsbaus und die Verwendung von R-Beton entschieden. Insgesamt wurden ca. 1165 m³ RC-Beton mit einer Betongüte C25/30 für Decken und Wände verbaut. Als Zement wurde ein CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ verwendet. Die RC-Körnung (RC-Splitt Typ 2) stammt von der Bauschuttrecyclinganlage der Fa. Feess. Die Rezeptierung und die Lieferung des Transportbetons erfolgten durch die Firma Wenzelburger. Neben ressourcenschonenden Aspekten beim Bauen wird auch auf Energieeffi-

zienz im späteren Betrieb wert gelegt. Es wurden Erdsonden im Fundament zur passiven Luftkonditionierung als auch eine PV-Anlage mit einer Auslegung auf den Eigenverbrauch eingebaut. Als Besonderheiten sind die Erhaltung des Bestandsbaus und Ergänzung des Neubaus mit R-Beton sowie die energetische Planung im Niedrigenergiestandard zu nennen.

7.1.1. Untersuchungen an den Betonmauersteinen und einem Stützteil

Beschreibung der Probenahme und der Proben

Im Rahmen der Sanierung des Bestandes wurde der z.T. gerissene Putz der Flurwände entfernt. Zum Vorschein kamen Mauerwerkswände aus Ziegelsplittbeton (siehe Abb. 124). Von diesen hatten die Planer bis dato keine Kenntnis. Diese Betonmauersteine bestehen aus Recyclingbeton aus den 1950er-Jahren. Um ausgewählte technische Eigenschaften zu bestimmen, wurden zwei dieser Betonmauersteine ausgebaut und untersucht. Da einige Stützen ebenfalls aus historischem Ziegelsplittbeton (Ortbeton) bestehen, wurde ein Teil einer Stütze, der bei den Umbauarbeiten herausgebrochen wurde, ebenfalls untersucht. Zur Veranschaulichung sind die Proben in Abb. 127 mit ihren Bezeichnungen dargestellt.



Abb. 124: Flurwand aus Mauerwerk mit R-Betonsteinen



Abb. 125: R-Betonmauerstein



Abb. 126: Stütze aus R-Beton

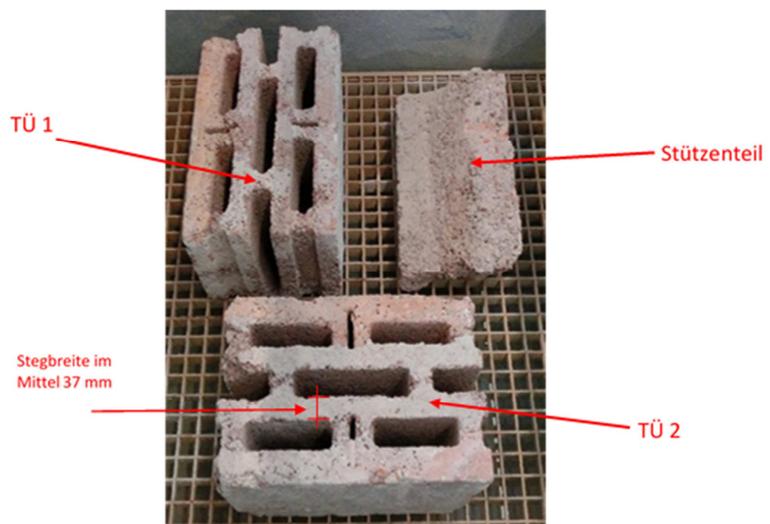


Abb. 127: Proben aus dem Bestandgebäude des Technischen Rathauses Tübingen

An den Proben der R-Betonmauersteine und der -stütze wurden die Rohdichte, die Druck-/Biegezugfestigkeit, das dynamische E-Modul sowie die wasserlöslichen Salzgehalte bestimmt. Weiterhin wurde die Wasseraufnahme und -abgabe (Abb. 128) ermittelt sowie der Verbund zwischen Zementstein und Gesteinskörnung lichtmikroskopisch analysiert (Abb. 129 bis 132).

Tab. 24: Untersuchungsergebnisse der R-Betone des Bestandsgebäudes des Technisches Rathauses Tübingen

Probe	Rohdichte	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	Dyn. E-Modul	Wasserlösliche Salzgehalte
R-Betonmauerstein	1,10 kg/dm ³ (Mauerstein, inkl. Lochung); 1,75 kg/dm ³ (Mauersteinstege)	8,7 N/mm ² *	–	–	0,015 M.-% Chlorid 0,014 M.-% Nitrat 0,056 M.-% Sulfat
R-Betonstütze	1,65 kg/dm ³	11,3 N/mm ²	1,2 N/mm ²	13,0 kN/mm ²	–

* Untersuchung am Mauerstein

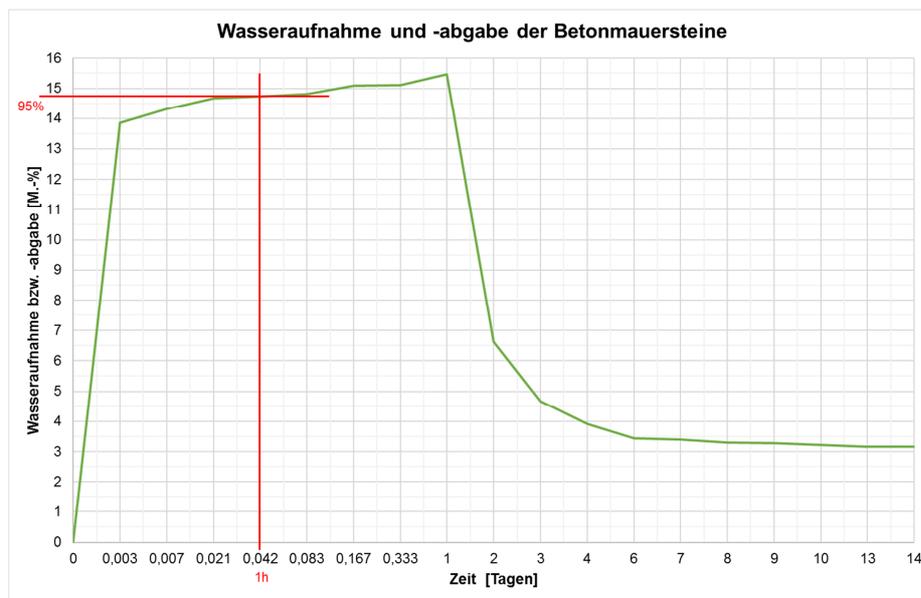


Abb. 128: Gemittelte Kurve der Wasseraufnahme und -abgabe

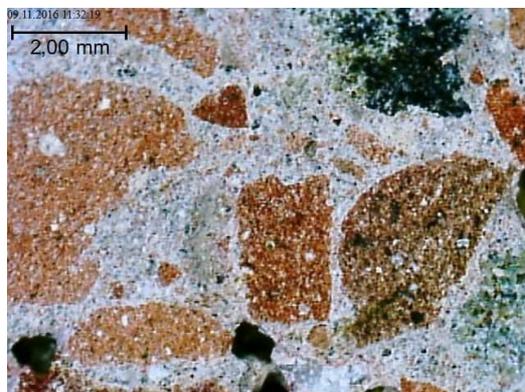


Abb. 129: Lichtmikroskopische Aufnahme des R-Betonmauersteins

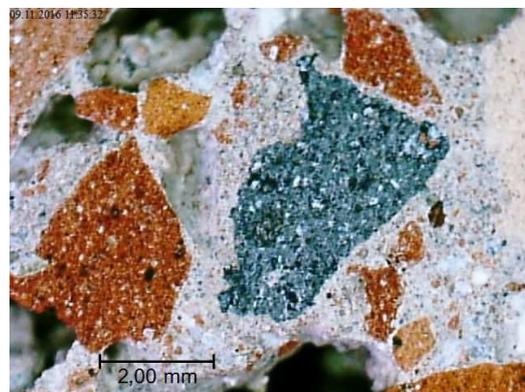


Abb. 130: Lichtmikroskopische Aufnahme des R-Betonmauersteins

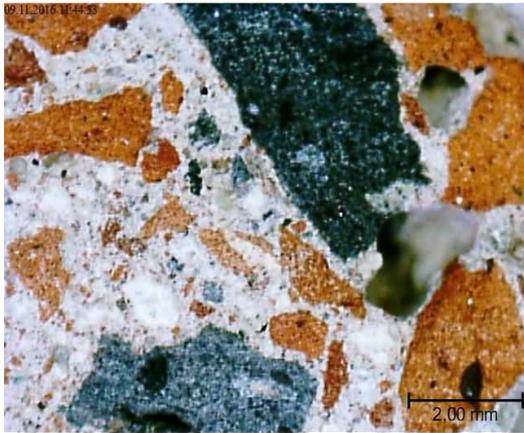


Abb. 131: Lichtmikroskopische Aufnahme der R-Betonstütze



Abb. 132: Lichtmikroskopische Aufnahme der R-Betonstütze

Anhand der mikroskopischen Gefügaufnahmen ist deutlich erkennbar, dass auch RC-Körnungen < 2 mm mit verwendet wurden.

Auswertung

Aufgrund der Haufwerksporigkeit und des hohen Anteils an Ziegelsplitt der R-Betone im Bestandsgebäude des Technischen Rathauses Tübingen wurden Rohdichten von 1,65 bis 1,75 kg/dm³ ermittelt. Damit würden diese gemäß heutiger Regelwerke nach DIN EN 206 [19] als Leichtbetone kategorisiert werden.

Auch der E-Modul sowie die Druck-/Biegezugfestigkeit weisen Werte auf, welche für Leichtbetone typisch sind. Die R-Betonmauersteine entsprechen mit einer mittleren Druckfestigkeit von 8,7 N/mm² den Anforderungen für Druckfestigkeitsklasse 6 für Hohlblöcke aus Leichtbeton nach DIN V 18151-100 [59]. Die Druckfestigkeit des Stützenteils ist mit 11,3 N/mm² mit Leichtbeton der Druckfestigkeitsklasse LC8/9 nach DIN EN 206 [19] zu vergleichen.

Die Belastung an wasserlöslichen Salzen (Anionen) der ca. 60 Jahre alten R-Betone ist nach WTA-Merkblatt 4-5-99/D [60] als gering einzustufen. Beim Verputzen ist nicht damit zu rechnen, dass lösliche Bestandteile in den Putz eindringen und zu Schäden aufgrund von Salzkristallisation führen.

Anhand der mikroskopischen Aufnahmen wurde ein sehr guter Verbund der Ziegelsplitt mit dem Zementstein dokumentiert. Dies wird auch anhand der Druckfestigkeit deutlich, da trotz des porigen Gefüges relativ hohe Festigkeiten erzielt wurden.

In Abb. 128 ist die Wasseraufnahme über 24 Stunden und die Rücktrocknung über 2 Wochen dargestellt. Innerhalb der ersten Stunde wurden bereits 95 % der Gesamtwassermenge aufgenommen (rote Markierung in Abb. 128). Die Rücktrocknung erfolgte bei Normklima (20 °C, 50 % r.F.) hauptsächlich in den ersten 24 Stunden. Nach 2 Wochen war die Rücktrocknung abgeschlossen.

Entgegen der verbreiteten Auffassung, dass R-Betone, insbesondere mit Typ 2 Körnung eine erhöhte und über einen langen Zeitraum andauernde Wasseraufnahme zeigen, weisen die Steine eine schnelle Wasseraufnahme und schnelles Abtrocknungsverhalten (95 % in den ersten 3 Tagen) auf, bis sich der Ausgleichsfeuchtegehalt bei üblichen Raumtemperaturen von ca. 3 % einstellt.

Die verwendeten Betonsteine mit RC-Körnungen, primär aus Ziegelsplitt, verfügen auch nach ca. 60-jährigem Einsatz noch über eine gute Qualität und erfüllen die Kennwerte vergleichbarer moderner Leichtbetonsteine.

7.1.2. Untersuchungen an den Gesteinskörnungen der Betonmauersteine

Aus den R-Betonstützen des Bestandsbaus wurden mittels Salzsäure die Gesteinskörnungen herausgelöst (nachdem vorab geklärt wurde, dass keine säurelöslichen Körnungen enthalten sind), um deren Korngrößenverteilung zu bestimmen. In Abb. 133 sind die Ergebnisse den Regelsieblinien für ein Größtkorn von 8 mm nach DIN 1045-2 [20] gegenübergestellt.

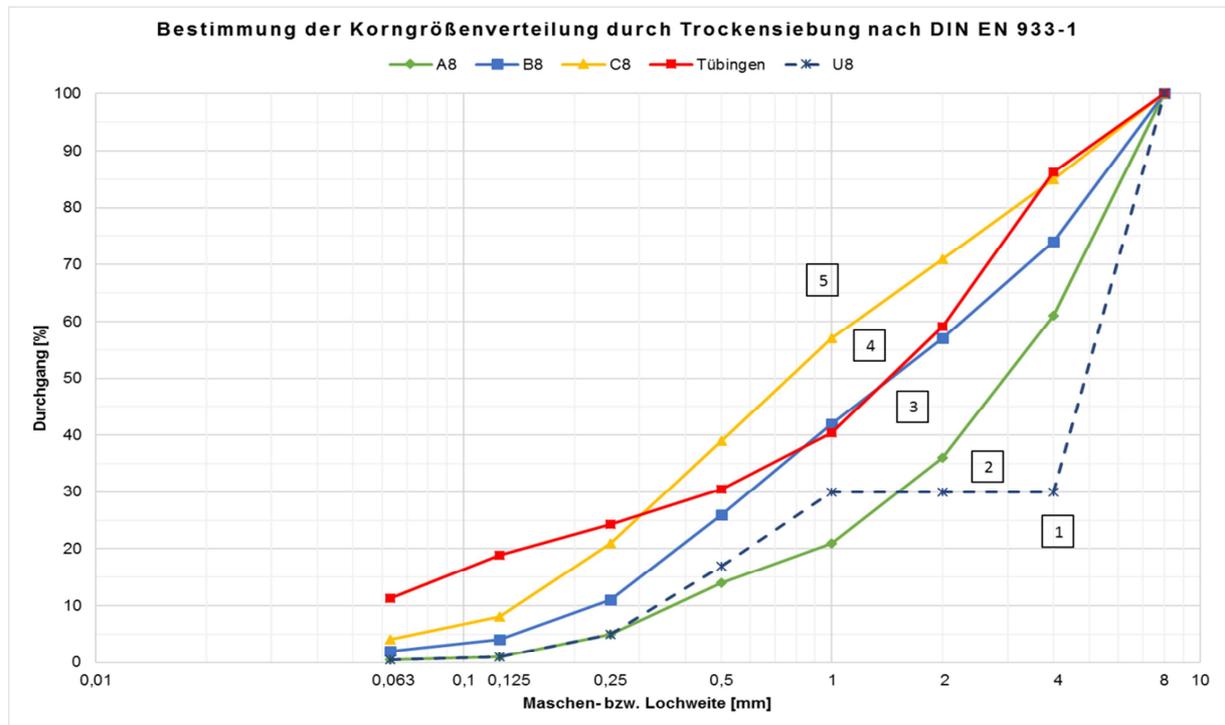


Abb. 133: Korngrößenverteilung der Gesteinskörnungen der R-Betonmauersteine, Technisches Rathaus Tübingen

Die Sieblinie liegt weitestgehend zwischen den Sieblinien B8 und C8. Außer im Korngrößenbereich $\leq 0,25$ mm sind größere Mengen an Feinanteilen als bei den Regelsieblinien vorhanden. Es ist zu vermuten, dass eine größere Menge an Zementleim benötigt wurde.

Die Gesteinskörnungen $\geq 4-8$ mm wurden nach ihren Bestandteilen sortiert. An dem Ziegelsplitt wurde die Wasseraufnahme nach 10 min entsprechend der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] geprüft und bewertet. Dabei wurde eine Wasseraufnahme von 15,4 M.% bestimmt. Dies liegt leicht über dem Grenzwert nach [13] für aktuell zugelassene RC-Gesteinskörnungen des Typs 2, welcher jedoch für die gesamte RC-Gesteinskörnung gilt. Da in der Gesteinskörnung des R-Betonmauersteins auch natürliche Gesteinskörnungen vorlagen, ist davon auszugehen, dass der Grenzwert von der gesamten Gesteinskörnung eingehalten wird.

An der untersuchten Ziegelsplittfraktion 2/16 (siehe Kapitel 5.5) wurde eine Wasseraufnahme von 14,3 M.% nach 10 min bestimmt. Damit liegt eine vergleichbare Wasseraufnahme mit heute verwendeten Ziegelanteilen der Typ 2-Körnung vor.

Es wurde festgestellt, dass die historischen Rezyklate mit hohem Anteil an Ziegelsplitt den heutigen Anforderungen entsprechen.

7.1.3. R-Beton – Neubau

Auf der Baustelle des Neubaus des Technischen Rathauses wurden vier Betonwürfel aus dem dort verwendeten R-Beton hergestellt und in der HTWG Konstanz nach 28 Tagen normgerechter Lagerung untersucht. Dabei handelte es sich Proben von R-Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Folgende Angaben wurden vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

Tab. 25: Angaben zum verwendeten R-Beton am Neubau des Technischen Rathauses Tübingen

Zementart	CEM II B-M (T-LL) 42,5 N (Holcim)
Zusatzstoff	Flugasche (Powerment)
Zusatzmittel	MC PowerFlow 5100 BV/FM (MC Bauchemie)
w/z-Wert (eq)	0,6
Größtkorn	16 mm
Festigkeitsklasse	C 25/30
Expositionsklasse	XC4, XF1, XA1
Feuchtigkeitsklasse	WF

An den Probekörpern wurde eine mittlere Rohdichte $2,34 \text{ kg/dm}^3$ und Druckfestigkeit von $43,3 \text{ N/mm}^2$ bestimmt. Bezüglich der Zusammensetzung (u.a. Zementart, Art der RC-Körnung) und technischer Eigenschaften ist der dort verwendete Typ 2 R-Beton der Fa. Wenzelsburger mit den C 25/30 Rezepturen des Projekts (von Holcim) vergleichbar.

7.2. Neubau Bürogebäude Fa. Feess, Kirchheim Teck

Der Neubau des Kompetenzzentrums befindet sich auf dem Gelände des Recyclingunternehmens Heinrich Feess GmbH & Co. KG in Kirchheim unter Teck. Abb. 134 zeigt eine Luftaufnahme des Geländes vor dem Neubau.



Abb. 134: Luftaufnahme des Gebäudes der Fa. Feess mit Markierung des späteren Neubaus. Blick von Süd-Osten. [57]



Abb. 135: Fertiggestellter Neubau

Informationen zum Objekt

Die nachfolgenden Informationen wurden durch Herrn Klaus Schad, Bauleiter des Kompetenzzentrums, übermittelt.

Die Baumaßnahme umfasste ein Bürogebäude im ersten Bauabschnitt und ein Hallenbauwerk mit Werkstatt im zweiten Bauabschnitt. Das Bürogebäude überspannt den gesamten Einfahrtsbereich über zwei Stockwerke und enthält ein Treppenhaus mit Aufzugsanlage. Die Abmessungen des Bürogebäudes betragen ca. 18 x 19 m². Die Lagerhalle besteht aus einem Kopfteil mit Kfz-Werkstätte und Kranbahn sowie der eigentlichen Lagerhalle. Die Abmessungen betragen in etwa 34 x 92 m² zuzüglich eines 6 m auskragenden Vordaches.

Die Arbeiten im Außenbereich, die Erd- und Entwässerungsarbeiten sowie die Bohrpfahlgründungen wurden durch den Bauherrn Walter Feess GmbH & Co. KG erbracht. Die Planung und Bauüberwachung der gesamten Baumaßnahme wurde von der Wohnbau Birkenmaier GmbH & Co. KG geleistet. Für die Bodenplatten, Wände, Stützen, Decken, Fundamente und Tiefgründungen wurde RC-Beton verwendet. Dieser wurde von der Holcim Kies und Beton GmbH, Werk Kirchheim unter Teck, geliefert. Die RC-Gesteinskörnung Typ 2 stammte vom Recyclinghof selbst und bestand zu etwa 75 % aus Beton mit der Kornfraktion 2/16 und zu etwa 25 % aus Ziegelsplitt der Kornfraktion 2/16. Der R-Beton wurde in den Festigkeitsklassen C8/10, C12/15, C16/20, C20/25 und C25/30 von der Firma Rommel SF-Bau GmbH & Co. KG eingebaut.

Als Besonderheit ist zu erwähnen, dass für alle Bauteile (Bodenplatten, Wände, Stützen, Decken, Fundamente, Tiefgründungen) anteilig RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 verwendet wurden.

Am 23.06.2017 eröffnete die Fa. Feess feierlich ihr Kompetenzzentrum K³ sowie den Büroteil und die Werkhalle aus R-Beton. Mit großem Interesse und Präsenz von Wirtschaft und Politik wurde der Einsatz von RC-Baustoffen - präsentiert an diesem Hochbauobjekt - aufgenommen.

Der Feess-Neubau ist ein Best-Practice-Beispiel für den ökologischen und energetischen Nutzen des Einsatzes von RC-Körnungen. Als Basis für die Aufbereitung der RC-Körnung wurde Abbruchmaterial aus max. 30 km Entfernung von diversen Baustellen genutzt. Der R-Beton für das Gebäude wurde vom TBW Holcim in Kirchheim, nur ca. 3,5 km von der Fa. Feess entfernt, gemischt. Dadurch ergeben sich deutlich geringere Transportwege mit Dieselkraftstoffeinsparung gegenüber dem Bezug von natürlicher Körnung (i.d.R. Kalkstein, mit > 30 km Entfernung) sowie die Einsparung von Deponiekosten für das rezyklierte Abbruchmaterial.

Darüber hinaus sind die Bauten (Werkhalle, Büro, Kompetenzzentrum) für Kunden und Geschäftspartner exzellente Anschauungsobjekte für R-Beton mit Typ 2 Körnung. Die unterschiedlichen Oberflächengüten des R-Betons (Sichtbetonklasse 3 und sandgestrahlte Flächen, siehe Abb. 136) vermitteln anschaulich, dass auch Architekturbetone aus R-Beton möglich sind.



Abb. 136: Links: Oberfläche eines R-Betons mit Typ 2 geschalt, rechts: gleicher R-Beton nach dem Sandstrahlen

8. Alternative Anwendungen zu Transport R-Beton und Ausblick

8.1. Ökostones

Die von der Fa. Feess hergestellten „Ökostones“ sind Betonwaren in der Form von Betonsteinen. Sie werden u.a. für Lagerboxen auf dem eigenen Firmengelände eingesetzt. Das heißt die Ökostones werden mit RC-Körnungen des eigenen Recyclingparks mit einer Betonmischanlage auf dem gleichen Gelände hergestellt und bisher überwiegend für den Selbstbedarf eingesetzt. Es fallen geringfügige Transport- und Energiekosten an.

Dabei werden bis zu 90 M.% der eigenen rezyklierten Gesteinskörnung im Beton für die Ökostones verwendet. Damit wird ein deutlich höherer Anteil an RC-Gesteinskörnung des Typs 2 genutzt, als nach den derzeit gültigen Regelwerken in Deutschland zugelassen ist (siehe Kapitel 3.2, Abb. 7).

Ein weiterer Anbieter von stapelbaren Betonblöcken aus R-Beton ist der Boden- und Baustoffaufbereiter „Eigensche Trocken- und Umwelttechnik GmbH (ETU)“ aus Altbernsdorf bei Görlitz. Die sogenannten „ETU-Blöcke“ werden als Begrenzungsmauern für Schüttgut, Hangabsicherungen und für die schnelle Errichtung von Trennmauern oder Einrahmungen aller Art verwendet. Die ETU-Blöcke wurden von der Gesellschaft zur Prüfung, Überwachung und Zertifizierung von Bauprodukten und -verfahren GmbH (PÜZ-BAU) als „Betonteile für spezielle Anwendungsgebiete“ zertifiziert.

8.1.1. Zusammensetzung, Herstellung und Einsatzgebiet

Für die Ökostones wird CEM II-Zement der Festigkeitsklasse 42,5 verwendet mit einer Zementmenge von 305 kg/m^3 und einem w/z-Wert von 0,6, wobei Recyclingwasser der eigenen Anlage genutzt wird. Die Gesteinskörnung besteht aus ca. 90 M.% RC-Gesteinskörnung 0/32 des Typs 2 und 10 M.% natürlichem Brechsand 0/2. Als Zusatzmittel werden ein PCE Fließmittel mit einem Anteil von 0,2 M.% bezogen auf die Zementmenge und ein Luftporenbildner mit einem Anteil von 1,0 Vol.-% eingesetzt. Die Rezepturen wurden für die Druckfestigkeitsklasse C 16/20 entworfen.

Die Steine werden in den in Abb. 137 dargestellten zwei Formen (Stein, Dach) und in verschiedenen Abmessungen mit einem Gewicht von 0,4 bis 1,7 t hergestellt.

Die Ökostones verfügen über kegelförmige Noppen auf den Oberseiten und entsprechende Mulden auf der Unterseite, so dass sie mörtellos versetzt und flexibel verschiedene Wandhöhen gestaltet werden können. Die Noppen/Mulden sichern die Lage der Steine gegen Verschieben. Nur die untere Lage ist auf einem Mörtelbett versetzt und mit dem Untergrund verschraubt/verankert. Die Konstruktion der Ökostonewände wird unbewehrt ausgeführt.



Abb. 137: Ökostones als Betonmauersteine für Silowände



Abb. 138: Ökostones mit Noppen und Mulden

8.1.2. Untersuchung nach mehrjähriger Freibewitterung

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung der Dauerhaftigkeit im Außenbereich nach mehrjähriger Bewitterung und betrieblich bedingter Beanspruchung (Anprall, Stoß, Reibung) - über die üblichen Prüfungen der Eigenüberwachung hinausgehend.

Es wurden Bohrkern von eingebauten Steinen auf dem Firmengelände im Alter von 2 Monaten bis zu ca. 3 Jahren entnommen. An den Proben wurden die Rohdichte, Wasseraufnahme, Karbonatisierungstiefe und Druckfestigkeit bestimmt. Weiterhin wurde mittels lichtmikroskopischer Gefügeuntersuchungen der Verbund Zementstein – RC-Gesteinskörnung analysiert. Nachfolgend werden die Untersuchungsergebnisse der Proben aus verschiedenen Chargen unterschiedlichen Alters zusammengefasst.

Tab. 26: Untersuchungsergebnisse Ökostones

	Bohrkern, Alter: 2 Monate	Bohrkern, Alter: 2 Jahre	Bohrkern, Alter: 3 Jahre
Rohdichte	1,93 g/cm ³	1,99 g/cm ³	1,97 g/cm ³
Wasseraufnahme nach 1 h	13,5 M.%	13,3 M.%	11,8 M.%
Wasseraufnahme nach 8 h	14,0 M.%	14,0 M.%	12,4 M.%
Wasseraufnahme nach 24 h	14,1 M.%	14,1 M.%	12,6 M.%
Wasseraufnahme nach 7 d	14,7 M.%	14,8 M.%	13,1 M.%
Mittelwert Carbonatisierungstiefe	3,6 mm	11,1 mm	11,0 mm
max. Carbonatisierungstiefe	5,0 mm	13,0 mm	13,0 mm
Druckfestigkeit	17,2 N/mm ²	27,3 N/mm ²	25,8 N/mm ²

Aus der Fremdüberwachung der Fa. Krieger aus den Jahren 2011/2012 liegen zum Vergleich folgende Messwerte zur Druckfestigkeit nach 7 und 28 Tagen vor:

Tab. 27: Druckfestigkeit Ökostones (gemäß der Fremdüberwachungsprotokolle)

Datum	Druckfestigkeit nach 7 Tagen in [N/mm²]	Druckfestigkeit nach 28 Tagen in [N/mm²]	Druckfestigkeitsklasse
September 2011	16,4	21,1	C 16/20
Oktober 2011	16,4	20,0	C 16/20
April 2012	19,6	23,7	C 16/20
August 2012	20,7	26,0	C 20/25

Auswertung

Die Rohdichten der Bohrkern unterschiedlichen Alters unterscheiden sich nur gering. Da 90 % der Gesteinskörnung aus RC-Körnungen des Typs 2 bestehen, welche höhere Porositäten aufweisen als natürliche Gesteinskörnungen, liegen die Rohdichten knapp unterhalb des Anforderungswerts für Normalbeton ($\rho \geq 2,0 \text{ g/cm}^3$). Die ca. 3-jährige Bewitterung bewirkte keine relevante Änderung der Rohdichte. Die Druckfestigkeitsklasse C 16/20 wird mindestens erreicht.

Bei der Wasseraufnahme zeigte sich, dass nach 1 h bereits 90 % der Gesamtwasseraufnahme abgeschlossen war. Der Verlauf der Wasseraufnahme ist bei allen unterschiedlich alten Proben gleich. Nach 7 Tagen wurde die Massekonstanz erreicht. Das stimmt mit den positiven Ergebnissen der im Projekt untersuchten R-Betone von Holcim (siehe Kapitel 6.3) überein. Das heißt, die poröseren Rezykate bewirken im Verbund mit dem Zementstein keine erhöhte und keine länger andauernde Wasseraufnahme. Die max. Wasseraufnahme liegt um ca. 10 bis 15 % höher als bei Normalbeton, was durch hohen Anteil und die höhere Porosität der RC-Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen zu erklären ist.

Obwohl die Ökostones keine Bewehrung enthalten, wurde die Karbonatisierungstiefe wurde mittels Phenolphthalein erfasst, um die Qualität der Betonrandzone beurteilen zu können. Der Karbonatisierungshorizont war bei allen Probekörpern einheitlich. Aus den Messwerten lässt sich schließen, dass die Karbonatisierung nach 2 Jahren abgeschlossen ist, da nach 3 Jahren Bewitterung keine Erhöhung der Karbonatisierungstiefe erfasst wurde. Die R-Betone der Ökostones weisen aufgrund ihres hohen Typ 2 RC-Körnungsanteils eine ca. doppelt so hohe Karbonatisierungstiefe wie herkömmliche Betone auf. Diese liegt aber noch deutlich über der üblichen Lage der Bewehrung mit ca. 3 cm Überdeckung.

Gefügeuntersuchungen

An den Bohrkernen unterschiedlichen Alters wurden licht- und rasterelektronenmikroskopische Analysen des Verbundes der Verbundzone Zementstein – RC-Gesteinskörnung vorgenommen. Makroskopisch wurden keine Kiesnester oder Ausblutungen/Entmischungen festgestellt.



Abb. 139: makroskopische Aufnahme, Ökostones Bohrkern, Alter 2 Monate

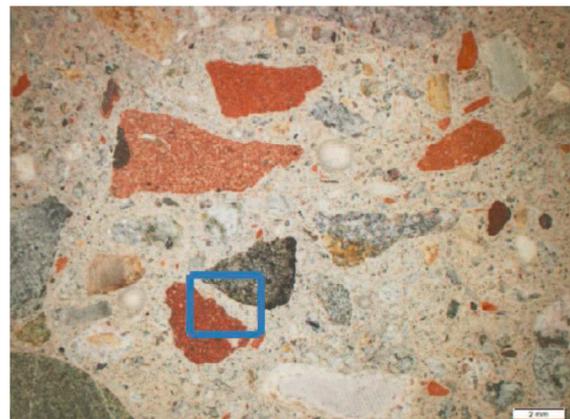


Abb. 140 lichtmikroskopische Aufnahme Zementstein-Ziegelsplitt, Vergrößerung: 6x, Ökostones Bohrkern, Alter 2 Monate

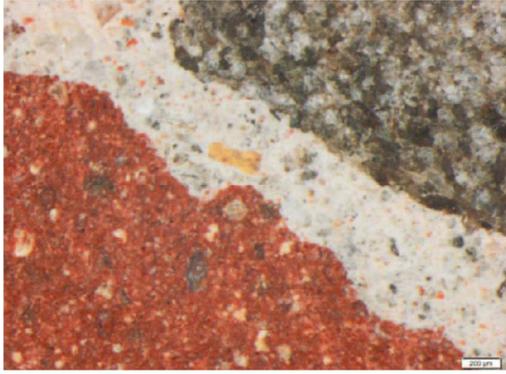


Abb. 141: lichtmikroskopische Aufnahme Zementstein-Ziegelsplitt, Vergrößerung: 50x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate

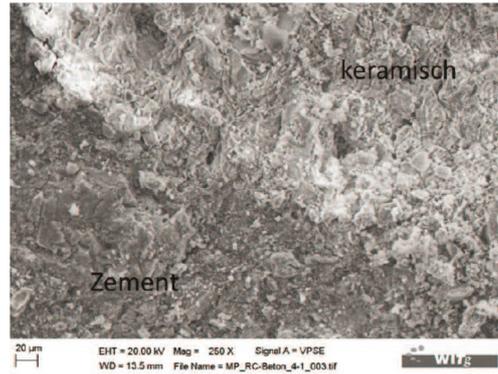


Abb. 142: REM Aufnahme Zementstein-keramisches Gesteinskorn, Vergrößerung: 250x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate

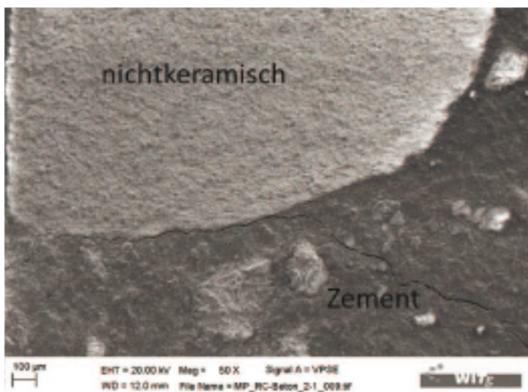


Abb. 143: REM Aufnahme Zementstein-Quarzgesteinskorn, Vergrößerung: 50x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Jahre

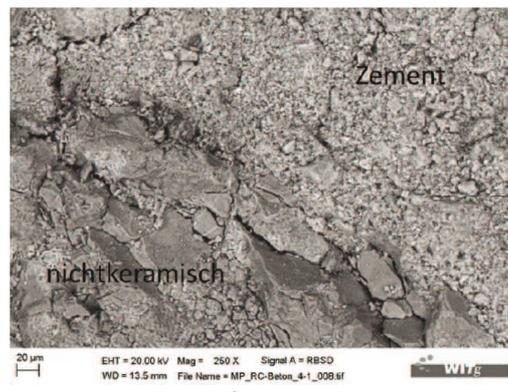


Abb. 144: REM Aufnahme Zementstein-Kalksteinkorn, Vergrößerung: 250x, Ökostone Bohrkern, Alter 2 Monate

Aus den Gefügeuntersuchungen geht hervor, dass bei den Ökostones ein deutlich besserer Verbund zwischen Zementstein und Ziegelsplitt im Vergleich zum Verbund zwischen Zementstein und Kalksteinsplitt bzw. zu Quarz vorliegt. Im Gegensatz zu quarzitischen Gesteinskörnungen wurden an der Phasengrenze Zementstein-Ziegelsplitt keine Fehlstellen oder Risse festgestellt (siehe auch Kapitel 6.6.2).

Zusammenfassung

Die Ökostones weisen geringere Rohdichten im Vergleich zu den in Kapitel 6.3 beschriebenen R-Betonen auf, aufgrund des deutlich höheren Anteils an RC-Gesteinskörnung des Typs 2. Die geringeren Druckfestigkeiten der Ökostones im Vergleich mit den in Kapitel 6.2 beschriebenen R-Betonen sind ebenfalls auf den erhöhten Anteil an RC-Gesteinskörnung zurückzuführen (Ökostone: 90 %, Holcim-R-Betone: 25 bzw. 35 %).

Die Ergebnisse der Gefügeuntersuchungen stimmen mit den in Kapitel 6.6.2 dargestellten Analysen überein. Durch das leichte Eindringen des Zementleims in die Oberfläche der Ziegelsplitt liegt ein zum Teil besserer Verbund im Vergleich zu den verwendeten natürlichen Gesteinskörnungen vor.

Insgesamt wurden im Vergleich der Ökostones über die 3-jährige Bewitterung keine negativen Eigenschaftsänderungen festgestellt. Die Rohdichte bleibt nahezu unverändert und die Druckfestigkeit steigt durch eine Nachhydratation des Zements. Die Gefügeuntersuchungen zeigen, dass durch die Freibewitterung (mit Frosteinwirkung) im untersuchten Zeitraum keine Beeinträchtigung des Verbundes Zementstein-RC-Gesteinskörnung erfolgte.

Die Ökostones sind ein Beispiel dafür, dass durch den Einsatz eines deutlich höheren Anteils an RC-Gesteinskörnung des Typs 2 als derzeit zugelassen, auch dauerhafte Betone für bestimmte Expositionsklassen produziert werden können. Die Eigenschaftskennwerte nach mehrjähriger Bewitte-

ung genügen den Anforderungen an die Robustheit und Witterungsbeständigkeit für die beschriebene Anwendung. Weitere Möglichkeiten bestehen u. a. für den Einsatz im Garten-/Landschaftsbau.

8.2. Untersuchung an Mörteln mit Brechsanden aus Mauerwerkbruch

Ziel der Untersuchungen war es, Möglichkeiten des Einsatzes rezyklierter Brechsande des Typs 2 - ohne weitere chemische oder thermische Behandlung - als anteilige Alternative zu natürlichen Sanden in Mörteln zu erfassen. Dieses Thema ist nicht unmittelbarer Projektbestandteil, wurde aber mit Unterstützung von Studierenden der HTWG Konstanz untersucht, um Möglichkeiten für zukünftige Absatzwege dieser, bisher in der deutschen Mörtel- und Betonindustrie nicht eingesetzten RC-Sande zu erproben. Die zukünftige hochwertige Verwendung wäre ein weiterer Schritt auf dem Weg, Stoffkreisläufe zu schließen.

Als ein wesentliches Kriterium gegen den Einsatz dieser RC-Sande, neben dessen großer spezifischer Oberfläche, wurde der Einfluss des gegenüber natürlichen Körnungen erhöhten Sulfatgehalts näher untersucht. Um den Widerstand gegenüber inneren Sulfatangriff zu bestimmen, wurden die Proben ein Jahr unter Wasser bei ca. 8 °C gelagert. Neben den sulfatischen Störstoffen im Feinkornbereich liegt ein höherer Anteil an Zementstein des Rc-Anteils der Typ 2-Sande (= zementsteinreicher Betonbruch) vor, da dessen Mahlbarkeit gegenüber der natürlichen Gesteinskörnung höher ist. Bei der Anwendung der RC-Sande im Mörtelbereich ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass der Bindemittelgehalt in Mörteln höher sein kann als im Beton. Das trifft auch für die Normprismen der Zementmörtelprüfung zu (= 25 % Zementgehalt gegenüber ca. 12 – 14 % im Beton).

8.2.1. Versuchsmischungen, Herstellung, Untersuchungen

In den Versuchsreihen wurden die Zementarten (CEM I 42,5, CEM II/B-M (T-LL) 42,5, CEM III 42,5), die Art der Gesteinskörnung (Normsand 0/2 im Vergleich zu 2 verschiedenen RC-Sanden 0/2), der Zementanteil (17,6; 25 und 40 M.%) und der w/z-Wert (0,5; 0,83; 1,0 bzw. 1,59) variiert.

Für die im Folgenden beschriebenen Erstversuche zum Einsatz von RC-Sanden in Mörteln wurde im Sinne einer Grenzwertbetrachtung 100 % der RC-Sande eingesetzt im Vergleich zu den Referenzproben mit 100 % Normsand aus Quarzsand. Bei einzelnen Mischungen wurde der Mehlkorngehalt < 0,25 mm abgesiebt, da der Wasseranspruch ansonsten extrem hoch wird. Die Zementart wurden variiert, da sich klinkerreiche Zemente (Portlandzement) gegenüber Sulfaten (die in den RC-Sanden enthalten sind) anders verhalten als CEM II- und CEM III-Zemente. Der Zementanteil von 25 % ist bei der Norm-Prüfung von Mörtelprismen vorgegeben, der Anteil von 17,6 % entspricht dem Anteil der in etwa in handelsüblichen Mauermörtel (= Trockenmörtelgenmische) eingesetzt wird und der sehr hohe Bindemittelgehalt von ca. 40 % kann erforderlich werden, wenn alle RC-Sande inklusive der Fein- und Mehlkornanteile mit eingesetzt werden. Die große Variation im w/z-Wert ergab sich daraus, dass alle Mörtel auf ein vergleichbares Ausbreitmaß von ca. 11 cm eingestellt und in diesen Erstversuchen keine Zusatzmittel verwendet wurden.

Die Norm-Mörtelprismen lagerten für 1 Jahr bei ca. 8 °C unter Wasser, um durch diese Klimabedingungen die Bildung von Ettringit und Thaumasit bewusst zu fördern und die Beständigkeit gegenüber möglichen inneren sulfathaltigen Bestandteilen zu bestimmen. Dabei wurden zu definierten Zeitpunkten verschiedene zerstörungsfreie Prüfungen durchgeführt (Messung des dynamischen E-Moduls, der Längen-/Masseänderung bzw. der Maßhaltigkeit). Nach Abschluss der einjährigen Lagerung erfolgten Festigkeitsmessungen (Druck-/und Biegezugfestigkeit) und lichtmikroskopische Gefügeuntersuchungen.

8.2.2. Ausgewählte Ergebnisse

Da die Beschreibung aller Versuche den Rahmen sprengen würde und dieses Teilthema nicht unmittelbarer Bestandteil des Projekts ist, werden nur ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Die Ergebnisse der Siebanalyse der RC-Sande sind im Kapitel 5.3 enthalten. Die Ergebnisse der Sulfatanalyse (siehe Kapitel 5.6) zeigen, dass alle Grenzwerte auch für die RC-Körnungen < 2 mm eingehalten werden. Demzufolge ist die Möglichkeit von Treibmineralbildungen, wenn überhaupt, nur bei den sehr bindemittelreichen Mischungen (Zementanteil ca. 40 %) gegeben.

Auch alle Prismen mit den RC-Sanden sind normgerecht erstarrt und erhärtet und zeigten nach einem Jahr unter Wasser keine Verformungen oder sonstigen Veränderungen. Rein äußerlich sind sie nur durch den anderen Farbton (beige-leicht rötlich) von den grauen Normprismen mit Quarzsanden zu unterscheiden (siehe Abb. 145). Selbst bei den sehr zementreichen Mischungen gibt es keine Hinweise für Treibreaktionen aufgrund eines inneren Sulfatangriffs.



Abb. 145: Bruchflächen der Mörtelprismen, von links: Proben 1 und 2 mit Normsand, Proben 3 bis 6 mit RC-Sanden

Wie zu erwarten, sind die E-Moduln der Referenzmörtel mit Quarzsand (blau in Abb. 146) ca. doppelt so hoch sind wie die der Mörtel mit RC-Sanden (gelb). Durch den erhöhten w/z-Wert der Mischungen mit dem RC-Sand ergeben sich erhöhte Kapillarporenanteile, was neben den geringeren Festigkeiten der Rezyklate zu dieser Reduzierung des E-Moduls führt. Der Verlauf der Zunahme der E-Moduln über den Versuchszeitraum der RC-Mörtel ist mit denen der Referenzmörtel vergleichbar.

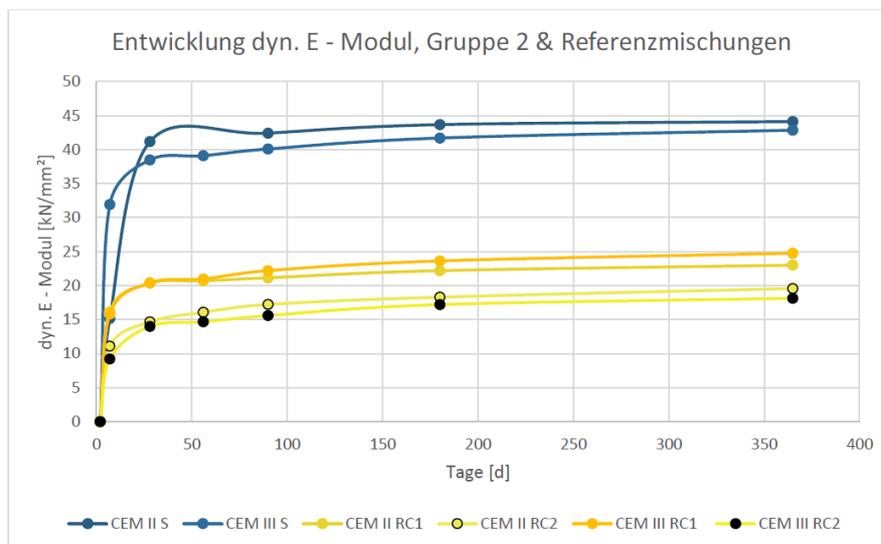


Abb. 146: Entwicklung des dynamischen E-Moduls über 1 Jahr, bei übereinstimmendem Zementgehalt (25 M.%)

Die Referenzmörtel wiesen nach 1 Jahr Lagerung Druckfestigkeiten von 77,1 bis 87,7 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von 2,7 bis 3,0 N/mm² auf. An den RC-Mörteln mit CEM II und CEM III wurden Druckfestigkeiten von 33,8 bis 50,9 N/mm² und Biegezugfestigkeiten von 1,0 bis 1,6 N/mm² bestimmt. Die Mischung von CEM I mit RC-Sanden führte zu höheren Druckfestigkeiten zwischen 69,4 bis 78,6 N/mm² und Biegezugfestigkeit von 1,3 bis 1,9 N/mm².

Bei den lichtmikroskopischen Gefügeuntersuchungen zeigte sich sehr guter Verbund von Zementstein und Ziegelbrechsand bzw. -splitt. Risse, Fehlstellen oder Porenanreicherungen an der Phasengrenze wurden nicht dokumentiert. Das Gefüge ist mit dem der Mauersteine des Bestandsobjekts.



Abb. 147: Lichtmikroskopische Analyse eines Mörtels mit RC-Sand



Abb. 148: Lichtmikroskopische Analyse eines Mörtels mit RC-Sand, Detail vergrößert

Die Ergebnisse stimmen sehr zuversichtlich, dass RC-Sande, die derzeit noch Abfallstoffe sind, nach entsprechender Prüfung als Rohstoffe für bestimmte Arten von Mörteln (z. B. Mauermörtel im Hochbau, Trockenmörtel für Verdichtungssäulen im Grundbau) nutzbar sind. Der Anteil des wasserlöslichen Sulfats spielte bei den verwendeten RC-Sanden - unter Einhaltung der Grenzwerte für die RC-Körnungen für Beton - keine Rolle. Er sollte jedoch für Einsatzbereiche mit erhöhter Feuchtebeanspruchung begrenzt werden.

Aufgrund der positiven Ergebnisse sind weitere Untersuchungen zu Rezeptanpassungen (u. a. Einsatz von Fließmittel) mit Konkretisierung der Mörtelanwendungen sind zu empfehlen.

9. Einsatz von Typ 2 Körnungen im R-Beton aus ökologischer Sicht

Die Aufbereitung der mineralischen Bauabfälle und deren Einsatz bei der Herstellung von Beton müssen aus ökologischer Sicht sinnvoll und aus wirtschaftlicher Sicht zumindest vertretbar sein.

Für die Kreisläufe mit den neuen Verwertungs- und üblichen Entsorgungswegen beim Einsatz im Hochbau sind Vorteile zu erwarten. Auch der aus den RC-Körnungen (aus dem mineralischen Bauabfall) hergestellte R-Beton sollte möglichst über alle ökologischen Aspekte hinweg vorteilhaft sein. Als Maßstab und Referenz gilt deshalb immer der aktuelle Status Quo im Umgang mit diesen Materialien.

Die Frage, inwieweit sich die Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen zu hochwertigen Gesteinskörnungen und deren Einsatz als Rohstoff in der Betonherstellung als sinnvoll erweist, lässt sich aus unterschiedlichen Perspektiven untersuchen und beantworten:

- Aus gesamtheitlicher Perspektive
- Aus Sicht eines Bauschuttrecyclers
- Aus Sicht eines Transportbetonwerkes

Die Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen und deren Einsatz in der Transportbetonbranche wird nachfolgend aus diesen drei Perspektiven beleuchtet. Die Erkenntnisse werden aus ökologischer Sicht abschließend zu einer Bewertung des Produktes R-Beton zusammengeführt, die sich an den üblichen Umweltproduktdeklarationen (UPD bzw. EPD) orientiert. Dies ermöglicht eine Einordnung dieses Baustoffes R-Beton im Vergleich zu dem Umweltprofil eines konventionellen Transportbetons.

9.1. Zur gesamtheitlichen ressourcenpolitische Perspektive

Bei mineralischen Bauabfällen handelt es sich um sehr große Massenströme unterschiedlichster Herkunft und mit einer großen Heterogenität in der Zusammensetzung und den materiellen Eigenschaften. In regelmäßigen Abständen berichtet eine Initiative der Baustoffindustrie, der Bauwirtschaft und der Entsorgungswirtschaft über deren Aufkommen und Verbleib, indem die Datensätze des Statistischen Bundesamtes entsprechend aufbereitet werden. Zum letzten Mal ist dies im Jahre 2017 erfolgt [61] mit einer Darstellung der Situation des Jahres 2014. Für die einzelnen Recycler sind regional bezogen nicht so große Heterogenitäten in Zusammensetzung und Eigenschaften gegeben.

Die zentralen mineralischen Abfallmassenströme sind Bauschutt, Straßenaufbruch sowie die Fraktion Boden und Steine. Unter Straßenaufbruch sind nur die Bitumengemische zusammengefasst, die in diesem Zusammenhang nicht von Interesse sind.

Allein knapp 55 Mio. Jahrestonnen bestehen aus Bauschutt und damit aus Massen, die beim Rückbau oder der Sanierung von Bauwerken anfallen. Knapp 78% dieser Bauabfallmassen gelangen in mobile oder stationäre Bauschuttrecyclinganlagen und werden dort zu Baustoffen und Materialien aufbereitet, die wieder im Bausektor verwendet werden können. In aller Regel handelt es sich um Erdbaustoffe oder Baustoffe für den Straßen- und Wegebau.

Diese Baustoffe und Materialien aus der Aufbereitung von Bauschutt werden im Bausektor in Konkurrenz zu Baustoffen eingesetzt, die auf Basis von Schotter bzw. gebrochenem Naturstein oder auch Kies hergestellt wurden. Wenn die rezyklierten Gesteinskörnungen im Sektor Transportbeton eingesetzt werden, stehen sie nicht mehr als Baustoff für den Straßen- und Wegebau zur Verfügung. Aus Sicht der Schonung primärer Rohstoffvorkommen ist damit zunächst nichts gewonnen. Der Substitutionserfolg bleibt gleich.

Die Analyse des Status Quo für alle mineralischen Bauabfälle ist jedoch eher ernüchternd. Für die knapp 120 Mio. Jahrestonnen Boden und Steine liegt die Recyclingquote bei etwa 10%. Große Anteile gerade aus der Fraktion Boden und Steine werden nicht dem Wirtschaftskreislauf zugeführt sondern auf Deponien beseitigt (14 %) oder als bergbaufremdes Material zur Verwertung in übertägigen Abgrabungen eingesetzt (75 %), in aller Regel zur Rekultivierung von Steinbrüchen und Gruben. Auch Bauschutt wird zu diesem Zweck verwendet und zwar in einer Größenordnung von 16 %. Demgegenüber stehen die Aufbereitung der Massen und deren Rückführung als Rohstoffe bzw. Baustoffe in den Wirtschaftskreislauf, was aus ökologischer Sicht zu fördern ist. Für die Bauschuttmassen ist eine derartige Umlenkung der Massenströme vorstellbar.

Bis dato im Erdbau eingesetzte Gesteinsmischungen werden frei und können und als zusätzlich aufbereitete Materialien (Baustoffe) in höherwertigeren Einsatzbereichen der Bauwirtschaft verwendet werden.

Sollen auch zukünftig hohe Recyclingquoten und zwar über alle Massenströme hinweg erreicht werden, müssen neue Absatzwege erschlossen werden. Die stagnierende oder eher rückläufige Nachfrage aus dem Straßen- und Wegebau wird nicht in der Lage sein, diese Massen zusätzlich aufzunehmen. **Werden bei Erdbaumaßnahmen anfallende Bodenmassen auch wieder in Erdbaumaßnahmen eingesetzt (Straßen- und Wegebau) und aus dem Hochbau anfallende Bauschuttmassen zu Rohstoffen für die Baustoffindustrie verarbeitet, lassen sich die Recyclingquoten in Summe über alle mineralischen Bauabfällen hinweg signifikant erhöhen (Abb. 149).** Die hochwertige Verwertung der mineralischen Bauabfälle entsprechend ihrer wertgebenden Eigenschaften ist eine Grundvoraussetzung, um die ressourcenpolitischen Ziele insbesondere die Verdopplung der Rohstoffproduktivität zu erreichen.

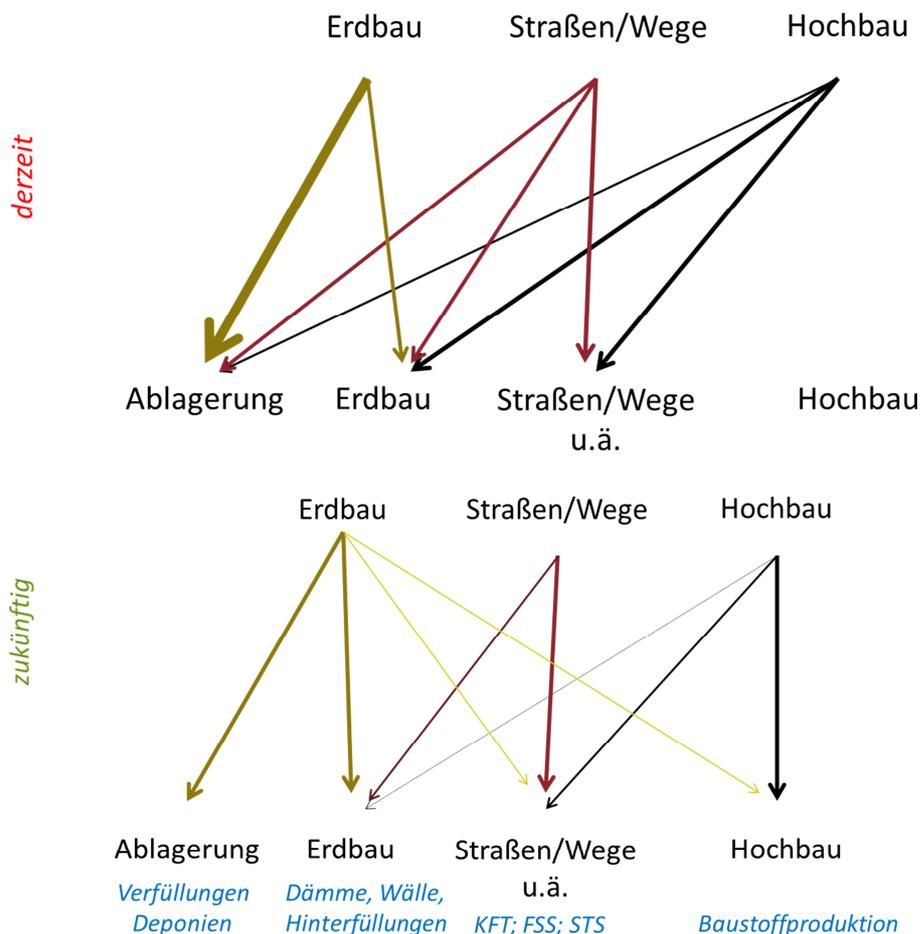


Abb. 149: Stoffstrommanagement zur möglichst weitgehenden hochwertigen

Nutzung aller mineralischen Bauabfälle

Die Entkopplung der Ressourcenbeanspruchung von der wirtschaftlichen Entwicklung ist eine zentrale Aufgabenstellung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms [63]. Die Beanspruchung heimischer Rohstoffe resultiert vor allem aus der Nachfrage der Bauindustrie. Das Ziel, die Rohstoffproduktivität bis zum Jahr 2020 gegenüber dem Referenzjahr 1994 zu verdoppeln, wird deutlich nicht erreicht (Abb. 150). Es bedarf daher gerade im Bausektor vieler weiterer Bemühungen in Richtung Verminderung des spezifischen Rohstoffeinsatzes oder auch in Richtung möglichst umfassendem Rückgriff auf sekundäre Rohstoffe und Schließung von Materialkreisläufen.

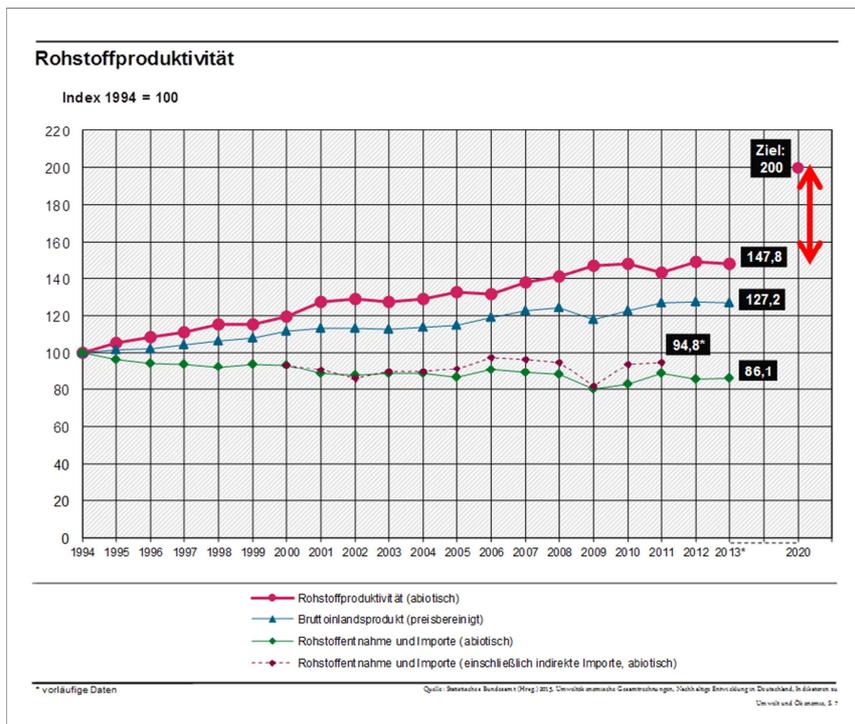


Abb. 150: Die Entwicklung der Rohstoffproduktivität in Relation zu den ressourcenpolitischen Zielen nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [64]

9.2. Zur Sicht des Herstellers einer Gesteinskörnung

Die Herstellung der RC-Gesteinskörnung erfolgt in einer Recyclinganlage, die mineralische Bauabfallmassen und hier insbesondere den klassischen Bauschutt zu verschiedensten Gemischen und Baustoffen aufbereitet. Je nach Qualität und Zusammensetzung des Inputmaterials und dem Aufbereitungsziel werden bei der Aufbereitung Teilmassenströme entnommen und anderweitig entsorgt. Dies sind zum einen die klassischen Stör- und Fremdstoffe wie Holz oder Kunststoffe, die thermisch behandelt oder als Energieträger genutzt werden können. Zum anderen werden auch Metalle separiert, insbesondere aus der Bewehrung der aufbereiteten Altbetone. Des Weiteren müssen die Massen an mineralischen Materialien entnommen werden, die bauphysikalisch ungeeignet und höher mit Schadstoffen belastet sind. Diese werden auf Deponien entsorgt. Der überwiegende Massenstrom findet Absatz im Baubereich in der Regel in Konkurrenz zu Baustoffen, die auf Basis von natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt werden. Eine Vermarktung in Richtung Betonindustrie geht zunächst zwangsläufig zu Lasten vorhandener Verwertungswege – vor allem zu Lasten qualifizierter Baustoffen für den Straßen- und Wegebau.

Wie in Kapitel 9.1 gezeigt, ist eine Diversifizierung der Absatzwege angesichts der sich mittelfristig ändernden Ressourceneffizienzzielen grundsätzlich sinnvoll. Es wird immer wichtiger werden, neue und effiziente Absatzwege zu erschließen und zu sichern. Die Rohstoffnachfrage eines Betonwerkes

erfolgt über das Jahr hinweg eher gleichmäßig, während Baumaßnahmen im Straßen- und Wegebau deutlichen Schwankungen unterliegen. Die Erweiterung des Produktportfolios erfordert eine Umstellung im Aufbereitungsprozess. Aufgrund der höheren Anforderungen der Betonindustrie ist die Herstellung dieser Gesteinskörnung mit einem höheren Aufwand verbunden. Die RC-Körnungen müssen für die R-Betone entsprechende Zusammensetzungen und Eigenschaften aufweisen – in großer Gleichmäßigkeit über die großen Massenströme hinweg. Angesichts der Heterogenität des Ausgangsmaterials ist dies für den Bauschutttaufbereiter als Gesteinskörnungsproduzent mit Qualitätssicherung gemäß geltender Regelwerke eine anspruchsvolle Aufgabe.

Die passende Aufbereitungsstrategie wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes für das Umweltministerium Baden-Württemberg [65] entwickelt und hat sich seitdem bewährt. Danach werden Altbeton und Altmauerwerk getrennt aufbereitet und danach gezielt auf die Zusammensetzung und das Mischungsverhältnis nach Typ 2 zusammengeführt. Näheres dazu ist in Kapitel 4 beschrieben.

9.2.1. Aufwand und Nutzen aus ökonomischer Sicht

Wie aus den obigen Ausführungen deutlich wird, ist die Herstellung einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie und hier insbesondere auch der Gesteinskörnung Typ 2 nicht trivial sondern mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit der damit verbundene Aufwand in einem gesunden Verhältnis zum erzielbaren Nutzen steht.

Anders als im Straßen- und Wegebau können die RC-Körnungen bisher im Beton gemäß deutscher Regelwerke nur > 2 mm bis ca. 16 mm oder 22 mm, das heißt dem üblichen Größtkorn von Hochbaubetonen, eingesetzt werden. Zudem ist der zulässige Anteil an abschlämmbaren Substanzen limitiert.

Für die Produktion und Bauschutttaufbereitung bedeutet dies, dass als erster Schritt in der Aufbereitungstechnik ein Vorsieb vorzusehen ist. Damit fällt – möglicherweise in einem Betrieb erstmalig – das entsprechende Vorsiebmaterial zur Entsorgung / zur Verwertung an. Die Begrenzung des Größtkorns erfordert zudem einen größeren Durchsatz durch die Brecher, da ein größerer Anteil Überkorn ein zweites Mal gebrochen werden muss. Die Limitierung des Kleinstkorns wiederum hat andererseits zur Folge, dass die damit vermehrt anfallenden Brechsande getrennt und anderweitig vermarktet werden müssen. Je nach Ausgangsmaterial und Brechertyp lassen sich folgende Massenströme benennen:

Tab. 28: Aufbereitungserfolg von Altmauerwerk und Altbeton in einem ersten Brecherdurchgang

	Vorsieb	Brechsand	Anteil >22mm (2. Brecherdurchgang)
Altmauerwerk	25%	30%	20%
Altbeton	0%	20%	30%

Für die verminderten Erlöse für die Feinmaterialien ist eine Kompensation durch erhöhte Preise für die RC-Körnung möglich. Der Spielraum des Recyclers diese Möglichkeit auszunutzen ist umso höher, je kürzer die Transportstrecken zwischen Recyclinganlage und Betonwerk im Vergleich zur konkurrierenden Natursteinindustrie liegen.

Aus wirtschaftlicher Sicht zeigt sich das Verhältnis Aufwand // Nutzen stark abhängig vom Einzelfall und hier vor allem der lokalen Vermarktungssituation. Die Herstellung einer hochwertigen Gesteinskörnung für die Betonindustrie ist mit (deutlich) höherem Aufwand verbunden. Insbesondere entstehen Stoffströme aus Feinmaterial, die nur mit weniger guten Erlösen vermarktet werden können. Vor diesem Hintergrund muss die Herstellung der Gesteinskörnungen für die Betonindustrie mit höheren Erlösen verbunden sein, was vor allem bei entsprechenden Transportkostenvorteilen möglich sein sollte.

9.2.2. Aufwand und Nutzen aus ökologischer Sicht

Der Aufwand zur Herstellung der Gesteinskörnung speist sich aus dem Einsatz der entsprechenden Aufbereitungsanlagen, d.h. Brecher und Siebe, sowie dem Radladereinsatz bzw. alternativ dem Betrieb der Förderbänder. Die ökologischen Kosten resultieren vor allem aus dem Betriebsmittel- und damit Einsatz von Energieträgern. Dies sind Kenngrößen, die auch das ökonomische Ergebnis beeinflussen. Die Aussagen zur Ökologie decken sich daher in Anteilen mit denen zur Ökonomie.

Aus ökologischer Sicht ist die Umstellung der Produktion nicht mit einem anderen Nutzen verbunden. Das Produktportfolio wird erweitert, die Massenströme werden umgelenkt. Letztendlich wird aber immer in irgendeiner Form im Verhältnis 1:1 primärer Rohstoff substituiert. Der Erlös ist aus ökologischer Sicht zwischen Status Quo und Produktion von RC-Gesteinskörnung in etwa gleich, wenn man davon ausgeht, dass der Einsatz als Erdbaustoff ebenfalls mit einem entsprechenden Substitutionserfolg verbunden ist. Je nach Fraktion wird dann Sand oder Gestein, Letzteres je nach Region in Form von Kies, gebrochenem Naturstein oder daraus hergestelltem Edelsplitt (mehrfach gebrochenes Gestein) substituiert, so dass sich ein Substitutionserfolg bzw. Nutzen aus der Vermarktung von ca. 2 bis 3 kg CO₂-Äq./Mg errechnen lässt und dies unabhängig vom Produktportfolio.

Um eine qualitativ hochwertige Gesteinskörnung für den Einsatz im R-Beton in der Korngröße 2/16 mm herzustellen, fällt mindestens ein zusätzlicher Klassierungsschritt zur weiteren Ausdifferenzierung des dafür verwendbaren Materialstroms 0/22 mm an. Dies bedeutet, dass das Grobkorn > 22 mm nochmals über bspw. eine Prallmühle gebrochen und nochmals abgesiebt wird, um die Ausbeute der Korngröße 2/16 mm zu erhöhen. Der Mehraufwand in der Produktion beläuft sich in Anlehnung an die spezifischen Datensätze zum Energieeinsatz nach [67] bezogen auf den gesamten Input auf ca. 1 MJ/Mg. Mit der Bereitstellung des deutschen Strommixes sind entsprechende Umweltlasten verbunden (s.u.), so dass von einem Beitrag zum Treibhauseffekt in Höhe von maximal 0,17 kg CO₂-Äq./Mg Input ausgegangen werden kann. Bezieht man diesen Wert auf den oben genannten Substitutionserfolg, verringert sich dieser um knapp 10%. Dies ist der ökologische Preis, um eine qualitativ hochwertige Rückführung von Bauschutt auch in den Hochbau in Form von R-Beton zu ermöglichen.

9.2.3. Fazit

Für einen Bauschuttaufbereiter ist die Herstellung einer RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie damit durchaus interessant. Dies gilt umso mehr, wenn er mit dem Typ 2 bis zu 30% Mauerwerk hochwertig vermarkten kann, was bis dato nur als Erdbaustoff oder aus Gründen der fehlenden Akzeptanz nur in deutlich geringeren Anteilen im Straßenbaumaterial enthalten war. Der mit der Produktion unweigerlich verbundene Mehraufwand wird durch die verbesserte Erlössituation über den gesamten Massenstrom hinweg mehr als aufgefangen. Genaue Kalkulationen machen nur für den Einzelfall bzw. die Marktsituation in den einzelnen Regionen Sinn.

Durch die Produktion der Gesteinskörnung Typ 2 erfolgt zudem – wie auf angeführt – keine Rosinenpickerei, im Gegenteil. Es wird den Baustoffen für den Straßen- und Wegebau kein Altbeton entzogen. Im Gegenteil werden durch die Erweiterung des Produktportfolios klassische Bauschutt- bzw. Mauerwerksanteile erstmalig einer hochwertigeren Verwertung zugeführt. Nur die in Richtung Straßenbau vermarktbar Gesamtmenge nimmt durch die Erweiterung um die Herstellung einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie nach Typ 2 ab.

Die Absatzmöglichkeiten in Richtung Straßen- und Wegebau dürften durch das vermehrte Bauen im Bestand tendenziell schwieriger werden. Eine Diversifizierung der Vermarktungswege ist vor diesem

Hintergrund grundsätzlich sinnvoll. Die Nachfrage der Betonindustrie ist zudem eher gleichmäßig, während der Absatz in Richtung Straßen- und Wegebau größeren Schwankungen unterliegt. Andererseits muss der Betonindustrie aber auch eine sichere Lieferfähigkeit gewährt werden.

Aus ökologischer Sicht ist die Produktion einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie etwas ungünstiger, unterstellt, dass alle Produkte für den Erdbau wie für den Straßen- und Wegebau immer massenäquivalent Primärrohstoffe substituieren können. Der Mehraufwand aus der Produktion lässt sich nicht über einen gesteigerten Nutzen kompensieren. Die Unterschiede sind aber sehr klein und angesichts der Gesamtsituation (Kapitel 9.1) mehr als gerechtfertigt.

9.3. Die Sicht eines Betonwerkes

Ein Betonwerk produziert mit Beton einen Baustoff, der den vom Kunden vorgegebenen Frisch- und Festbetoneigenschaften entsprechen muss. Für die Herstellung der jeweiligen Betone benötigt das Betonwerk eine Zulassung, die Produktion und die Produkte unterliegen einer entsprechenden Qualitätskontrolle. Liegen die Anforderungen an die Festbetoneigenschaften innerhalb des durch die DAfStb Richtlinie [13] vorgegebenen Rahmens, so lässt sich dieser Beton auch unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung und hier auch unter Verwendung der Gesteinskörnung Typ 2 herstellen. Das Betonwerk garantiert, dass unabhängig von der Rezeptur die geforderten Betoneigenschaften sicher erreicht werden. Das Betonwerk steht hierfür auch in der Gewährleistung.

Unabhängig von der Art der eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnungen und den verwendeten Mengenanteilen muss der Beton die geforderten Betoneigenschaften erfüllen. Für den Bauherren, den Tragwerksplaner und die mit der Bauausführung betrauten Firma muss der Beton die geforderten und gewohnten Eigenschaften und damit den gleichen Nutzen haben, wie es auch für den konventionell hergestellten Beton gilt.

Das Produkt bleibt trotz der Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung hinsichtlich der Eigenschaften gleich. Für die Betonwerke stellt sich die Frage, inwieweit sich die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung als vorteilhaft erweisen kann. Aus ökologischer Sicht lautet die Frage deshalb, ob sich die Umweltlasten der Betonherstellung durch die Verwendung dieser Gesteinskörnung reduzieren lassen. Ökonomisch lautet die Frage zunächst, inwieweit sich die Produktionskosten mindern lassen. Diese Frage steht dann im Vordergrund, wenn man auch weiterhin einen Beton nach Eigenschaften vermarkten möchte. Der Rückgriff auf rezyklierte Gesteinskörnungen, die damit verbundene Ressourceneffizienz und Schonung natürlicher Rohstoffvorkommen lässt sich möglicherweise aber auch offensiv in eine Vermarktungsstrategie einbinden. Der Beton muss weiterhin die geforderten technischen Eigenschaften liefern, er wird aber offensiv als ein neues Produkt R-Beton vermarktet mit den möglichen Spielräumen hinsichtlich der Preisfindung.

Wie die Erfahrung aus vielen Projekten und konkreten Bauvorhaben zeigt, die Beton-Rezepturen werden durch die Frage des Rückgriffs auf rezyklierte Gesteinskörnungen nicht wesentlich beeinflusst.

Zunächst wird eine Gesteinskörnung in Anteilen durch eine andere ersetzt. Das spezifische Gewicht der rezyklierten Gesteinskörnung ist tendenziell etwas geringer. Der Rückgriff auf diese Gesteinskörnung vermindert daher tendenziell bei gleichem Volumen die Masse ein klein wenig, dies kann aber für die nachfolgenden Betrachtungen vernachlässigt werden.

Mit dem Rückgriff auf die Gesteinskörnung Typ 2 bekommt der Gesteins-Zuschlag einen anderen Wasseranspruch. Durch die größere Oberfläche steigt das Saugen. Dem kann man zunächst dadurch begegnen, dass diese rezyklierten Gesteinskörnungen möglichst wassergesättigt verwendet werden. Zudem gilt es, die Steuerung im eigentlichen Mischprozess im Betonwerk etwas anzupassen. Die

Zugabe des Wassers und ihr Zeitpunkt unterscheiden sich ein wenig von der ansonsten üblichen Produktionsweise. Nicht zuletzt der Wasseranspruch hat jedoch auch Auswirkungen auf das Fließmittel und hier auch in der benötigten Menge, aber auch in der Art. Fließmittel und Betonverflüssiger werden heutzutage stark auf die Eigenschaften der übrigen Rezepturbestandteile zugeschnitten. Demzufolge kommen eher andere Produkte als im konventionellen Beton zum Einsatz.

Sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht wichtig ist die Erkenntnis, dass der Rückgriff auf eine rezyklierte Gesteinskörnung nicht mit einem höheren Zementbedarf verbunden ist. Dies gilt auch für den Einsatz der Gesteinskörnung Typ 2.

9.3.1. Ökobilanz der Herstellung von R-Beton

Eine Ökobilanz benötigt konkrete Datensätze zu Massenflüssen und damit zu den einzelnen Rezepturbestandteilen. Die nachfolgende Diskussion und Bewertung erfolgt daher am Beispiel einer konkreten Betonsorte und damit auch Betonrezeptur. Als Beton wird entsprechend Tab. 20 ein R-Beton der Betonfestigkeitsklasse C25/30 mit einem ebensolchen Referenzbeton verglichen. In dieser Rezeptur wird im Umfang von 23% auf eine RC-Gesteinskörnung Typ 2 zurückgegriffen – bezogen auf den Anteil >2mm beträgt der Anteil 34%. Der Zementeinsatz ist um etwa 5% reduziert, kompensiert allerdings über den Einsatz von Steinkohleflugasche. Bei gleichem w/z-Wert und in etwa gleichem Fließmitteleinsatz wird der Anteil Betonverflüssiger deutlich erhöht.

Die vergleichende Ökobilanz von R-Beton und konventionellem Beton wird auf die gleichen Eigenschaften bzw. Nutzen bezogen und zwar von 1m³ als Referenzmenge.

Zunächst werden alle Emissionen- und Ressourcenverbräuche, die ab dem Ausgraben der Rohstoffe aus der Erde bis zum fertigen Beton im Betonwerk resultieren, inventarisiert. Im nächsten Schritt erfolgt eine Aggregation bestimmter Emissionen anhand wissenschaftlich abgeleiteter Gewichtungen (Charakterisierungsfaktoren) zu Wirkungskategorien, von denen der Treibhauseffekt ein Beispiel darstellt.

Beschreibung der Module und der Datensätze sowie Annahmen

Die Emissions- und Ressourcenverbrauchsdaten sind für bestimmte Prozesse als Module mit In- und Outputs in verschiedenen Ökobilanzdaten vorhanden. Hier wird vor allem auf die Ecovinent-Datenbank zurückgegriffen, wobei der Netzstrommix wo nötig über eigene Datensätze auf deutsche Verhältnisse angepasst wird. Andere Prozesse entstammen der internen Datenbank des ifeu (siehe Tab. 33).

Ein wichtiger Inputstoff beim R-Beton ist die RC-Gesteinskörnung mit der Sieblinie 2/16 mm. Beim Bauschuttrecycler fällt eine Vielzahl von Produkten an (Multi-Output-System), von denen ein Teil als Input für den R-Beton dient (siehe Kapitel 9.2). Die gesamten Lasten für die Bauschuttzubereitung können nun nach verschiedenen Kriterien auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt (alloziiert) werden. Da das Bauschuttrecycling in seiner herkömmlichen Form mit dem Produktionsziel Straßenbaustoffe unabhängig vom Einsatz von RC-Gesteinskörnung im R-Beton stattfindet, werden die damit entstehenden Lasten nicht dem R-Beton zugerechnet. Der darüber hinaus gehende zusätzliche Aufwand, der für die Bereitstellung einer qualitativ höheren RC-Gesteinskörnung für den Einsatz im R-Beton betrieben wird, wird voll der RC-Gesteinskörnung mit der Sieblinie 2/16 mm angelastet, die potenziell im R-Beton eingesetzt werden könnte. Dies entspricht dem in Kapitel 9.2.2 adressierten Mehraufwand, bezogen auf den Output 2/16 mm. Der Allokationsansatz wird vertieft im Kapitel 9.4.1 im Zusammenhang mit der Betrachtung des gesamten Lebensweges des R-Betons diskutiert. Im konventionellen Beton kommt stattdessen primäre Gesteinskörnung zum Einsatz, die mit entsprechenden Lasten für deren Gewinnung verbunden ist.

Aus ökologischer Sicht entscheidend ist die zugegebene Menge und Art des Zements. In der Betonrezeptur wird ein CEM II/B-M (T-LL) 42,5 N-AZ verwendet: Es handelt sich hierbei um einen Zement, bei dem 21 bis 35 % des Klinkers durch gebrannten Schiefer und Kalkstein ersetzt ist. Der Ersatz des Klinkers ist aus ökologischer Sicht von großer Bedeutung. Der Einsatz von gebranntem Schiefer ist eine Besonderheit einer hauptsächlich im Süden Deutschlands von der Holcim AG eingesetzten Zementart. Eine genauere Zusammensetzung dieser Zementsorte liegt nicht vor. Daher wird in der Modellierung auf geeignete Zemente zurückgegriffen, für die in der Ecoinvent-Datenbank eine Zusammensetzung hinterlegt ist. Eine Übersicht verschiedener Zemente aus Ökobilanzdatenbanken mit den bei der Herstellung freigesetzten Treibhausgasen findet sich im Anhang B in Tab. 36. Als Standard wird ein durchschnittlicher Zement aus Ecoinvent mit 21-35 % alternativen Bestandteilen (CEM II B) und einem Klinkeranteil von 68,4 % angesetzt. Als Sensitivität wird mit dem ebenso in Ecoinvent verfügbaren CEM II/A-S 42.5 mit einem Klinkeranteil von 76,4 % (Tab. 36 im Anhang B) gerechnet, um die mögliche Schwankungsbreite in der ökologischen Bewertung aufzuzeigen. Für den Vergleich von R-Beton und konventionellem Beton wird jeweils dieselbe Zementsorte betrachtet, so dass sich in der Differenz kein Unterschied ergibt, die absoluten Zahlen variieren aber mit der betrachteten Zementart.

Die Zementmenge – und hier vor allem der Portlandzement – im R-Beton darf aus ökologischer Sicht nicht höher gewählt werden als im konventionellen Beton. Dies wäre auch völlig unnötig.

Der Betonverflüssiger und das Fließmittel werden als Polycarboxylate mit 40 % aktiver Substanz abgebildet. Gemäß [68] bzw. nach [69] sind Fließmittel auf Polycarboxylatbasis weniger problematisch für die Umwelt. Da solche Fließmittel effizienter wirken und dadurch geringer dosiert werden können als diejenigen auf Melaminharzbasis, werden Betonverflüssiger heute mehrheitlich auf dieser Basis hergestellt.

Flugasche wird als Nebenprodukt von Strom aus Kohlekraftwerken ohne Lasten angerechnet: Eine Allokation (Aufteilung) der Lasten im Kohlekraftwerk zwischen den Produkten Strom und Flugasche kann nach Massegesichtspunkten oder gewichtet nach physikalischen oder ökonomischen Kriterien vorgenommen werden. Hier bietet sich eine ökonomische Allokation an, weil dadurch berücksichtigt wird, warum ein Prozess durchgeführt wird, hier nämlich zur Stromgewinnung. Die Produkte Strom und Wärme erzielen einen Preis, die Flugasche im Vergleich hierzu einen wesentlich geringeren.

Angaben zum durchschnittlichen Transport der Rohstoffe zum Betonwerk finden sich im technischen Bericht für Transportbetone [70]. Aufgeführt sind hier die Verkehrsmittel und die damit zurückgelegten Entfernungen (Tab. 37 im Anhang). Für die RC-Gesteinskörnung wird pauschal eine kürzere Transportentfernung von nur 10 km angesetzt.

Der Energieverbrauch im eigentlichen Betonwerk wird Angaben aus der Datenbank Ecoinvent entnommen und beläuft sich bezogen auf 1 m³ Beton auf 4,3 kWh Strom- und 0,4 MJ Dieserverbrauch. In [67] wurden Aufnahmen im TBS-Transportbetonwerk durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass der Aufwand für die Herstellung von R-Beton derselbe ist wie für konventionellen Beton. Daher werden diese Zahlen für beide Vergleichsbetone herangezogen.

Bewertungskriterien

Je nach Produkt sind andere Verbräuche (Input-) oder Emissionen (Output-Seite) von besonderer Bedeutung. Diese werden in den verschiedenen ökobilanziellen Wirkungskategorien gewichtet zusammengefasst, welche in einem gesonderten Kapitel im Anhang C beschrieben werden.

Auf der Output-Seite wird im Zuge der Betonherstellung durch die Bereitstellung des Zements (Vorkette) Kohlendioxid emittiert, so dass die Kategorie Treibhauseffekt betrachtet werden muss. Daneben wird Energie in Form von Strom, Wärme oder mechanischer Energie gebraucht, deren Bereitstellung mit einem Verbrennungsprozess und damit neben Kohlendioxid insbesondere mit NO_x-Emissionen verbunden ist. Dies wird über das Versauerungs- und terrestrisches Eutrophierungspo-

tenzial abgebildet. Bei den o.g. Kategorien ist allerdings kein großer Unterschied zwischen den zu vergleichenden Systemen zu erwarten. Die Gewinnung von Primär- und Sekundärgesteinen erfordert Brechvorgänge, bei denen es zu Staubemissionen kommt, die über das Feinstaubpotenzial adressiert werden.

Auf der Inputseite werden für die Darstellung der Gesteinskörnung, die in den Beton eingeht, primäre Gesteinsressourcen wie Kies, Kalkstein oder Sand benötigt. Dieser Verbrauch und der Unterschied darin zwischen R-Beton und konventionellem Beton drückt sich im kumulierten Rohstoffaufwand aus, in welchem die Masse entnommener, weiterverarbeiteter mineralischer und metallischer Rohstoffe aufsummiert wird.

Weiterhin geht mit dem Abbau von Natursteinen ein Eingriff in den Natur- und Landschaftshaushalt einher. Die Art und Tiefe des Eingriffes kann über das Hemerobiekonzept [71] in Kategorien unterteilt werden, die über die Naturferne der Flächen definiert werden. Demnach gibt es sieben Gruppen, beginnend mit der Fläche K1, die einen naturnahen Wald darstellt bis hin zur Fläche K7, die eine versiegelte oder völlig naturferne Fläche darstellt. Die Gewinnung von Steinen, Kies und Sand wird vereinfacht in letztere Flächenkategorie eingeteilt, da es sich um einen großen Eingriff in die Natur handelt. Dem steht allerdings die u.U. erfolgende Ausbildung besonderer Ökosysteme auf diesen derart genutzten Flächen gegenüber, die aus Sicht des Naturschutzes einen hohen Wert aufweisen können. Zur abschließenden Bewertung dieses Eingriffes aus ökologischer Sicht fehlt es bis dato an einem methodischen Konzept.

Der Verbrauch von fossilen Energierohstoffen nach Energiegehalten für die Erzeugung der benötigten Energie wird über den fossilen kumulierten Energieaufwand ausgedrückt, wobei hier kein großer Unterschied zwischen den Systemen zu erwarten ist.

Betrachtete Szenarien und Darstellung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die mit der Betonproduktion verbundenen Lasten von der Wiege bis zum Werkstor in den bedeutenden Wirkungskategorien dargestellt.

Verglichen wird die Bereitstellung von 1 m³ konventionellem Beton („Konv. Beton“) mit R-Beton in zwei zugehörigen Systemen, auch Szenarien genannt. Daneben wird als Sensitivität der Einfluss der gewählten Zementsorte auf das Ergebnis anhand des R-Betons aufgezeigt, indem für die ökologische Bewertung in der sonst unveränderten Betonrezeptur anstatt des CEM II/B dieselbe Menge CEM II/A-S zugrunde gelegt wird („R-Beton CEM II/A“). Als weitere Sensitivität wird daneben abgebildet, wie sich das Ergebnis für den R-Beton verändert, wenn in der Aufbereitung der sekundären Gesteinskörnung ein zusätzlicher Brechschritt erfolgen muss, um eine entsprechende Menge für den Einsatz im R-Beton zur Verfügung stellen zu können („R-Beton RC-Auf.“), wohingegen im Szenario „R-Beton“ von keinen nennenswerten Zusatzlasten beim Bauschutttaufbereiter ausgegangen wird.

Die Darstellung erfolgt sektoral nach verschiedenen Prozessen, so dass die Hauptbeiträge identifiziert werden können:

- Klinker: Produktion des im Zement enthaltenen Klinkers
- Weitere Zementbestandteile: Produktion Kalkstein, Gips, Flugasche, Ethylenglykol
- Zementwerk: Energieverbrauch (Herstellungslasten Strom)
- Gesteinskörnung und Sand: Bereitstellung von primärer und sekundärer Gesteinskörnung (R-Beton) und Sand
- Zusatzmittel Beton: Bereitstellung Flugasche, Polycarboxylate (Fließmittel, Verflüssiger)
- Transport zum Betonwerk: Antransport von Zement, Gesteinskörnung + Sand und Zusatzmitteln zum Betonwerk
- Betonwerk: Energieverbrauch (Herstellungslasten Strom)
- Transporte Betonwerk: Bereitstellung und Verbrennung von Diesel für interne Transporte über Radlader etc.

Wie man aus den Ergebnissen für den Treibhauseffekt ersehen kann, ist der Zement und hier der Einsatz von Klinker bzw. Portlandzement sehr bedeutend. Bei dessen Herstellung treten im Zuge des Brennens von Kalkstein (Kalzinierung) sowohl geogene ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) als auch durch den Einsatz fossiler Brennstoffe bedingte Kohlendioxidemissionen auf.

Zwischen konventionellem Beton und R-Beton ergeben sich kleine Unterschiede, die auf dem etwas geringeren Zementeinsatz im R-Beton (siehe Tab. 20) und damit hauptsächlich auf die entsprechend geringere Menge Klinker zurückzuführen ist. Gegenüber dem Klinker treten alle weiteren Vorketten und Prozessschritte in den Hintergrund. Kleine Vorteile für den R-Beton ergeben sich im Sektor Gesteinskörnung und Sand, weil für den Anteil der RC-Gesteinskörnung im Standardfall von kaum einer anzurechnenden Zusatzlast beim Bauschutttaufbereiter ausgegangen wird. Die kürzere Transportstrecke für RC-Gesteinskörnung zum Betonwerk führt weiterhin zu einem Vorteil im Sektor Transporte zum Betonwerk. Ein kleiner Nachteil für den R-Beton ist hingegen im Sektor Zusatzmittel Beton zu verzeichnen, weil mehr Betonverflüssiger benötigt wird, was den Vorteil bei den Transporten leicht überkompensiert.

Das Ergebnis für einen R-Beton mit einer Zementsorte, der aus ökologischer Sicht einem CEM II/A statt CEM II/B entspricht (Sensitivität), fällt durch den höheren Klinkeranteil schlechter aus, was nochmals die Bedeutung des Klinkers unterstreicht. Im Zementwerk wird darüber hinaus zur Herstellung auch noch mehr Strom verbraucht. Dies fällt aber nur wenig ins Gewicht. Für den CEM II/A fallen dagegen die Lasten im Sektor Weitere Zementbestandteile etwas geringer aus, weil kein zusätzlicher Kalk- und Gipsstein wie beim CEM II/B benötigt wird. Dies fällt aber noch weniger ins Gewicht. Wenn beim Bauschutttaufbereiter ein zusätzlicher Aufwand zur Bereitstellung von mehr RC-Gesteinskörnung für den R-Beton durch zusätzliches Brechen und Klassieren betrieben wird, steigen die Lasten im Sektor Gesteinskörnung und Sand etwas. Sie liegen dann nur noch leicht unter den Lasten des konventionellen Betons in diesem Sektor, wodurch der R-Beton dann auch nur noch leicht vorteilhaft ist.

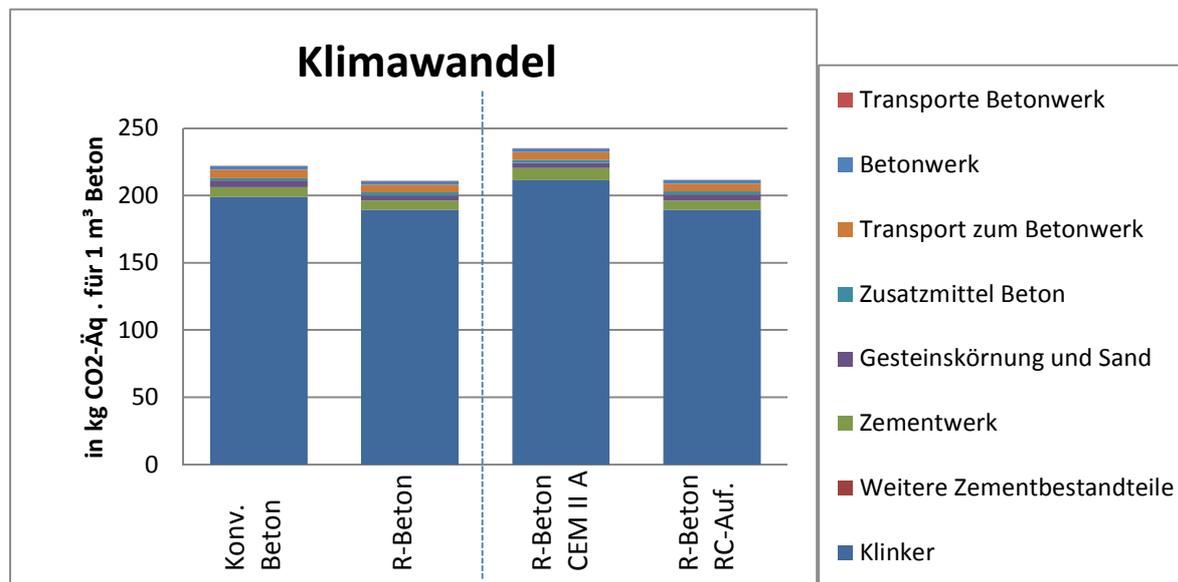


Abb. 151: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Klimawandel

Im Versauerungspotenzial tritt die Bedeutung des Klinkers gegenüber den anderen Sektoren leicht zurück, weil hier bei der Kalzinierung neben den über die Energiebereitstellung verbrennungsbedingten Emissionen keine zusätzlich geogen bedingten Emissionen dazukommen. Nichtsdestotrotz bleibt die Bereitstellung des Klinkers der dominante Sektor. Zum Versauerungspotenzial tragen sowohl SO_2 - als auch NO_x -Emissionen bei.

Der Sektor Gesteinskörnung und Sand ist über die für den Abbau benötigte Energie und das Sprengen zur Produktion von Splitt deutlich vertreten. Mit dem Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung anstatt Splitt schrumpft der Sektor dementsprechend. Weiterhin sind durch die NO_x-Emissionen die Transporte zum Betonwerk gut sichtbar, welche ebenso durch den kürzeren Antransport von RC-Gesteinskörnung im System R-Beton allerdings nur leicht sinken, weil dem ein längerer Antransport von weiteren im R-Beton eingesetzten Stoffen wie Flugasche entgegenwirkt. Daneben führt der Energieverbrauch im Zement- und Betonwerk zu entsprechenden Beiträgen in diesen Sektoren.

Mit dem Einsatz eines CEM II/A steigen durch den höheren Klinkeranteil die Lasten. Ein höherer Aufwand beim Bauschuttrecycler durch zusätzliches Brechen fällt kaum ins Gewicht, der Vorteil für R-Beton bleibt bestehen. Der kleine Nachteil von R-Beton bezüglich der Zusatzmittel für den Beton hat keine Auswirkungen, weil der Beitrag des gesamten Sektors sehr gering ist.

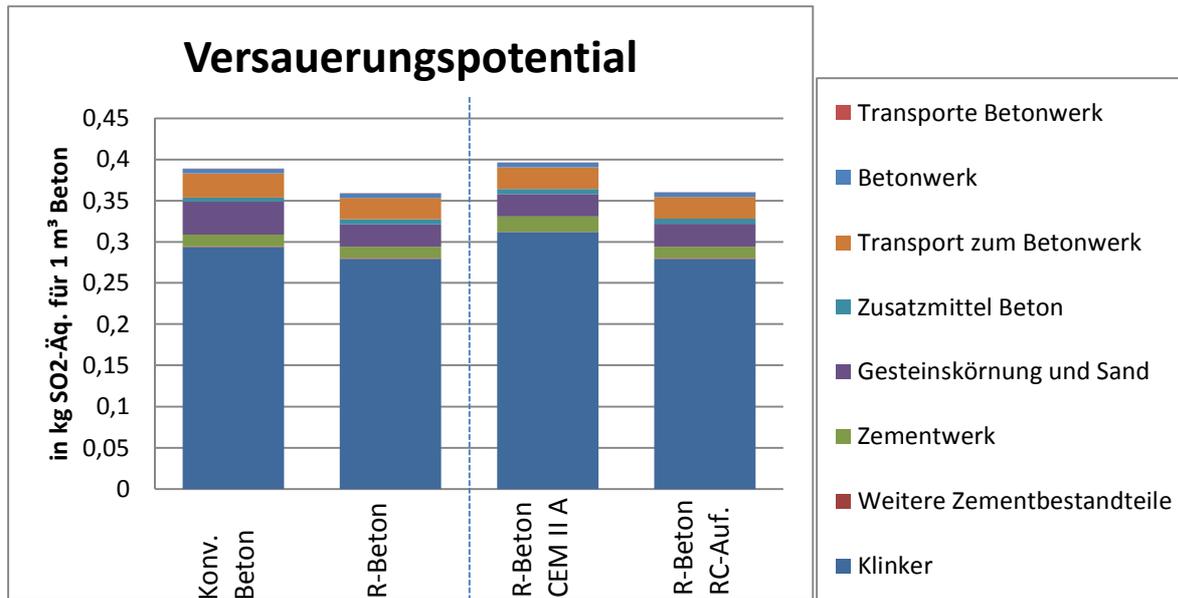


Abb. 152: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Versauerungspotential

Im terrestrischen Eutrophierungspotenzial zeigt sich ein ähnliches Bild. Hier werden fast ausschließlich die NO_x- Emissionen abgebildet, die Bedeutung der Energiebereitstellung für das Zement- und Betonwerk sinkt dadurch leicht.

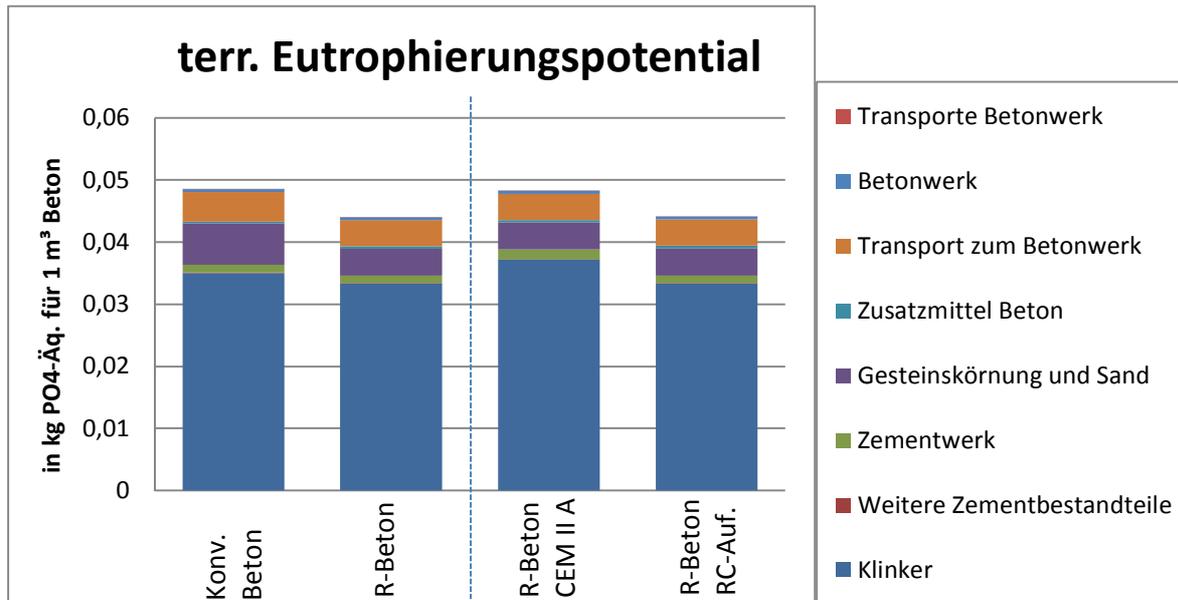


Abb. 153: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Versauerungspotential

Zur Bilanzierung des Feinstaubpotentials werden die Emissionen der Partikel $< 2,5 \mu\text{m}$ herangezogen. Die Bedeutung der Energiebereitstellung geht hier im Vergleich zu direkten Prozessemissionen durch bspw. Abbau- und Brechvorgänge zurück. Der Klinker ist weiter der dominanteste Sektor, weil für dessen Herstellung neben Energie ebenso Brechschritte nötig sind.

Aber auch die Bedeutung des Sektors Gesteinskörnung und Sand ist deutlich größer als in den bisherigen Wirkungskategorien. Dies liegt vor allem am Abbau von Stein für den Edelsplitt. Im R-Beton wird ein Anteil des Splitts durch RC-Gesteinskörnung ersetzt. Im Standardfall ohne weiteren Brechvorgang (System R-Beton) wird der RC-Gesteinskörnung kaum etwas angelastet, mit einem zusätzlichen Brechschritt in der Sensitivität (System R-Beton RC-Auf.) steigt der Beitrag etwas an, liegt aber weiterhin unter dem von Primärsplitt.

Beim R-Beton mit CEM II/A statt CEM II/B (System R-Beton CEM II A) steigen die Gesamtlasten klinkerbedingt wieder etwas an, liegen aber trotzdem unterhalb des konventionellen Betons mit CEM II/B, bedingt durch die Bedeutung der Substitution von Primärsplitt. Im Unterschied zu den anderen Wirkungskategorien ist hier auch der Sektor Weitere Zementbestandteile durch den Abbau von Gipsroh- und Kalkstein gut sichtbar, dessen Beitrag im System R-Beton mit CEM II/A wegfällt.

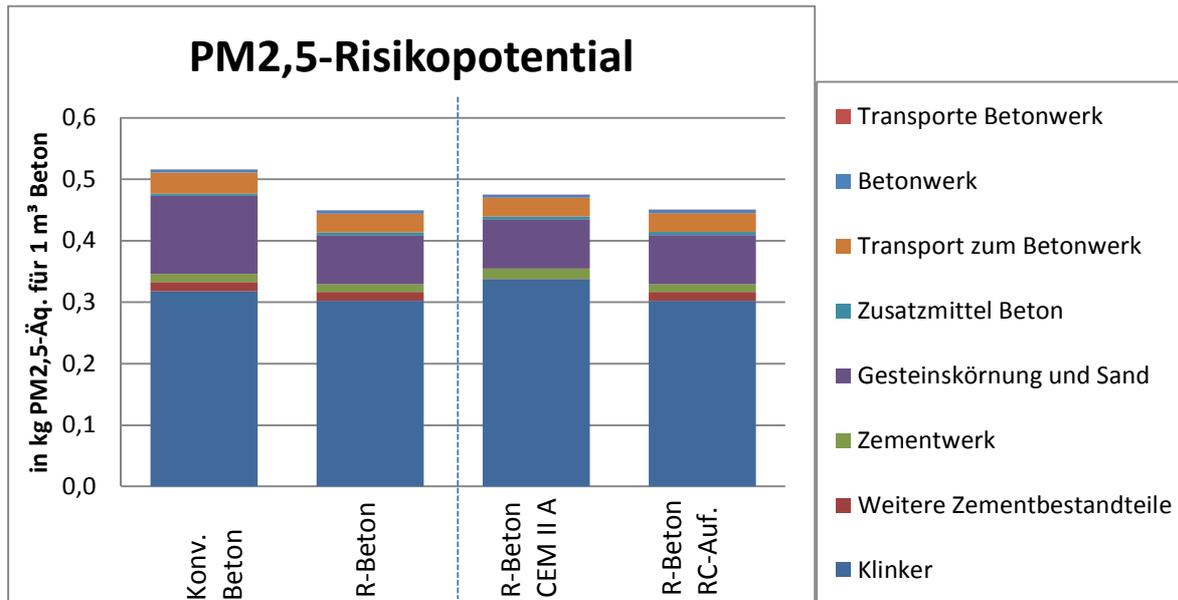


Abb. 154: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Gesundheitsrisiko durch Feinstaub

Weitere Wirkungskategorien auf Outputseite sind das Sommersmogbildungspotenzial und das Ozonabbaupotenzial. Beide Kategorien werden aufgrund ihrer geringen Aussagekraft hier nicht mit dargestellt. Da sie in Umweltproduktdeklarationen aber standardmäßig mit aufgeführt sind, soll hier kurz auf sie eingegangen werden.

Beim Sommersmogbildungspotenzial ähneln das Muster und die Aufteilung sehr dem eben behandelten Feinstaubpotenzial. Es wird von den NMVOC-Emissionen und auch vom Ausstoß von Dichlormethan und Kohlenmonoxid geprägt. Hauptverursacher sind das Sprengen beim Abbau von Primärgesteinen und die Verbrennungsprozesse.

Im Ozonabbaupotenzial tritt die Bedeutung der Bereitstellung des Klinkers weiter zurück, die Stromerzeugung, Transporte und Sprengung beim Abbau von Primärgestein gewinnen durch die damit verbundenen Lachgasemissionen an Bedeutung. Das Ozonabbaupotenzial wird vom Beitrag der Lachgasemissionen dominiert.

Hinsichtlich der Inputseite wird zunächst die Flächenbelegung in Summe aller Flächenkategorien zwischen den verschiedenen Systemen verglichen. Daher erscheinen hier auch die Sektoren Zement- und Betonwerk. In den Werken wird Strom verbraucht und für die Erzeugung des Stroms wird zu einem gewissen Anteil auch Biomasse verwendet, dessen Aufwuchs mit einer entsprechenden Flächenbelegung durch Forst oder Ackerbau einhergeht. Neben dem Klinker, dessen Gewinnung mit Flächenverbrauch für Kalksteinbrüche verbunden ist, hat hier erwartungsgemäß der Sektor Gesteinskörnung und Sand mit der dementsprechenden Flächenbelegung für die Gewinnung von primärem Kalkstein, Kies und Sand die größte Bedeutung. Auch die Prozesswärmeenergie für die Klinker-gewinnung fließt hier über den Abbau der dafür teilweise eingesetzten Steinkohle mit ein.

Insgesamt geht der R-Beton erwartungsgemäß mit einer geringeren Flächenbelegung einher als der konventionelle Beton. Der Einfluss durch den höheren Aufwand in der Aufbereitung der RC-Gesteinskörnung bei einem zusätzlichen Brech- und Klassierschritt fällt gering aus. Mit dem Einsatz eines CEM II/A- statt eines CEM II/B-Zementes steigt durch den mit dem höheren Klinkeranteil verbundenen höheren Energie- und Kalksteinbedarf die Flächenbelegung entsprechend, so dass eine Flächenbelegung wie für einen konventionellen Beton mit CEM II/B-Zement resultiert. Die Einsparung von Gips- und Kalkstein im CEM II/A kann den Anstieg nur etwas vermindern, weil damit im Vergleich zum Klinker weniger Energieeinsatz verbunden ist.

Wird nur die Flächenbelegung in den sehr naturfernen Kategorien (Fläche K7) dargestellt, dann verschwinden die Beiträge von Beton- und Zementwerk, da die netzstrombedingte Flächenbelegung nicht in dieser naturfernen Kategorie angesiedelt ist und auch die zusätzliche Aufbereitung der RC-Gesteinskörnung hat daher kaum mehr eine Bedeutung. Der Sektor Gesteinskörnung und Sand dominiert jetzt vor dem Klinker, weil für den Klinkeranteil im Beton weniger primäres Gestein abgebaut wird als in Summe an weiteren Steinen und Sand in den Beton eingebracht wird. Der R-Beton mit dem CEM II/A-Zement schneidet jetzt kaum mehr schlechter als derjenige mit dem CEM II/B-Zement ab. Der höhere Klinkereinsatz im Ersteren wird durch den geringeren Einsatz von Gips- und Kalkstein (Weitere Zementbestandteile) ohne die Energieabhängigkeit fast ausgeglichen.

Es sei aber auch an dieser Stelle nochmals erinnert, dass die Zuordnung der Steinbrüche und Gruben in die Flächenkategorie 7 – und der Flächeneingriff dadurch sehr belastend bewertet wird – nur auf einer ersten und eher vorläufigen Bewertung beruht. Hier sind in der Ökobilanzmethode noch Weiterentwicklungen notwendig.

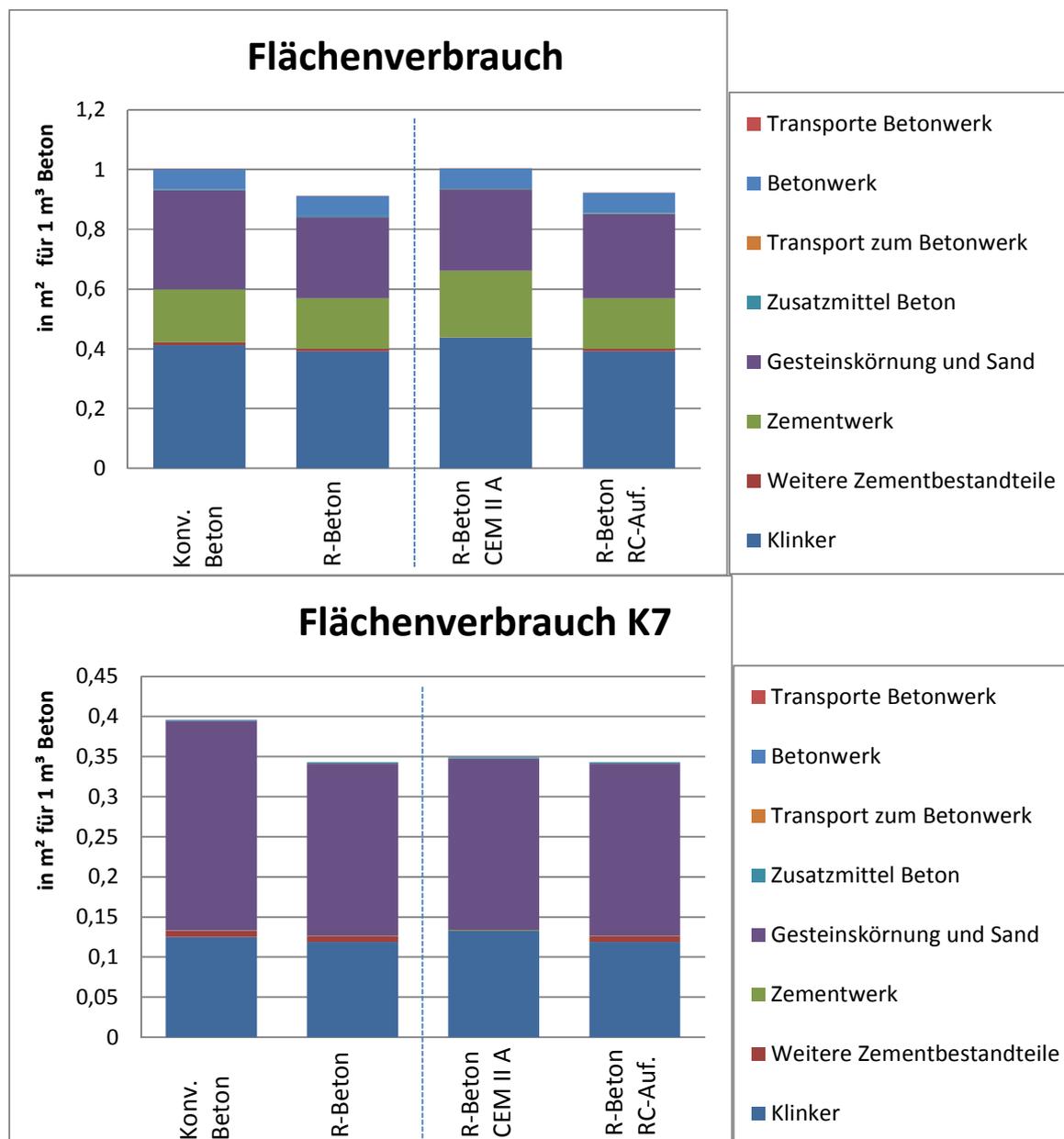


Abb. 155: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Eingriff in den Natur- und Landschaftshaushalt durch Flächenbelegung

Die Entnahme von mineralischen Ressourcen aus der Erde zur Weiterverarbeitung zeigt im mineralischen kumulierten Rohstoffaufwand über den dominanten Sektor Gesteinskörnung und Sand deutlich die Menge, die für den Einsatz im Beton benötigt wird. Schon weniger wird für den Klinker im Zement verwendet und noch weniger an zusätzlichem Kalk- und Gipsstein (Sektor Weitere Zementbestandteile) im Zement über den Klinker hinaus. Der Vorteil des R-Betons aus dem Blickwinkel der mineralischen Ressourcen spiegelt sich hier klar wieder. Da für die Energiebereitstellung kaum mineralische Ressourcen verbraucht werden, ergeben sich durch einen höheren Aufwand in der RC-Gesteinskörnung und den Einsatz eines CEM II/A- anstatt CEM II/B-Zementes keine Verschlechterungen.

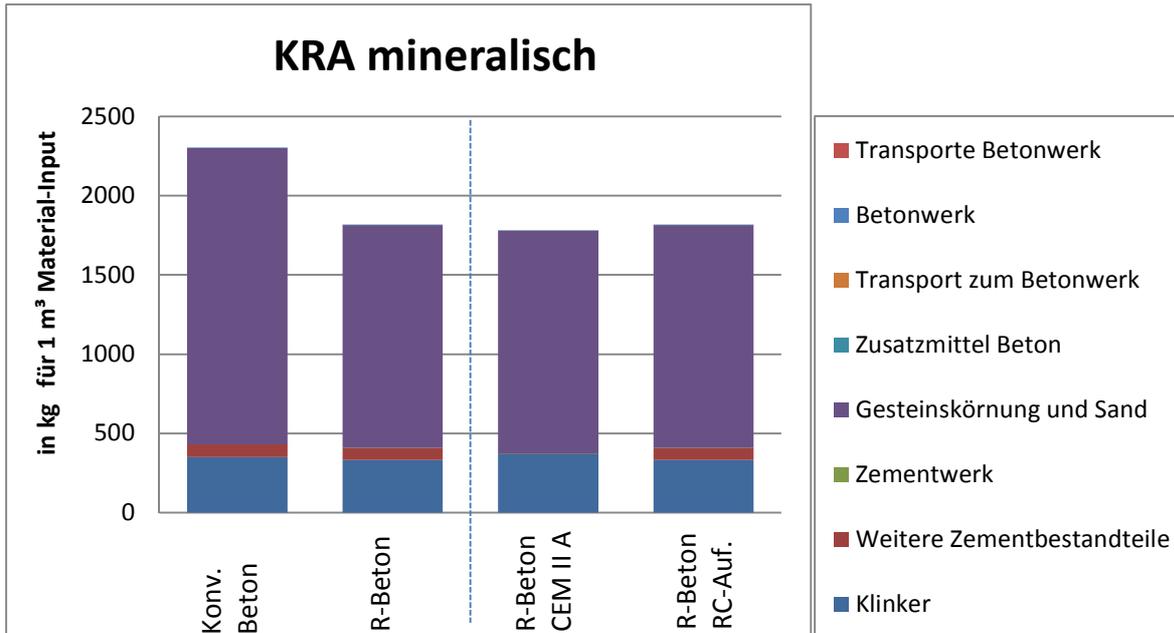


Abb. 156: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Beanspruchung von mineralischen Ressourcen

Im fossilen kumulierten Energieaufwand, der den Energiegehalt in den eingesetzten fossilen Rohstoffen beschreibt, dominiert wieder der Klinker, weil für dessen Herstellung viel Energie benötigt wird, welche zu großen Anteilen über fossile Brennstoffe zur Verfügung gestellt wird. Der Klinker ist aber nicht so dominant wie im Treibhauseffekt, wo zu den energetisch bedingten noch die geogenen Kohlendioxidemissionen hinzukommen.

Im Vergleich zum Versauerungs- und terrestrischem Eutrophierungspotenzial sind das Zement- und Betonwerk mit ihren Stromverbräuchen zu einem größeren, der Sektor Gesteinskörnung und Sand dagegen zu einem geringeren Anteil vertreten. Bei der Stromerzeugung sind die versauernden und eutrophierenden Emissionen aufgrund der guten Filtertechniken in den Kraftwerken verhältnismäßig gering, die direkten Emissionen aus dem Sprengen für die abgebauten Steine schlagen hingegen trotz relativ geringen Energieverbrauchs stärker zu Buche.

Der R-Beton hat gegenüber dem konventionellen Beton kleine Vorteile im Sektor Gesteinskörnung und Sand, weil im Standardfall dem R-Beton kaum Lasten für die Produktion der RC-Gesteinskörnung gegeben werden, und im Sektor Transport zum Betonwerk. Hier bildet sich die im Vergleich zur Primärgesteinskörnung geringere Distanz der RC-Gesteinskörnung zum Betonwerk ab. Diese Vorteile werden wie im Treibhauseffekt durch den Nachteil der erhöhten Betonverflüssigermenge geschmälert.

Dass der R-Beton sichtbar besser abschneidet als der konventionelle Beton, verdankt er aber der etwas geringeren eingesetzten Zementmenge, was sich vor allem über den dadurch eingesparten

Klinker und in demgegenüber sehr untergeordneten Maße über den damit eingesparten Stromverbrauch im Zementwerk und noch untergeordneter in den Weiteren Zementbestandteilen festmacht. Mit dem Einsatz eines CEM II/A- statt eines CEM II/B-Zementes verschlechtert sich der Beton in eben diesen Sektoren deutlich und damit aufgrund der Dominanz des Klinkers auch im Gesamtergebnis. Ein zusätzlicher Aufwand beim Bauschuttrecycler („R-Beton RC-Auf.“) führt dazu, dass dann der R-Beton in der Summe aus den Sektoren Gesteinskörnung und Sand (mit dann geringeren Vorteilen), Transport zum Betonwerk kontra Zusatzmittel Beton dem konventionellen Beton sehr knapp unterlegen ist. Das im Gesamten trotzdem immer noch bessere Abschneiden von R-Beton RC-Aufb. beruht dann ausschließlich auf dem Effekt des etwas geringeren Zementeinsatzes.

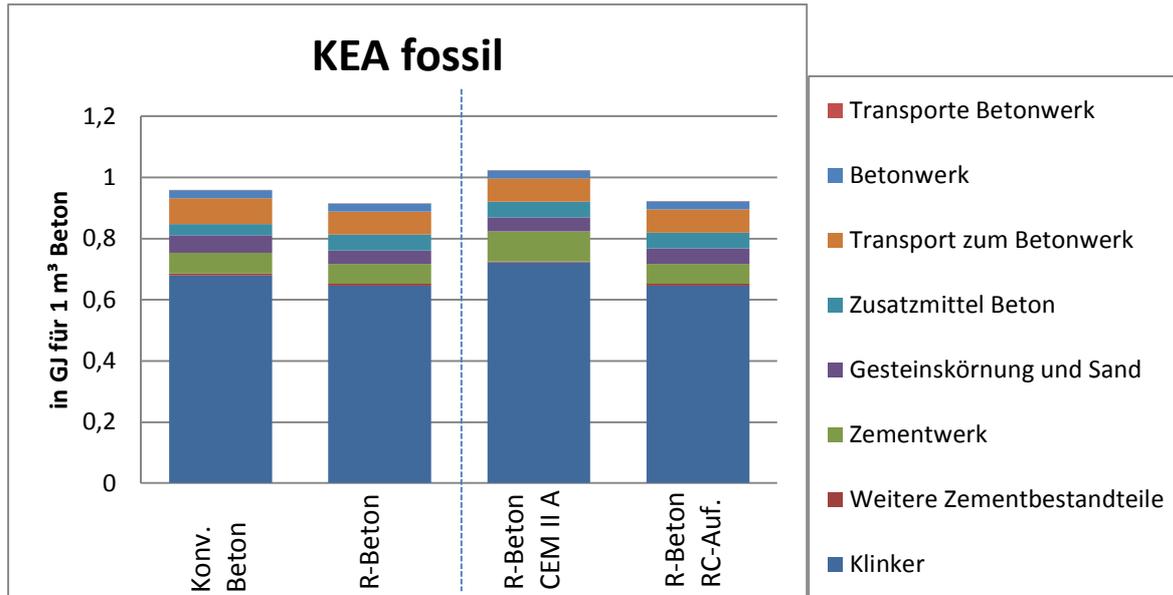


Abb. 157: Ergebnisse der vergleichenden Bewertung der Betonalternativen unter dem Gesichtspunkt Beanspruchung von fossilen Ressourcen

Einen Einfluss auf den Vergleich zwischen R-Beton und konventionellen Beton hat die ggf. unterschiedliche Transportentfernung von rezyklierter und primärer Gesteinskörnung zum Betonwerk. In folgender Tab. 29 ist der Unterschied zwischen R-Beton und konventionellem Beton hinsichtlich der relevanten Wirkungskategorien in Abhängigkeit von verschiedenen Transportdifferenzen aufgetragen. Im Standard-Fall beträgt die Differenz -29 km (10 km versus 39 km, Tab. 37 im Anhang B). Vereinfachend wird für diese Auswertung angenommen, dass die Summe der Massen aus Primärsplitt- und RC-Gesteinskörnung bei beiden Produkten gleich ist, was annähernd der Fall ist. Weiter wird davon ausgegangen, dass die Differenzstrecke mit einem LKW zurückgelegt wird.

Den größten Einfluss hat die Transportentfernung demnach im terrestrischen Eutrophierungspotenzial. Es zeigt sich, dass die Differenz in der Transportentfernung sehr groß sein muss, um den Unterschied im Ergebnis wesentlich zu beeinflussen. Eine Transportdistanz für die RC-Gesteinskörnung, die um 29 km größer ist als die der primären Gesteinskörnung (68 km vs. 39 km) und damit um 58 km größer ist als im Standardfall, reicht noch nicht aus, um das Ergebnis signifikant zu verändern.

Tab. 29: Differenz des Gesamtergebnisses von R-Beton und konventionellem Beton: Veränderung mit der Differenz der Transportentfernung von RC- und Primärgesteinskörnung zum Betonwerk

Differenz Transportentfernung RC – primäre Gesteinskörnung	+29 km	0 km	-29 km (Standard)	-60 km	-100 km
Differenz Ergebnis 1 m ³ R-Beton – 1 m ³ konventioneller Beton					
Treibhauseffekt (kg CO ₂ -äq./m ³)	-8,78	-9,59	-10,39	-11,25	-12,36
Terrestrisches Eutrophierungspotenzial (kg PO ₄ -äq./m ³)	-0,003	-0,004	-0,004	-0,005	-0,006
Versauerungspotenzial (kg SO ₂ -äq./m ³)	-0,021	-0,025	-0,028	-0,032	-0,037
Feinstaubpotenzial (kg PM _{2,5} -äq./m ³)	-0,057	-0,062	-0,066	-0,070	-0,076
Mineralischer kumulierter Rohstoffaufwand (kg/m ³)	-485	-485	-485	-485	-485

9.3.2. Aus ökonomischer Sicht

Entscheidet sich ein Betonwerk zur Produktion von R-Beton, sind damit zunächst die Entwicklung der entsprechenden Rezepturen und ihre Zulassung notwendig. Die Rezepturen lassen sich nicht von anderen Betonwerken 1:1 übernehmen. Auf diesen aufbauend bedarf es immer Rezepturen, die auf die spezifischen Eigenschaften der übrigen zur Betonherstellung verwendeten Rezepturbestandteile abgestimmt sind. Dies gilt für alle (auch konventionelle) Betonrezepturen, die erstmals in einem Betonwerk produziert werden sollen.

Wie man aus den Rezepturen in Tab. 20 ersehen kann, ändern sich diese mit der Umstellung auf die Herstellung von R-Beton nur an wenigen Stellen. Betonverflüssiger und Fließmittel sind eine wesentliche Stellschraube zur Anpassung der Rezepturen. Beide werden nur in vergleichsweise kleinen Mengenanteilen verwendet, gerade im Vergleich zu den Zuschlägen. Die Bezugskosten sind jedoch mit einigen €/Liter relativ hoch.

Die entscheidende Größe stellt in der Regel die Frage der Logistik bzw. die auf den Standorten vorhandenen Silokapazitäten dar. Zunächst liegt nahe, dass mit der Erweiterung des Produktportfolios um R-Beton die dazu erstmals notwendigen Rezepturbestandteile an den Produktionsstandorten zusätzlich vorgehalten werden müssen. Dies gilt insbesondere für die RC-Gesteinskörnung, für die ein zusätzliches Silo benötigt wird. Die Silokapazitäten der Anlagen sind meist beschränkt, eine Erweiterung um ein weiteres Silo nicht an jedem Standort ohne weiteres möglich und grundsätzlich mit entsprechenden Investitionen verbunden.

Diese beschränkten Silokapazitäten werden dann zu einem Problem, wenn R-Beton nur auf Bestellung produziert werden soll. Ähnlich zur Produktion anderer Sonderbetone muss dann die Produktion umgestellt und die damit verbundenen Rezepturbestandteile bereitgestellt werden. Dies bedeutet, dass Silos ggf. auch entleert und mit der benötigten RC-Gesteinskörnung beschickt werden müssen. Eine derartige Produktionsweise ist mit einem hohen Aufwand und entsprechenden Produktionskosten verbunden. Soll R-Beton des Öfteren produziert werden, liegt eine Erweiterung der Silokapazitäten nahe.

Deutlich anders stellt sich die Situation für Betonwerke dar, die sich entschieden haben, alle klassischen Betone für den Hausbau als R-Beton zu produzieren und auszuliefern. Transportbeton als R-

Beton unter Verwendung einer RC-Gesteinskörnung ist ein zugelassener Baustoff. Unter Beachtung der mit der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton vorgegebenen Rahmenbedingungen lässt sich jede Baustelle mit diesem Transportbeton beliefern. Nach den Erfahrungen in der Schweiz lassen sich etwa 90% der Betone im klassischen Hausbau als R-Beton einsetzen.

Diese Betonwerke produzieren einen Beton nach Eigenschaft. Gemäß der Ausschreibungen und der Anforderungen aus der Tragwerksplanung werden die Betone produziert und ausgeliefert. Die Zusammensetzung der Betonrezepturen ist für den Kunden zweitrangig. So wie auch ansonsten kaum bspw. die eingesetzte Zementart oder der Herkunft der Zuschläge beachtet wird, ist auch in diesem Falle der Sachverhalt des Einsatzes einer RC-Gesteinskörnung für den Kunden eher zweitrangig. Entscheidend ist, dass die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften sicher erreicht werden. Hierfür stehen die Qualitätssicherung und der Lieferant in der Gewährleistung.

Für die R-Betone ergeben sich dementsprechend keine gesonderten Preise. Die R-Betone werden wie konventionell hergestellte Transportbetone vermarktet. Die Verwendung einer RC-Gesteinskörnung muss sich demnach für das Betonwerk rechnen. Die Gesteinskosten der Rezepturen liegen demnach nicht höher, sondern für diese Betonwerke tendenziell niedriger.

In diesen Fällen müssen die Bezugskosten für die RC-Gesteinskörnungen die oben benannten Mehrkosten demnach mehr als auffangen. Für das Betonwerk entscheidend sind die Kosten frei Anlage, d.h. inklusive der mit der Anlieferung verbundenen Transportkosten. Wie in Kapitel 9.2.1 ausgeführt, ist die Produktion der RC-Gesteinskörnung für Recyclingwerke mit einem gegenüber den üblichen Produkten höheren Aufwand verbunden. Das absolute Preisniveau ab Produktionsbetrieb ergibt sich aus den Randbedingungen im Einzelfall und muss nicht per se niedriger liegen als für gebrochenen Naturstein oder Kies. Die entscheidende Größe ist die relative Nähe der Gesteinsproduzenten zu den Betonwerken. Und hier können Recyclingwerke grundsätzlich im Vorteil sein, da sich ihre Standorte in der Regel näher zu Städten etc. befinden, als dies für Steinbrüche oder Kiesgruben möglich ist.

Die Wirtschaftlichkeit der Herstellung von R-Beton ist für die Betonwerke demnach stark abhängig von den Bezugskosten für die RC-Gesteinskörnung und damit vom Einzelfall. Liegen Gesteinskörnungsproduzent und Betonwerke nahe beieinander, zeigt die Praxis, dass sich R-Beton als Beton nach Eigenschaft und damit ohne Preisaufschlag für Sonderbetone vermarkten lässt.

9.3.3. Fazit

Die Rezepturen von konventionell hergestelltem Transportbeton und R-Beton unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch den Austausch eines Teils der als Zuschlag eingesetzten Gesteinskörnung durch eine rezyklierte Gesteinskörnung. Der Rückgriff auf ggf. andere Betonverflüssiger und Fließmittel sowie deren Einsatz in höheren Mengenanteilen schlagen nicht zu Buche. Insbesondere muss bei einem R-Beton im Unterschied zur vergleichbaren konventionellen Betonrezeptur nicht mehr Zement eingesetzt werden.

Wie man aus den Ausführungen in Kapitel 9.3.1 ersehen kann, lassen sich zwischen den Betonalternativen keine größeren Unterschiede in den Umweltlasten ableiten. Die Baustoffalternative R-Beton kann in den klassischen Umweltwirkungen leicht vorteilhaft sein.

Eine wesentliche Stellgröße sind Transportentfernungen und hier die Entfernungen zur Anlieferung der Gesteinskörnungen. Die hier für die Ökobilanz zu Grunde gelegten durchschnittlichen Entfernungen zum Antransport von primärer und rezyklierter Gesteinskörnung unterscheiden sich nicht wesentlich. In der Praxis können sich aber insbesondere dann deutlich größere Unterschiede ergeben, wenn sich das Transportbetonwerk im städtischen Umfeld befindet. Kiesgruben und Steinbrüche sind

hier eher unwahrscheinlich, wohl aber Standorte von Bauschuttzubereitern und damit Produzenten einer rezyklierten Gesteinskörnung.

Dies ist auch der wesentliche Ansatzpunkt für Betonwerke, ihre Portfolio um R-Beton zu erweitern und bei der Herstellung von konventionellen für den Hausbau verwendeten Betonen auf rezyklierte Gesteinskörnung zurückzugreifen. Hieraus resultiert aus ökonomischer Sicht der entscheidende Kostenvorteil, der Betonwerke in den Rezepturkosten entlastet. Für ein Betonwerk entscheidend sind die Rohstoffpreise frei Anlage.

Aus ökonomischer Sicht ist der R-Beton für ein Transportbetonwerk dann interessant, wenn die rezyklierte Gesteinskörnung aus dem näheren Umfeld und damit kostengünstiger angeliefert werden kann.

Aus ökologischer Sicht entscheidend ist die mit dem Rückgriff auf rezyklierte Gesteinskörnungen verbundene Schonung von primären Rohstoffvorkommen, wie man auch aus der Abwägung des KRA d.h. des Kumulierten Rohstoffaufwandes ersehen kann. Hiermit ist zudem ein wesentlicher Baustein zur Steigerung der Rohstoffproduktivität erreicht – siehe Kapitel 9.1.

9.4. Die Bewertung von R-Beton in Anlehnung an eine Umweltproduktdeklaration

Mittlerweile existieren für eine Vielzahl von Umweltproduktdeklarationen für Produkten und hier insbesondere auch für Bauprodukte. Mit diesen Deklarationen wollen Hersteller die potenziellen Kunden über die Umweltfreundlichkeit ihrer Produkte informieren. Um sicherzustellen, dass die in den Umweltproduktdeklarationen enthaltenen Informationen und Aussagen fachlich korrekt abgeleitet sind, müssen diese den in Normen festgelegten Anforderungen entsprechen.

Umweltproduktdeklarationen für Baustoffe sollen einen harmonisierten Überblick über die ökologischen Auswirkungen bei der Produktion und Verwendung derselben ermöglichen. Das Referenzdokument hierfür ist die Norm EN 15804 [72], wie sie 2012 durch das CEN (European Committee for Standardization) vorgelegt wurde.

Es lassen sich darüber auch verschiedenen Baustoffen mit denselben Funktionen miteinander vergleichen. Das Institut für Bauen und Umwelt e.V. (IBU) hat zahlreiche entsprechende Deklarationen für verschiedene Baustoffe herausgegeben. Hier werden auch Betone verschiedener Festigkeitsklassen aufgeführt.

Die Anforderungen entsprechen denen einer herkömmlichen Ökobilanz. Darüber hinaus werden die auszuwertenden Wirkungskategorien und auszuweisenden Indikatoren bezüglich Ressourcenverbrauch und Abfallgenerierung festgelegt. Die Auswertung erfolgt zudem über den ganzen Lebensweg, der die Abschnitte Produktion, Nutzung und Verbleib als Abfall beim Abbruch eines Produktlebensweges enthält.

9.4.1. Methodische Festlegungen

Im Unterschied zur vorangegangenen Ökobilanzierung der Herstellung des Betons bis zum Fabrikator (Kapitel 9.3) wird hier der gesamte Lebensweg des Betons von der Wiege bis zur Bahre, d.h. inklusive Nutzungs- und Abbruchphase betrachtet. Dafür gilt es, die Grenzen des Systems eindeutig festzulegen, um zu verhindern, dass es in Überschneidung mit aus dem Abbruchmaterial generierten Nachfolgeprodukten und dem Input von RC-Gesteinskörnung in R-Beton zu Doppelzählungen kommt. Die

Systemgrenzen sind bei konventionellem und R-Beton grundsätzlich dieselben. Sie haben beide denselben technischen und zeitlichen Nutzen, damit ist das Gebot der Nutzengleichheit zwischen den zu vergleichenden Systemen gewahrt.

Bei dem Abbruch eines Gebäudes entsteht Bauschutt, der in Anteilen auch den Altbeton enthält. Die konventionelle Bauschuttaufbereitung ist die gängige Form der Entsorgung dieses Materials und ist damit voller Bestandteil des betrachteten Systems. Der Aufwand für darüber hinausgehende Aufbereitungsschritte und der Nutzen daraus im Folgesystem (Substitutionserfolg) kann durch eine Systemraumerweiterung oder eine Allokation zwischen dem betrachteten und dem Folgesystem aufgeteilt werden.

Eine Systemraumerweiterung bedeutet eine Allokation zwischen betrachtetem System und dem Nachfolgesystem im Verhältnis von 100:0: Dem betrachteten System wird der Aufwand für zusätzliche Verwertungsschritte des Bauschutts bis zum Produkt voll angelastet und es erhält eine volle Gutschrift, welche über die Substitution von Primärmaterial durch den verwerteten Bauschutt im Folgeprodukt definiert ist. Im hier diskutierten Fall wäre dies der zusätzliche Aufwand zur Bereitstellung einer RC-Gesteinskörnung für den Einsatz in einem nachfolgenden R-Beton und eine Gutschrift für den Ersatz einer entsprechenden Menge Primärgesteinskörnung in diesem. Der Rest des Nachfolgesystems muss nicht betrachtet werden, weil Aufwand und Gutschrift hierfür vom betrachteten System unabhängig sind und sich gegenseitig herauskürzen.

Da bei der 100:0-Allokation die Substitution von Primärmaterial dem abgebenden System angerechnet wird, muss umgekehrt für den Input an RC-Gesteinskörnung im betrachteten System der Aufwand für die Bereitstellung des konventionell eingesetzten Primärmaterial angelastet werden, weil sonst eine Doppelzählung des Nutzens im abgebenden und aufnehmenden System erfolgen würde. Im konkreten Fall bedeutet das, dass bei der 100:0-Allokation sowohl für den R-Beton als auch den konventionellen Beton gleichermaßen derselbe Aufwand für die Produktion von Primärgesteinskörnung, die im R-Beton durch RC-Gesteinskörnung substituiert wird, angelastet wird. Der Anreiz ergibt sich bei diesem Ansatz aus der Anrechnung des Nutzens in der Bereitstellung von RC-Gesteinskörnung für R-Beton in nachfolgenden Systemen, nicht aber im Einsatz derselben im eigentlich betrachteten System, also in der Aufbereitung für Folgesysteme anstatt dem RC-Anteil im eigenen Produkt. Der Ansatz ist für die Bilanzierung R-Beton weniger geeignet, sondern eher für Produkte, die nicht aus Recyclingmaterial hergestellt werden können und deren ökologisches Optimierungspotenzial sich daher auf eine hochwertige Verwertung beschränkt (Produktverantwortung).

Die hier verfolgte Allokation ist der 0:100- oder auch **Cut-Off-Ansatz** (Abb. 158). Nach dem Abbruch wird hier weder eine weitergehende Verwertung noch eine Gutschrift für die Substitution von Primärmaterial in nachfolgenden Systemen gegeben. Die Fokussierung erfolgt ganz auf das betrachtete System, daher der Name Cut-Off. Für den Input der RC-Gesteinskörnung gilt dann, dass das Material aus der konventionellen Bauschuttaufbereitung ohne Lasten in das System eingeht, weil hierfür umgekehrt kein Nutzen im abgebenden System erteilt wird. Lediglich die zur Produktion der hochwertigen RC-Gesteinskörnung für Betonwerke zusätzlich notwendigen Aufbereitungsschritte werden dem betrachteten System angelastet. Der Anreiz liegt hier beim Einsatz von RC-Gesteinskörnung im betrachteten System, d.h. dem RC-Anteil im eigenen Produkt und nicht in der Aufbereitung für Folgesysteme. Für das hier betrachtete System ist dieser Ansatz am besten geeignet. Der Einfluss auf die Hochwertigkeit der Verwertung wird über den Einsatz im Produkt selbst erwirkt.

Als "Kompromiss" zwischen 100:0- und 0:100-Allokation fungiert die 50:50-Allokation, welche auch durch das Umweltbundesamt für bspw. Verpackungsökobilanzen empfohlen wird. Dadurch wird sowohl die Strategie einer hochwertigen Verwertung (Produktverantwortung) als auch der Einsatz von RC-Material im eigenen Produkt "befeuert".

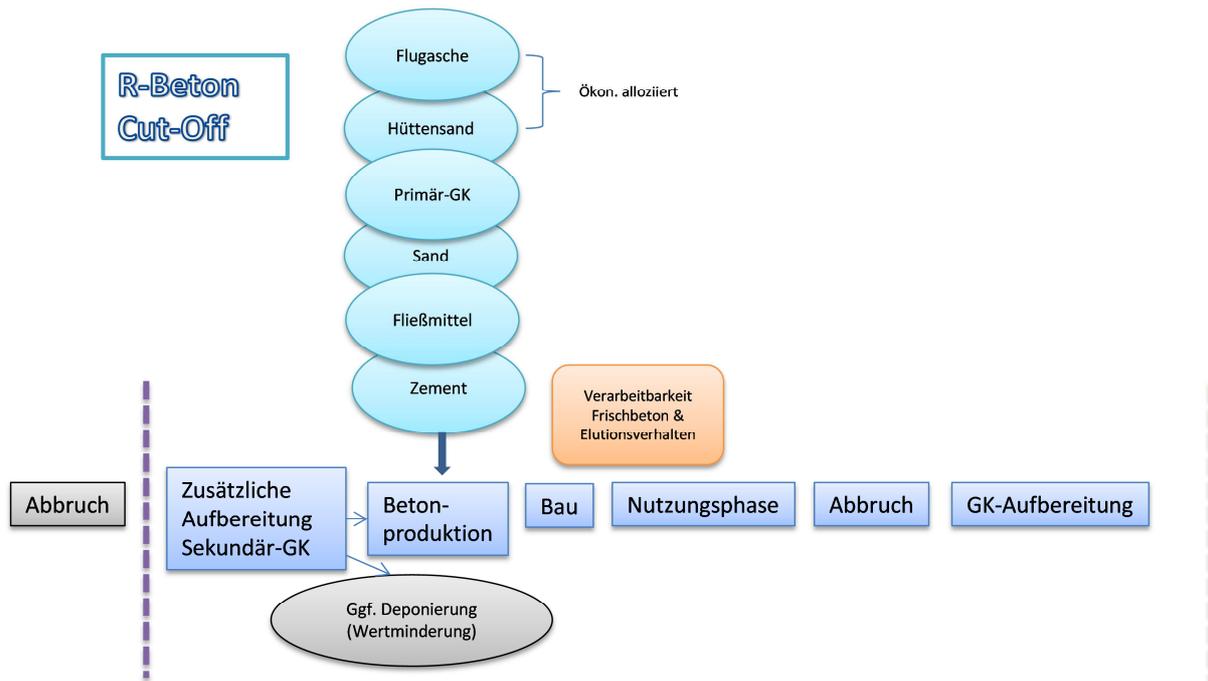


Abb. 158: Systemgrenzen nach dem Cut-Off- Ansatz

Die Produktionsphase wird in der Übersicht zur Umweltproduktdeklaration über die Sektoren Rohstoffversorgung, Transport und Herstellung abgebildet (A-Module in Abb. 158). In einem weiteren Schritt wird in [73] die Produktionsphase in die weiteren Sektoren Zementherstellung, Förderung/Herstellung Gesteinskörnung, Zusatzmittelherstellung, Verbrauch von Elektrizität und Erdgas im Betonwerk, interne Transporte im Betonwerk und Transport der Betonausgangsstoffe zum Betonwerk aufgeteilt. Dies deckt sich mit der im vorangegangenen Kapitel 9.3 erstellten Ökobilanz für die Herstellung von Beton, in welcher zusätzlich die Zementherstellung noch weiter in Klinker, Weitere Zementbestandteile und dem Energieverbrauch im Zementwerk ausdifferenziert ist.

Basis hierfür ist somit die Ökobilanz aus dem vorangegangenen Kapitel.

Als weitere Schritte fallen in der Vornutzungsphase des Gebäudes noch der Transport zur Baustelle und der Einbau ins Gebäude an. Diese sind wie die Nutzungs- (B-Module) und Abbruchphase (C-Module) sowie Wiedergewinnungspotenzial (D-Module) zwischen den Systemen identisch. Daher werden die in [73] veröffentlichten Zahlen hier übernommen.

Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport zur Baustelle	Einbau ins Gebäude	Nutzung / Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau / Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	MND	MND	x	x	x	MND	x

Abb. 159: Aufteilung des Produktlebensweges von Transportbeton in einzelne Abschnitte bzw. Phasen [73]

Für eine Umweltproduktdeklaration eines ressourcenschonenden R-Betons muss neu die oben abgeleitete Berechnungsweise für die Ermittlung der Lasten der eingesetzten RC-Gesteinskörnung eingeführt werden. Wie schon oben bei der Ableitung der Nutzengleichheit beschrieben, ist der Nutzen des konventionell hergestellten und des R-Beton gleich. Der R-Beton unterliegt den gleichen Regelwerken. Er muss die geforderten Frisch- und Festbetoneigenschaften in gleicher Weise erfüllen, was

über die Qualitätssicherung abgesichert wird und wofür das Betonwerk in der Gewährleistung steht. Mit dem Einsatz von R-Beton sind damit ausdrücklich keine Anpassungen in der Konstruktion der Gebäude oder in der Tragwerksplanung notwendig.

Der Unterschied zwischen konventionell hergestelltem und R-Beton beschränkt sich neben der Bereitstellung der Gesteinskörnung ggf. auf die Transportentfernungen bzw. Anlieferentfernung zum Betonwerk. In Form von Break-Even-Darstellungen kann gezeigt werden, ab welchem Unterschied in dieser Distanz zwischen beiden Systemen das Ergebnis zugunsten des einen bzw. anderen Systems ausfällt.

Wichtig ist, dass bei der gewählten Allokationsmethodik das Modul D mit dem Wiedergewinnungspotenzial nur ausgewiesen, nicht aber angerechnet werden darf.

9.4.2. Quantifizierung und Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse für die in der Umweltproduktdeklaration betrachteten Wirkungskategorien sind in Tab. 28 dargestellt. Für eine weitere Untergliederung der Lasten aus der Betonproduktion sei auf das vorangegangene Kapitel 9.3 verwiesen.

Es werden jeweils die Ergebnisse für den R-Beton und den konventionellen Beton dargestellt. Für den R-Beton wird für die Module A1 bis A3 auf die Ergebnisse zurückgegriffen, die in Kapitel 9.3 für die Sensitivität „R-Beton RC-Auf.“ errechnet wurde. Bei diesem Szenario wird unterstellt, dass für die Produktion einer hochwertigen Gesteinskörnung für die Betonindustrie ein zusätzlicher Brech- und Klassierschritt notwendig wird. In den weiteren Abschnitten des Produktlebensweges Beton unterscheidet sich R-Beton nicht vom konventionell hergestellten Beton. Die in Tab. 28 für die übrigen Module dargestellten Datensätze wurden deshalb direkt aus [73] übernommen.

Um an die bisherigen, durch das Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) herausgegebenen Ökobilanzen für Beton und insbesondere an [73] anzuknüpfen, werden hier auch das Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht (ODP), das Bildungspotential für troposphärisches Ozon (POCP), das Potential für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADP el.) sowie das Potential für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (ADP foss.) dargestellt. Die Aussagekraft des ODP und POCP ist limitiert, nicht immer liegen die für die Bewertung notwendigen Emissionsdaten sicher aus allen Prozessen vor. Wenn in dem einen Prozess aufgrund einer besonders intensiven Erhebung bestimmte Emissionen bekannt sind, die in dem anderen Prozess fehlen, können daraus Datenasymmetrien folgen, die das Bilanzierungsergebnis verfälschen, da die Ergebnisse möglicherweise eher die Unzulänglichkeiten in den Datensätzen widerspiegeln. Dies ist bei der Interpretation der Daten zu beachten.

In ADP el. und ADP foss. fließt als normierende Größe die statische Reichweite der abgebauten Ressourcen ein. Wie relativ und variabel eine solche Reichweite sein kann, hat sich bspw. beim Erdöl schon gezeigt. Eine alternative und objektivere Darstellung dieses Sachverhaltes wird mit dem im vorangegangenen Kapitel 8.3 gezeigten mineralischen kumulierten Rohstoffaufwand erreicht. Auf die Abbildung des ADP foss. wird verzichtet, weil die hiermit abgefragte Information besser über den in Tab. 32 ausgewiesenen nicht-erneuerbaren kumulierten Energieaufwand (Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger und Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung) ausgedrückt wird. Der Verbrauch von Süßwasserressourcen ist im Gegensatz zu ariden und semi-ariden Gebieten in Deutschland nicht kritisch.

Die Angaben zu Abfallmassen sind wenig aussagekräftig, weil es sich hier um die Angaben von ausschließlich Massen handelt. Abfall an sich ist kein Umweltproblem, sondern wird erst durch die notwendige Entsorgung zu einem –insbesondere wenn die Behandlung nicht fachgerecht erfolgt. Die Umweltauswirkungen für die Behandlung des Abfalls werden hingegen schon über die anderen Wirkungskategorien abgebildet. Auf die Darstellung der Masse der Abfälle und Stoffe zum Recycling wird deshalb hier ebenso verzichtet.

Tab. 30: R-Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration nach Umweltwirkungskategorien

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1	C2	C3	D
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	[kg CO ₂ -Äq.]	211,5	3,0	1,35	0	3,02	0,47	0,47	-23,08
Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	[kg CFC11-Äq.]	2,82E-5	1,6E-10	3,06E-9	0	1,6E-14	2,65E-11	7,4E-11	-9,6E-8
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	[kg SO ₂ -Äq.]	0,360	0,0094	9,18E-3	0	0,0288	4,74E-3	0,013	-0,041
Eutrophierungspotenzial (EP)	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	0,057	0,0021	1,86E-3	0	6,13E-3	1,02E-3	2,80E-3	-5,9E-3
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	[kg Ethen Äq.]	0,015	0,0012	6,49E-4	0	3,73E-3	7,12E-4	1,70E-3	-4,1E-3
Potenzial f. d. abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADP_{ei})	[kg Sb Äq.]	4,82E-6	1,37E-7	5,15E-8	0	1,39E-7	2,17E-8	6,34E-8	-1,9E-6

Tab. 31: konventionell hergestellter Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration nach Umweltwirkungskategorien

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1	C2	C3	D
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	[kg CO ₂ -Äq.]	221,8 (211,1)	3,0	1,35	0	3,02	0,47	0,47	-23,08
Abbau Potenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP)	[kg CFC11-Äq.]	3,12E-5 (6,9E-7)	1,60E-10	3,06E-9	0	1,63E-14	2,65E-11	7,45E-11	-9,57E-8
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	[kg SO ₂ -Äq.]	0,389 (0,297)	0,0094	9,18E-3	0	0,0288	4,74E-3	0,013	-0,041
Eutrophierungspotenzial (EP)	[kg PO ₄ ³⁻ -Äq.]	0,062 (0,0472)	0,0021	1,86E-3	0	6,13E-3	1,02E-3	2,80E-3	-5,91E-3
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (POCP)	[kg Ethen Äq.]	0,017 (0,0361)	0,0012	6,49E-4	0	3,73E-3	7,12E-4	1,70E-3	-4,05E-3
Potenzial f. d. abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen (ADP_{ei})	[kg Sb Äq.]	4,17E-4 (3,8E-4)	1,37E-7	5,15E-8	0	1,39E-7	2,17E-8	6,34E-8	-1,90E-6

Im Vergleich der Werte für den konventionellen Beton in Tab. 31 und den Angaben in [73] des Moduls A1-A3 (in Klammern darunter) fällt auf, dass die hier im Forschungsprojekt ermittelten Zahlen mit Ausnahme des POCP über den Werten aus IBU liegen. Die Größenordnungen sind aber außer beim ODP zumindest ähnlich. Beim ODP stellt sich zum einen die Frage der oben beschriebenen Datensymmetrie und zum anderen die der Anrechnung von Distickstoffmonoxid (Lachgas).

Die in Tab. 33 abgebildeten Energieverbräuche des Moduls A1-A3 sind ebenso etwas größer als in [73], der Wasserverbrauch sogar deutlich größer, wobei Kühlwasser nicht hinzugerechnet ist. Die Unterschiede ergeben sich u.a. durch die Wahl der zugrundeliegenden Datensätze. Hier wird vielfach auf Daten von Ecoinvent zugegriffen, die um eigene Daten insbesondere bezüglich der Energiebereitstellung ergänzt sind (Tab. 35 im Anhang B). In den Ecoinvent-Daten sind die Sekundärstoffe nicht separat aufgeführt, so dass auch keine Angabe für Sekundärbrennstoffe gemacht werden kann. Ein Vergleich zwischen dem hier abgeleiteten R-Beton und konventionellem Beton aus [73] ist daher nur eingeschränkt möglich, weshalb hier der konventionelle Beton auf der gleichen Datengrundlage mitgeführt wird, um einen Vergleich zum R-Beton zu ermöglichen.

Wie im vorangegangenen Kapitel für die Module A1-A3 beschrieben, schneidet der R-Beton in allen Kategorien etwas günstiger ab als der konventionelle Beton. Gerade im Hinblick auf die Ressourcen ist dies deutlich der Fall. In den anderen Kategorien wird dies hauptsächlich durch den etwas geringeren Zementeinsatz für den R-Beton verursacht. Bei gleichem Zementgehalt im R-Beton und konventionellem Beton verbleiben nur noch sehr geringe Vorteile durch die Einsparung der Mehrlasten für die Gewinnung primärer Rohstoffe in Abhängigkeit der Anrechnung der Lasten aus der Ausschuttaufbereitung und geringerer Transportentfernung für die RC-Gesteinskörnung zum Betonwerk, was zum Teil wiederum durch die höhere Menge Betonverflüssiger und den weiteren Antransport von Flugasche aufgehoben wird.

Die Daten für alle weiteren Module A4 bis D werden auch für den R-Beton direkt aus [73] übernommen. Es ist kein Unterschied zwischen R-Beton und konventionellem Beton ab Werkstor und während der Nutzungs- und Nachnutzungsphase zu verzeichnen. Das Modul D ist nur zur Information gedacht, welche Lasten im Folgeprodukt durch den Einsatz der RC-Gesteinskörnung eingespart werden kann. Es darf aber nicht mit den Ergebnissen von A1 bis C3 verrechnet werden, weil sonst in A1 beim R-Beton eine Doppelzählung des Nutzens der RC-Gesteinskörnung resultieren würde.

Tab. 32: R- Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration zum Ressourcenverbrauch

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1	C2	C3	D
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	45,9	1,6	0,43	0	1,7	0,26	0,762	-47,1
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0	0	0	0	0	0	0	0
Total erneuerbare Primärenergie (PE _{ern})	[MJ]	45,9	1,6	0,43	0	1,7	0,26	0,762	-47,1
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	957	41,0	19,00	0	42,0	6,55	19,2	-319,0
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0	0	0	0	0	0	0	
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PE _{nerm})	[MJ]	957	41,0	19,00	0	42,0	6,55	19,2	-319,0
Einsatz von Sekundärstoffen	[MJ]	0 ¹	0	0	0	0	0	0	0
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0 ¹	0	0	0	0	0	0	0
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0 ¹	0	0	0	0	0	0	0
Einsatz von Süßwasserressourcen	[m ³]	1,27	0	0	0	0,044	0	0	0

¹ nicht separat ausgewiesen

Tab. 33: konventionell hergestellter Beton – Ergebnis der Umweltproduktdeklaration zum Ressourcenverbrauch

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1-B5	C1	C2	C3	D
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	47,4 (77,1)	1,6	0,43	0	1,7	0,26	0,762	-47,1
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0	0	0	0	0	0	0	0
Total erneuerbare Primärenergie (PE _{ern})	[MJ]	47,4 (77,1)	1,6	0,43	0	1,7	0,26	0,762	-47,1
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	993 (909,0)	41,0	19,00	0	42,0	6,55	19,2	-319,0
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0	0	0	0	0	0	0	
Total nicht erneuerbare Primärenergie (PE _{ern})	[MJ]	993 (909,0)	41,0	19,00	0	42,0	6,55	19,2	-319,0
Einsatz von Sekundärstoffen	[MJ]	0 ¹ (73,1)	0	0	0	0	0	0	0
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0 ¹ (164,6)	0	0	0	0	0	0	0
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0 ¹ (320,9)	0	0	0	0	0	0	0
Einsatz von Süßwasserressourcen	[m ³]	1,36 (0,228)	0	0	0	0,044	0	0	0

¹ nicht separat ausgewiesen

In den Umweltproduktdeklarationen soll der Norm entsprechend auch auf die Karbonatisierung des Betons in der Nutzungsphase und der damit verbundenen CO₂-Aufnahme eingegangen werden. Der Effekt ist noch nicht über eine hinreichende Anzahl von Studien quantifiziert. Daher wird hier auf die Nennung einer Größe verzichtet. Auch hier ist jedoch kein Unterschied zwischen konventionellem und R-Beton zu erwarten, weil in beiden Fällen Zementstein enthalten ist und lediglich die Gesteinskörnung teilweise substituiert wurde.

9.4.3. Fazit

Für die ökologische Bewertung des R-Betons spielen die Systemgrenzen und die Verteilung des Nutzens zwischen dem System, das konventionell aufbereiteten Bauschutt bereitstellt und dem, das diesen abgibt, eine wesentliche Rolle. Diese Überlegung hat bei der bisherigen Bewertung des konventionellen Betons in Umweltproduktdeklarationen keine besondere Rolle gespielt, weil kaum Sekundärmaterial in das System eingebracht wurde. Hier stellt sich jetzt die Frage, ob der konventionell aufbereitete Bauschutt ohne Lasten in das System R-Beton eingebracht wird und daher dem System am Lebenswegende auch keine Gutschrift dafür erteilt wird (Cut-Off-Ansatz), oder ob im System R-Beton der Produktion der RC-Gesteinskörnung die Lasten für die Produktion einer primären Gesteinskörnung angerechnet werden und dafür am Lebenswegende eine Gutschrift erteilt wird. Es wird hier ersterer Ansatz gewählt, weil dadurch der Einsatz von Sekundärmaterial im Beton gefördert wird, mit dem zweiten nicht. Weiterhin gäbe es im zweiten Fall keinen Unterschied in der Produktion von primärer und RC-Gesteinskörnung. Mit dem hier gewählten Ansatz fällt als Last für die RC-

Gesteinskörnung dann nur der zusätzliche Aufwand an, um eine höherwertigere bzw. quantitativ größere Menge RC-Gesteinskörnung für RC-Beton zur Verfügung zu stellen.

Die Ergebnisse für die Produktionsphase gleichen denen aus dem vorangegangenen Kapitel zum Vergleich der Produktion einer bestimmten Menge Beton. Wie sich dort schon gezeigt hat, gibt es keine nennenswerten Unterschieden zwischen R-Beton und konventionellem Beton mit Ausnahme des Ressourcenverbrauchs und der Flächenbelegung. In der Umweltproduktdeklaration werden standardmäßig weitere Wirkungskategorien ausgewertet, deren Aussagekraft aufgrund von Lücken in Datensätzen eingeschränkt sein kann. Auch diese Kategorien bestätigen aber das abgeleitete Muster. Das Potenzial für abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen nimmt eine Wichtung über die statische Reichweite vor, so dass die primäre Gesteinskörnung gegenüber dem Gipsstein im Zement kaum mehr eine Bedeutung hat, obwohl erstere mengenmäßig viel größer ist. Die Ergebnisse des kumulierten Rohstoffaufwandes sind demgegenüber viel transparenter und zeigen den tatsächlichen Ressourcenverbrauch, der mit dem Abbau der primären Gesteinskörnung verbunden ist.

In der Einbau-, Nutzungs- und Nachnutzungsphase gibt es keine Unterschiede zwischen R- und konventionellem Beton. Es wurden daher für beide Betone direkt die Werte aus einer vorhandenen Umweltproduktdeklaration übertragen.

Insgesamt gibt es aus ökologischer Sicht keinen Grund, nicht auf R-Beton zu setzen. Einen Einfluss bei sonst gleichem Ergebnis kann neben dem Ressourcenverbrauch wie im vorangegangenen Kapitel gezeigt die kürzere Transportentfernung der RC-Gesteinskörnung zum Betonwerk im Vergleich zu derjenigen der Primärgesteinskörnung haben.

10. Erhöhung des Bekanntheitsgrads von R-Beton im Hochbau

10.1. Durchführung und Auswertung von Umfragen

Bei Bauherren, Architekten, Tragwerksplanern sowie den herstellenden Betrieben (Betonwerke, Betonfertigteilwerke) ist R-Beton überwiegend unbekannt. Um den Bekanntheitsgrad zu erfassen und bewusst zum Bekanntwerden beizutragen, wurden im Rahmen dieses Projekts Umfragen mit Vertretern der Architekten, Tragwerksplaner und Betonfertigteilhersteller in Baden-Württemberg durchgeführt und ausgewertet. Die Befragung der Architekten erfolgte mit Unterstützung des Instituts Fortbildung Bau (ifbau) der Architektenkammer Baden Württemberg, die Befragung bei den Fertigteilherstellern mit Unterstützung des Fachverbands Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e.V. und die Umfrage der Tragwerksplaner mit Hilfe der Fachgruppe Tragwerksplanung der Ingenieurkammer Baden-Württemberg (ING BW) durchgeführt. Die Texte für die Umfragen wurden durch Frau Prof. Stürmer und deren Mitarbeiter verfasst.

10.1.1. Architekten (Planer)

Die Umfrage wurde durch Mitarbeiter des ifbau an der Architektenkammer Baden-Württemberg an über 4.000 Architekten verteilt. Von diesen haben nur 1,6 % (= 46 Architekten) auf die Umfrage geantwortet. Bei einigen Fragen waren auch Mehrfachantworten möglich.

36 Architekten haben schon einmal etwas durch

- Zeitschriften (35 %)
- „Mundpropaganda“ (24 %)
- Vorträge (13 %)
- Ausschreibungen (7 %)
- Sonstige (20 %), wie z.B. „Abbruch eines Wohn- und Geschäftshauses“, „Landschaftsarchitektur“, „Baunetz Wissen“, ein „Sanierungsvorhaben in Sachsen“ und das „NBBW“ (Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg)

von RC-Beton gehört.

Auf die Frage, ob bereits mit RC-Beton gearbeitet wurde, haben 2 Architekten (4 %) mit „Ja“ geantwortet. 96 % der Befragten gaben an, dass sie sich vorstellen könnten, mit RC Beton zu planen und zu bauen. Dafür sprechen ökologische Gründe, wie

- die Ressourcenschonung (98 %)
- die Vermeidung von Deponieflächen (87 %)
- die hochwertige Wiederverwendung von Werkstoffen (74 %)
- die Verringerung von Treibhausgasen (65 %).

80 % der Befragten würden RC-Beton bei gleichem Preis wie für konventionellem Beton verwenden. Bei niedrigerem Preis würden 67 % diesen bevorzugen. 17 % wären auch bereit, einen höheren Preis für RC-Beton zu bezahlen.

Gegen eine Verwendung von RC-Beton sprechen folgende Gründe:

- keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten (63 %)
- Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung (57 %)
- fehlende Informationen über Einsatzmöglichkeiten (46 %)

- zu wenig verfügbare Materialkennwerte (41 %)
- die regional fehlende Verfügbarkeit (35 %)

Da es 87 % der Befragten, d.h. 40 Architekten interessieren würde, im Rahmen einer Fortbildung, mehr über RC-Beton zu erfahren, wurde von Frau Prof. Stürmer mit Unterstützung von Herrn Knappe und weiteren RC-Beton-erfahrenen Referenten ein Seminar konzipiert, welches am 20.07.2017 beim ifbau (Institut Fortbildung Bau) der Architektenkammer Baden-Württemberg mit mehr als 50 Teilnehmern stattfand. Die Vorlage des Umfragebogens ist im Anhang (Abb. 174 bis Abb. 177) abgebildet.

10.1.2. Tragwerksplaner

Die Umfrage der Tragwerksplaner wurde mithilfe der Fachgruppe Tragwerksplanung der Ingenieurkammer Baden-Württemberg an 727 Mailadressen verteilt, wobei 7,8 % (57 Ingenieure) teilnahmen. Bei einigen Fragen waren auch Mehrfachantworten möglich.

45 Ingenieure haben schon von RC-Beton gehört. Dies vor allem durch:

- Zeitschriften (64 %)
- „Mundpropaganda“ (33 %)
- Vorträge (24 %)
- Ausschreibungen (9 %)
- Sonstiges (36 %), wie z.B. eigene Erfahrungen/ Projekte

Von den 57 Ingenieuren, die geantwortet haben, haben zwölf bereits mit RC-Beton gearbeitet. Davon haben 83 % im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus und 25 % im Industrie- und Gewerbebau damit gearbeitet. Als häufigste Betongüten ihrer Tätigkeitsfelder wurden C25/30 mit 67 % sowie C30/37 mit 58 % genannt. Auch die Betongüten C20/25 (mit 33 %) und der C35/45 (mit 17 %) werden verwendet. Die Erfahrungen in Bezug auf RC-Beton sind bei sieben Ingenieuren durchweg positiv. Bei vier Ingenieuren gab es Komplikationen aufgrund von:

- zu wenigen Anbietern von RC-Beton
- Bedenken beim Bauherren
- zu langen Transportwegen
- mangelhafter Güte
- Bedenken bei den ausführenden Firmen

11 Ingenieure würden RC-Beton wiederverwenden. Auf die Frage, ob Sie sich vorstellen könnten, mit RC Beton zu planen und zu bauen, haben 58 % mit „Ja, aber mit Vorbehalten“ geantwortet. 25 % würden auch ohne Vorbehalte damit planen bzw. bauen. 5 % haben mit „Nein, weil ich nicht weiß worauf ich mich einlasse“ geantwortet. Kein Teilnehmer hat die Frage mit „Nein, weil ich kein Vertrauen in RC-Beton habe“ beantwortet. 72 % der antwortenden Ingenieure sind bereit bei gleichem Preis wie von konventionellem Beton, mit RC-Beton zu planen bzw. zu bauen. 33 % würden nur damit planen bzw. bauen, wenn der RC-Betonpreis niedriger wäre als der von konventionellem Beton. 11 % sind bereit für RC-Beton einen höheren Preis zu zahlen.

Gegen eine Verwendung von RC-Beton sprechen folgende Gründe:

- Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung (58 %)
- keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten (53 %)
- fehlende Informationen über Einsatzmöglichkeiten (53 %)

- zu wenig verfügbare Materialkennwerte (51 %)
- regional fehlende Verfügbarkeit (40 %)
- andere Gründe (21 %), wie z.B. die fehlende Zulassung, Haftungsprobleme, geringe Erfahrung der Baufirmen, keine Langzeiterfahrungen

Für 44 Ingenieure würde die Verwendung von RC-Beton keinen Mehraufwand in der statischen Berechnung verursachen. Als Gründe für einen Mehraufwand werden die nicht in die Software implementierten Materialkennwerte, eine Einarbeitungszeit, unbekannte Einflüsse einer dynamischen Belastung, das nicht erforschte Rissverhalten sowie der fehlende E-Modul genannt.

Die technischen Angaben, die die Ingenieure für statische Berechnungen brauchen würden, sind generell vergleichbar mit konventionellem Beton. Genannt wurden hauptsächlich der E Modul, Werte für das Kriech- und Schwindverhalten, Angaben zum Verformungsverhalten, Belastung des RC-Materials, alle Festigkeitskennwerte (gemeint sind: auch die Biegezug- und Zugfestigkeit, die standardmäßig nicht erfasst werden müssen), Dauerhaftigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Expositionsklassen, Frostbeständigkeit sowie das Verhalten bei Temperatureinflüssen.

Vorteile bei der Verwendung von RC-Beton sehen viele Ingenieure im Bereich des Umweltschutzes, wie z.B. der Ressourcenschonung, der Abfallvermeidung, der CO₂ Reduktion sowie ökonomische Gründe, wie die Einsparung von Transportkosten und Energie. Als nachteilig wird die geringe Verfügbarkeit, die eventuelle Schadstoffbelastung, die höhere Güteüberwachung, die fehlenden Erfahrungswerte, nicht bekannte Materialkennwerte sowie die ihnen nicht bekannten Regelungen oder Normungen genannt.

15 Ingenieure hatten bisher mit Bauherren zu tun, die speziell RC-Beton nachgefragt haben. Von den 57 Teilnehmern würden sich 48 für eine Fortbildung der Ingenieurkammer interessieren, in der sie mehr über RC-Beton erfahren könnten. Zum 8. Stuttgarter Tragwerksplanerntag am 30.11.2017 wird Frau Prof. Stürmer zum RC-Beton referieren.

Die Vorlage des Fragebogens ist im Anhang (Abb. 178 bis Abb. 182) dargestellt.

10.1.3. Betonfertigteilhersteller

Diese Umfrage erfolgte im Rahmen einer Konzeptstudie, die durch das „Baden-Württemberg Programm Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung“ (BWPLUS) gefördert wurde. Die Umfrage der Betonfertigteilhersteller wurde mithilfe von Herrn Dr. Ulrich Lotz, Geschäftsführer vom Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e.V., an 50 Mailadressen verteilt. Von diesen haben 24 % (12 Teilnehmer) auf die Umfrage geantwortet. Bei einigen Fragen waren auch Mehrfachantworten zugelassen.

Auf die Frage, ob die Teilnehmer schon einmal von RC-Beton gehört haben, haben alle zwölf Teilnehmer mit ja geantwortet. Sie haben durch folgende Medien davon erfahren:

- Zeitschriften (58 %)
- Vorträge (42 %)
- „Mundpropaganda“ (33 %)
- Ausschreibungen (8 %)
- Sonstiges (50 %), wie z.B. eigene Erfahrungen

Als ökologische Gründe, um mit RC-Beton Betonwaren bzw. -fertigteile herzustellen, wurden folgende Gründe genannt:

- die hochwertige Wiederverwendung von Baustoffen (83 %)
- die Ressourcenschonung (75 %)
- die Vermeidung von Deponieflächen (67 %)

- die Verringerung von Treibhausgasen (50 %)
- andere Gründe (33 %), wie z.B. „politischer Druck“ oder „Auflagen“

Aus monetärer Sicht würden sechs Teilnehmer mit RC-Beton Betonwaren bzw. -fertigteile herstellen, wenn der Preis von konventionellem Beton gleich ist. Fünf Teilnehmer würden mit RC-Beton produzieren, wenn der Preis dafür niedriger wäre als für konventionellen Beton.

Gründe gegen eine Verwendung von RC-Beton sind:

- Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung (75 %)
- keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten (75 %)
- keine regionale Verfügbarkeit (33 %)
- zu wenig verfügbare Materialkennwerte (33 %)
- fehlenden Informationen über Einsatzmöglichkeiten (25 %)
- andere Gründe (33 %), wie z.B. Erhöhung der Überwachung, Angabe der exakten Beschaffenheit der Gesteinskörnung

Vorteile in der Verwendung von RC-Beton sehen die Teilnehmer vor allem in der Ressourcenschonung, der Umweltschonung, der Einsparung von Kosten sowie dem positiven Image für das Unternehmen. Als nachteilig werden hingegen die eventuell schlechte Materialverfügbarkeit, längere Transportwege, eventuell vorhandene Altlasten im Material, die Qualität, die Akzeptanz bei den Planern und Auftraggebern, aufwendigere Kontrollen und aufwendigere Mischungsvorbereitungen gesehen.

Die Frage „Hatten Sie bereits Anfragen zu Betonwaren bzw. -fertigteilen mit RC-Beton?“ haben drei Teilnehmer mit ja beantwortet.

Die Vorlage des Fragebogens ist im Anhang (Abb. 183 bis Abb. 185) dargestellt.

10.2. Länderbezogene Regelungen zur Reduzierung mineralischer Bauabfälle an zwei Beispielen

Baden-Württemberg

2016 wurde die Broschüre „Abfallvermeidung in der Baubranche – Informationen für Bauherren, Architekten und alle am Bau Interessierten“ vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg veröffentlicht [74].

Darin wird beschrieben, dass Entkernung und Abbruch meist gemeinsam und als pauschale Leistung ausgeschrieben werden. Entsprechend des RAL-Gütezeichens ist der Rückbau durch einen qualifizierten Betrieb durchzuführen, der sich einer Eigen- und Fremdüberwachung unterzieht.

Bei der Ausschreibung sollten zur hochwertigen stofflichen Verwertung konkrete Vorgaben zur Selektierung der Baustellenabfälle angegeben werden. Dies gilt insbesondere für Gipsbaustoffe, Kunststoffe, Holz und vor allem für eine grundsätzlich getrennte Erfassung von mineralischen und organischen Baumassen.

Vor der Auftragsvergabe muss die gesamte Entsorgungskette (Transportunternehmen, Zwischenlager, Umschlagstellen, endgültige Entsorgungsstellen) offen gelegt werden. Es sollen möglichst zertifizierte Entsorgungsfachbetriebe ausgewählt werden. Der Bauschutt sollte nur Recyclern übergeben werden, welche im Qualitätssicherungssystem Recyclingbaustoffe Baden-Württemberg e.V. (QRB) organisiert sind und dies durch Vorlage der Lieferscheine nachgewiesen werden.

Im Dezember 2015 wurde eine „Gemeinsame Erklärung zur Abfallvermeidung im Bausektor“ vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg veröffentlicht [75].

In der Broschüre wird darauf hingewiesen, dass über das bisher Erreichte weitere Maßnahmen notwendig sind, um Bauabfälle im vorne herein zu vermeiden und die Recyclingquote zu halten bzw. zu erhöhen. Es wird beschrieben, dass u.a. die Akzeptanzsteigerung von Sekundärbaustoffen, produktneutrale Ausschreibungen, Förderung neuer innovativer Recycling- und Verwertungspfade und sachgerechte Umweltbewertung von Baustoffen bei allen am Bau Beteiligten mehr berücksichtigt werden müssen. Dazu wurden u.a. folgende Maßnahmen beschlossen:

- Förderung der Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft im Bausektor
- Information aller am Bau beteiligten zum Stand der Technik und Wissenschaft in Bezug auf Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft im Bausektor
- Förderung von Forschungsvorhaben in Bezug auf Abfallvermeidung und Kreislaufwirtschaft im Bausektor
- Berücksichtigung von RC-Baustoffen bei Vorhaben der Ministerien für Wirtschaft und Finanzen sowie Verkehr und Infrastruktur
- Förderung des Einsatzes von RC-Baustoffen durch die Architekten- und Ingenieurkammer
- Steigerung der Herstellung gütegesicherter RC-Baustoffe durch den Industrieverband Steine-erden e.V. und die Bauwirtschaft Baden Württemberg e.V.
- Information und Weiterbildung von Planern, Herstellern und Bauausführenden zum Thema Abfallvermeidung, recyclinggerechtes Konstruieren und bewusster Umgang mit Bauprodukten durch die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
- Unterstützung aller Unterzeichner für eine bundeseinheitliche Regelung von Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen.

Zur Unterstützung der Umsetzung dieser Maßnahmen findet seit 2014 jährlich beim Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Stuttgart ein bundesweites Fachsymposium zu neuen Entwicklungen und Erfahrungen zum Einsatz von R-Beton statt – mit Unterstützung durch das ifeu Heidelberg (Team von Herrn Knappe).

In Baden-Württemberg wurden bisher die meisten R-Betone im Hochbau eingesetzt (siehe Abb. 121).

Bayern

Bereits 2005 wurde bezüglich der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen der „Umweltpakt Bayern – Vereinbarung über die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken“ [76] zwischen dem „Bayrischen Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz“ und dem „Bayrischen Industrieverband Steine und Erden e.V.“ vereinbart. Dieser beinhaltet Hinweise zur Verwertung von Bauschutt und Straßenaufbruch technischer Bauwerke im Erd-, Straßen- und Wegebau. Es werden Eigenschaften, Anforderungen und Überwachungsregeln für die Herstellung von RC-Baustoffen in stationären, semimobilen und mobilen Anlagen sowie deren Verwendung beschrieben.

Auf der Internet Seite des Vereins Baustoff-Recycling Bayern (<http://www.baustoffrecycling-bayern.de>) sind die „Anforderungen an die Verwertung von Recycling-Baustoffen in technischen Bauwerken“ (Stand 2005) beschrieben. Dementsprechend sind RC-Körnungen bisher nur für „Erd-, Straßen- und Wegebau und sonstige Verkehrsflächen“ zugelassen. Um Hemmnisse in Bayern gegen RC-Baustoffe abzubauen, beauftragte das Bayrische Staatsministerium für Umwelt- und Verbraucherschutz Frau Prof. Mettke⁸ (BTU Cottbus) mit einem Forschungsprojekt zum Thema „Akzeptanzsteigerung beim Einsatz von RC-Baustoffen“. [77]

Das erste Objekt mit RC-Beton in Bayern entsteht in Würzburg: der Neubau des Umweltzentrum (Grundsteinlegung war im April 2017) wird durch die Fa. Georg Göbel Hochbau errichtet und soll sich gemäß der Pläne des Architekten Franz Balda „in das bestehende Gelände an der Bastion einfügen“. Der Neubau soll im Rahmen der Landesgartenschau 2018 Anfang April eröffnet werden.

⁸ Frau Prof. Mettke erhielt gemeinsam mit Herrn Feess im Jahr 2016 den von der DBU gestifteten Deutschen Umweltpreis

„Dank der finanziellen Förderung durch die Deutschen Bundesstiftung Umwelt wird es ermöglicht, diesen Neubau mit der kompetenten wissenschaftlichen Begleitung durch das Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. und die der Brandenburgischen Technischen Universität zu verwirklichen.“

10.3. Berücksichtigung von R-Beton bei öffentlichen Ausschreibungen und Vergabe

10.3.1. Allgemein

Entsprechend eines Beschlusses der EU-Kommission von 2001 sind **Umweltanforderungen in der Leistungsbeschreibung keine „ungewöhnlichen Anforderungen“** an die Beschaffenheit der Leistung. Öffentliche Auftraggeber dürfen anspruchsvolle Vorstellungen an die Leistung haben und in der Leistungsbeschreibung umsetzen und zwar selbst dann, wenn diese anspruchsvolle Leistung nicht durch alle am Markt agierenden Unternehmen erbracht werden kann. Auftraggeber dürfen bestimmte Grundstoffe und Ausgangsmaterialien bei der Herstellung für die ausgeschriebene Lieferung bzw. Leistung vorgeben, solange die Vorgaben nicht diskriminierend sind. Dementsprechend können Auftraggeber in der Leistungsbeschreibung Umweltvorgaben machen. [78]

In § 7 der EU VOB/A wird das Gebot der Produktneutralität beschrieben. Soweit es nicht durch den Auftragsgegenstand gerechtfertigt ist, darf in technischen Spezifikationen nicht auf

- eine bestimmte Produktion oder Herkunft
- oder ein besonderes Verfahren, das die von einem bestimmten Unternehmen bereitgestellten Produkte charakterisiert,
- oder auf Marken, Patente, Typen
- oder einen bestimmten Ursprung
- oder eine bestimmte Produktion

verwiesen werden, wenn dadurch bestimmte Unternehmen oder bestimmte Produkte begünstigt oder ausgeschlossen werden.

RC-Gesteinskörnung darf nach VOB-Recht ausgeschrieben werden, wenn der Verteilungsschlüssel im Leistungsverzeichnis klar geregelt ist (Bedingung 1). Da man RC-Material genauso wie Kies oder Splitt aus natürlichen Gesteinskörnungen auf dem Markt beziehen kann, gilt die Gleichwertigkeits-Klausel (Bedingung 2).

Im Tiefbau kann der Auftraggeber in der **Leistungsbeschreibung zwingend die Verwendung von RC-Material vorgeben**. Das RC-Material muss von allen Bietern angeboten werden. Sonst erfolgt ein Ausschluss vom Vergabeverfahren. Das RC-Material muss nach Zuschlagserteilung vom AN eingesetzt werden. Dabei liegt kein Verstoß gegen das Gebot der Produktneutralität, weil:

- alle Bauunternehmen / Anbieter RC-Material am Markt erwerben können. Kein Anbieter wird an der Teilnahme am Vergabeverfahren gehindert.
- die Anforderung keine „produktscharfe“ technische Spezifikation ist.
- Denn: Anforderungen des AG dürfen sich auch auf (Umwelt-)Eigenschaften eines Werkstoffs beziehen; dazu gehören auch Produktionsprozesse und -methoden in jeder Phase des Lebenszyklus der Bauleistung.

Entsprechend § 127 des Gesetzes gegen Wettbewerbsbeschränkungen (GWB) erfolgt der Zuschlag an das wirtschaftlichste Angebot, d.h. bei dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis. Neben dem Preis können auch qualitative, **umweltbezogene** oder soziale **Aspekte** berücksichtigt werden. [78]

Der „Gemeinsame Ausschuss Elektronik im Bauwesen“ (GAEB) ist dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unterstellt. Die Arbeitsergebnisse des GAEB werden vom Deutschen Institut für Normung veröffentlicht und sind die häufigste Form für Ausschreibungen, Vergabe und Abrechnung von Bauleistungen (AVA). Die GAEB erarbeitet standardisierte Texte zur Beschreibung von Bauleistungen für den Neubau, die Instandhaltung und Sanierung (STLB-Bau = Standardleistungsbuch Bau).

Mittels der GAEB Software und deren Datenbank können Ausschreibungen und Angebote für Bauvorhaben erstellt werden. Innerhalb dieser Software ist eine zusätzliche Berücksichtigung von R-Beton möglich. Dies muss vom Nutzer jedoch über einen zusätzlichen Button hinzugefügt werden.

In der Version STLB-Bau 2015-10 kann in den Leistungsbereichen 013 „Betonarbeiten“, 018 „Abdichtungsarbeiten“ und 080 „Straßen, Wege, Plätze“ bei der Texterstellung der Zusatz „als RC-Baustoff zugelassen“ ergänzt werden.

In der Baupraxis werden die Positionen in Ausschreibungen häufig individuell erstellt. Im Anhang sind Beispiele von Ausschreibungen mit R-Beton im Hochbau eingefügt (siehe Anhang E Abb. 186 bis 190).

Weiterhin ist der Leitfaden „Ressourceneffiziente Beschaffung“ der Allianz für nachhaltige Beschaffung (Expertengruppe Ressourceneffizienz) von 2014 zu erwähnen. Ziel des Leitfadens ist es, „den Mitarbeiter- und Mitarbeiterinnen der Beschaffungsstellen im Bund, bei den Ländern und den Kommunen notwendige Informationen – auch exemplarisch – an die Hand zu geben, um künftig Gedanken der Ressourceneffizienz in die Handlungsweisen und Beschaffungsvorgängen mit einfließen lassen zu können.“ Für den Einsatz von Beton im Hochbau werden die verbindlichen Mindestanforderungen angegeben:

1. Ortbeton ist als Normalbeton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2 und – soweit zulässig – unter der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620: 2013 in den maximal zulässigen Anteilen nach DAfStb –Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620: 2008-07, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1“ herzustellen und einzusetzen. Die sonstigen Regelungen gemäß genannter DAfStb-Richtlinie sind ebenfalls anzuwenden.

10.3.2. In den Bundesländern Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz

Es wurden Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz ausgewählt, weil es dort Recycler gibt, die RC-Körnungen für den R-Betoneinsatz anbieten und TBW vorhanden sind, welche R-Beton im Portfolio anbieten.

Baden-Württemberg

Ausschreibung von Recycling-Baustoffen nach VOB/A [79]

Der Landesbetrieb Vermögen und Bau Baden-Württemberg hat im Benehmen mit dem Ministerium für Finanzen und Wirtschaft darauf hingewiesen, dass nach VOB/A folgende Lösung vergaberechtlich möglich ist:

- Der Auftraggeber schreibt die Leistungen allein als Grundposition in R-Beton aus. Im STLB-Bau existieren seit der Version 10/2015 Formulierungen für die Beschreibungen. Dabei besteht ein Risiko aufgrund spekulativer Preise wegen aktuell noch ausgeprägter Monopolstellung.
- Der Auftraggeber schreibt die Leistung offen in der Grundposition mit der Abfrage der Ausführungsvariante „Normalbeton/R-Beton“ aus und weist die Ausführungsvariante unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit als zusätzliches Zuschlagskriterium mit adäquater Gewichtung neben dem Preis aus.
- Für den Auftraggeber besteht die Möglichkeit nur den Preis als Zuschlagskriterium festzulegen. Den Bietern wird in den Vergabeunterlagen der Hinweis gegeben, dass ein Nebenangebot zu dieser Ausführungsart gewünscht ist. **Der Auftraggeber kann in der Ausschreibung einen fiktiven, preislichen Wertungsbonus für R-Beton ausweisen, um damit den Einsatz von R-Beton zu fördern.**

Rheinland Pfalz

Das Ministerium der Finanzen und das Ministerium des Inneren, für Sport und Infrastruktur verpflichtet sich, für den nachgeordneten Bereich bereits in der Planungsphase von Baumaßnahmen und bei der Ausschreibung den Einsatz von gütegesicherten RC-Baustoffen zu berücksichtigen.

Die kommunalen Spitzenverbände sowie die Architekten- und Ingenieurkammern verpflichten sich, ihre Mitglieder darüber zu informieren, dass diese bei Baumaßnahmen den Einsatz von geeigneten, gütegesicherten RC-Baustoffen mindestens produktneutral ausschreiben sollen.

Die Verbände der bauausführenden Unternehmen verpflichten sich, auf ihre Mitglieder mit dem Ziel einzuwirken, dass diese bei der Angebotsabgabe gütegesicherte RC-Baustoffe anbieten. [80]

10.4. Berücksichtigung von R-Beton bei Gebäudezertifikaten

Bereits seit 1990 (BREEAM) werden für ausgewählte Gebäude Nachhaltigkeitszertifikate vergeben. Weltweit existieren mittlerweile eine Vielzahl von verschiedenen Gebäudezertifikaten mit unterschiedlichen Anforderungen in ihrem Standardkatalog und unterschiedlichen zu erreichenden Abstufungen, z.B. Gold, Silber, Bronze (**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.**).



Abb. 160: Übersicht verschiedener Gebäudezertifizierungen weltweit [81]

Am Immobilienmarkt ist es heute kaum mehr möglich, ein nicht zertifiziertes Gebäude an ein global agierendes Unternehmen zu vermieten. Durch die Zertifizierung wird es den Bauherren/Besitzern erleichtert, einen schnellen Überblick über Betriebskosten wie Wärme- und Energiebedarf oder Wasserverbrauch zu erhalten.

Ein Vergleich verschiedener Zertifizierungssysteme untereinander ist schwierig, da die zertifizierenden Organisationen in der Regel unterschiedliche Schwerpunkte in ihrem Standardkatalog festsetzen. Auch die Punktesysteme und die Anpassung der Systeme auf lokale Rahmenbedingungen sind nicht miteinander vergleichbar.

Die positiven Effekte einer Gebäudezertifizierung lassen sich in der Steigerung der Gebäudequalität, einer Erhöhung des Immobilienwerts und in der Steigerung der Attraktivität des Projektes für Investoren durch eine besonders hohe Wertstabilität abbilden. Inwieweit die Gebäudezertifikate wirklich einen Mehrwert für das Projekt erzeugen und ob sich die von Zertifikat zu Zertifikat sehr unterschiedlichen Investitionskosten einer Gebäudezertifizierung für den Bauherrn tatsächlich lohnen, ist umstritten. Es existieren Studien zu den größten Gebäudezertifizierungen die zu sehr unterschiedlichen Schlussfolgerungen hinsichtlich der Rentabilität kommen.

Für die am häufigsten in Deutschland und Mitteleuropa vergebenen Zertifikate wurde geprüft, inwiefern R-Beton in dem vorgestellten Zertifikat erwähnt wird und wie viele Punkte / Prozenz dadurch erzielt werden können. Im DGNB-System (Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen) wird R-Beton oder rezyklierte Gesteinskörnung nicht erwähnt und somit dessen Einsatz auch nicht honoriert. Bei LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) und BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) wird R-Beton nicht explizit aufgeführt, jedoch die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung mit Punkten oder Prozentsätzen belohnt. Ziel ist es hier ausdrücklich, Baustoffkreisläufe zu schließen. Die Verwendung kann sowohl als Verfüllmaterial erfolgen oder als Gesteinskörnung in Beton. Vorbildlich für die Förderung von R-Beton ist dagegen die Anforderung der Schweizer Minergie Eco Zertifikate, die einen Mindesteinsatz von 50 % Recyclingbeton in den Bauteilen fordern, die nach Regelwerken mit R-Beton herstellbar sind. Das ist ein explizites Alleinstellungsmerkmal des nur lokal (Schweiz und Grenzgebiete) eingesetzten Zertifikates und deshalb besonders hervorzuheben.

Eine zukünftige direkte Honorierung des Einsatzes von R-Beton als Alternative zu konventionellem Beton durch geschulte Auditoren im DGNB-System könnte maßgeblich dazu beitragen, die Nachfrage für Hochbauprojekte zu fördern.

11. Unterstützende Rahmenbedingungen für das Bauen mit R-Beton

11.1. Umweltbundesamt

Das Bundeskabinett hat am 03.05.2017 den Entwurf der Mantelverordnung für Ersatzbaustoffe und Bodenschutz beschlossen. Das von Bundesumweltministerin Barbara Hendricks vorgeschlagene Verordnungspaket schafft erstmals bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Grundlagen für das Recycling mineralischer Abfälle und deren Einsatz in technischen Bauwerken. Außerdem werden die Umweltstandards für die Verfüllung von Abgrabungen und Tagebauen bundesweit geregelt.

Kernstück der Mantelverordnung ist zum einen die neu geschaffene Ersatzbaustoffverordnung. Sie regelt die Herstellung von mineralischen Ersatzbaustoffen aus Bau- und Abbruchabfällen, Schlacken aus der Metallerzeugung und Aschen aus thermischen Prozessen über ein System der Güteüberwachung. Der Einbau dieser Materialien in technische Bauwerke vor allem im Tiefbau richtet sich nach spezifischen Anforderungen, die die Belange des Boden- und Grundwasserschutzes wahren.

Zum anderen wird mit der Mantelverordnung die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung erstmals umfassend novelliert. Sie wird künftig auch regeln, welche Materialien zur Verfüllung von Abgrabungen und Tagebauen genutzt werden dürfen und für welche Materialien andere Verwertungs- und Entsorgungswege gefunden werden müssen. Außerdem gibt es weitere Verbesserungen im vorsorgenden Bodenschutz, zum Beispiel durch die Möglichkeit der Anordnung einer bodenkundlichen Baubegleitung bei größeren Vorhaben.

Beide Themenfelder sind von hoher Praxisrelevanz vor allem für den Verkehrswegebau und die Baustoff- und Entsorgungswirtschaft. Hier gab es bislang nur sehr allgemeine Vorgaben auf gesetzlicher Ebene, die lediglich durch nicht rechtsverbindliche und inzwischen teilweise veraltete technische Regeln oder Erlasse in den Ländern konkretisiert wurden. **Durch die Einführung verlässlicher bundeseinheitlicher Regelungen sollen auch die Akzeptanz mineralischer Ersatzbaustoffe verbessert und Potenziale zur Steigerung des Recyclings gehoben sowie Wettbewerbsverzerrungen vermieden werden.** Die Mantelverordnung bedarf noch der Zustimmung des Bundestages und des Bundesrates. [82]

Insbesondere mit der Ersatzbaustoffverordnung sollen u. a. die Ziele der Kreislaufwirtschaft gefördert und die Akzeptanz für Ersatzbaustoffe verbessert werden. Dadurch können auch Potentiale zur weiteren Steigerung des Recyclings von Bau- und Abbruchabfällen für den Einsatz in technischen Bauwerken erschlossen werden, d.h. bisher noch in der Verfüllung von Abgrabungen und Tagebauen eingesetzte Bau- und Abbruchabfälle höherwertig könnten verwertet werden.

Durch eine Akzeptanzsteigerung von Ersatzbaustoffen im Tief- und Verkehrsbau ist zu hoffen, dass sich dies auch positiv auf die Einstellung zu RC-Baustoffen und R-Beton im Hochbau auswirkt.

11.2. Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg

In dem Kompendium „Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg (NBBW)“ [83] von 2014 des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft werden Nachhaltigkeitskriterien im staatlich geförderten kommunalen Hochbau in Baden Württemberg beschrieben.

Die Bauwirtschaft muss die weltweiten Ziele des Klimaschutzes und der Ressourcenschonung berücksichtigen. Dabei stehen die Klimaerwärmung und CO₂-Emissionen, Energie- und Trinkwasserversorgung sowie gesunde Lebens- und Arbeitsbedingungen im Mittelpunkt. Dies wird u. a. durch die weltweite Zertifizierungssysteme für nachhaltiges Bauen und Betreiben von Gebäuden definiert (siehe dazu Punkt 10.4).

Im Kompendium wird zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton (RC-Beton) folgendes erwähnt: „Für die Erstellung der Tragkonstruktion eines Gebäudes stehen verschiedene Materialien wie Stahl, Holz und Stahlbeton zur Verfügung. Stahl wird heute fast vollständig recycelt. Holz wird wiederverwendet oder thermisch verwertet. Der Betonanteil im Stahlbeton wird heute zu fast 80 % recycelt. Dabei handelt es sich überwiegend um ein Downcycling, meistens für die Verwendung im Straßenbau. Rezyklierte Gesteinskörnungen können aber auch als Bestandteil von Beton wiederverwendet werden, der dann als ressourcenschonender Beton (RC-Beton) bezeichnet wird. RC-Beton kann ohne Einschränkung für bestimmte Bauteile im Hochbau eingesetzt werden. Die Zweitnutzung vermindert den Bedarf an neuen Ressourcen mineralischer Rohstoffe und reduziert die Flächenverbräuche für die Deponierung von Bauschutt und die Entnahme von mineralischen Rohstoffen aus oberflächennahen Lagern.“

Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang die „Gemeinsame Erklärung zur Abfallvermeidung im Bausektor“. Zitiert werden die 4 Punkte die direkt die Förderung von RC-Baustoffen betreffen:

- Das Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg und das Ministerium für Wirtschaft und Finanzen Baden-Württemberg sagen zu, für ihre Vorhaben den Einsatz von gütegesicherten RC-Baustoffen zu bedenken.
- Die Architektenkammer Baden-Württemberg und die Ingenieurkammer Baden-Württemberg halten ihre Mitglieder dazu an, den Einsatz von RC-Baustoffen zu fördern.
- Die Architektenkammer Baden-Württemberg und die Ingenieurkammer Baden-Württemberg halten ihre Mitglieder dazu an, die Planung, Ausschreibung und Bauausführung auf die geplante Nutzungsdauer abzustimmen.
- Der Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. und die Bauwirtschaft Baden-Württemberg e.V. streben an, dass ihre Mitglieder vermehrt gütegesicherte RC-Baustoffe herstellen bzw. informieren ihre Mitglieder über Einsatzmöglichkeiten gütegesicherter RC-Baustoffe.

12. Zusammenfassung

Die Zusammenfassung wurde entsprechend der Teilaufgaben des Projekts gegliedert. Das dazugehörige Sankey-Diagramm ist im Anhang (Abb. 191) zu finden.

1. Untersuchung und Bewertung realer MW-Abbruchkörnung u. a. Berücksichtigung des SO_4^{2-} Gehaltes

Der Typ 2 der rezyklierten Gesteinskörnung unterscheidet sich in den stofflichen und technischen Eigenschaften stärker von den natürlichen Gesteinskörnungen als der Typ 1.

Die Typ 2-Körnungen von Feess und S&K erfüllen alle Anforderungen der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13], der DIN EN 12620 [16] und der DIN 4226-100 [21] und der Zulassungen (Feess: Z-3.43-2079, S&K: Z-3.43-2119).

Die Anforderungen an die granulometrische, stoffliche Zusammensetzung, Wasseraufnahme, Rohdichte und Sulfatgehalte von Typ 2 Gesteinskörnungen entsprechend der DAfStb-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] und DIN EN 12620 [16] wurden von allen untersuchten Proben eingehalten. Im Projekt wurden darüber hinausgehende Werte erfasst, die für die Dauerhaftigkeit der damit hergestellten R-Betone wichtig sind und keine Abstriche in den Eigenschaften der R-Betone gegenüber den herkömmlichen Betonen prognostizieren lassen.

Die untersuchten Fraktionen der Firmen Feess (2/16), GWV (2/16) und Scherer & Kohl (2/8, 8/16) weisen vergleichbare Korngrößenverteilungen und mittlere Korndurchmesser auf. Es liegen abgestufte Korngrößenverteilungen vor, die für die Verwendung der RC-Gesteinskörnungen in Betonrezepturen geeignet sind.

Der geringe Anteil an Störstoffen ist auf eine hochwertige Aufbereitung zurückzuführen. Der Mauerwerksanteil in den untersuchten Körnungen liegt mit 11 bis 16 % deutlich unterhalb des Grenzwertes von 30 %. Damit besteht weiteres Potential, weitere Beton/Kies-Anteile der RC-Körnung gegen Mauerwerkbruch auszutauschen.

Obwohl einzelne Bestandteile des Mauerwerkbruch in ihrer Rohdichte $< 2 \text{ g/cm}^3$ sind, erfüllen die Typ 2-Gemische die Anforderung der Regelwerke von $\geq 2,0 \text{ g/cm}^3$ in jedem Fall. Die mit der Rohdichte korrelierende Wasseraufnahme wurde von allen untersuchten Proben mit Werten $< 10 \%$ gegenüber dem Grenzwert von 15 % deutlich unterschritten.

Alle untersuchten Proben liegen unter den Grenzwerten für säure- und wasserlösliche Sulfatgehalte. Selbst die feinen RC-Brechsande der Fraktion 0/2 - mit aufbereitungstechnisch bedingten, höheren Sulfatgehalten als in den gröberen Fraktionen - erfüllen die Vorgaben klar, d.h. mit schädigenden Treibmineral-Neubildungen z. B. durch Ettringit ist nicht zu rechnen.

Entsprechend der Untersuchungsergebnisse besteht Potential, den Mauerwerksanteil zu erhöhen und trotzdem alle Grenzwerte einzuhalten. Die höhere Porosität und höhere Wasseraufnahme der Typ2-Körnung wird in der Betonrezeptur und beim Mischen durch Anfeuchten der RC-Körnungen und Fließmitteldosierung kompensiert.

Bei den 2jährigen Untersuchungen zeigte sich eine geringe Schwankungsbreite in den stofflichen und granulometrischen Eigenschaften der Typ2-Körnungen, d.h. es liegt eine gleichmäßige Qualität auch bei Lieferchargen über längere Zeiträume vor. Dadurch ist es den Betonherstellern, auch bei Verwendung von RC-Gesteinskörnungen des Typs 2 nach Rezepturanpassungen möglich, gleichmäßige R-Betone herstellen zu können. Bei gleichbleibendem Anbieter der RC-Körnung reduziert sich aufgrund der geringen Schwankungsbreite der Aufwand für die Rezepturanpassung.

2. Auswahl geeigneter RC-Betonrezepturen sowie ggf. Anpassung

In einzelnen Regionen Baden-Württembergs und dem angrenzenden Rheinland-Pfalz werden von Transportbetonwerken R-Betone in verschiedenen Betonfestigkeitsklassen gemäß geltender Regelwerke hergestellt (siehe Kapitel 0). Dabei kommt überwiegend RC-Gesteinskörnung des Typs 1 und zum Teil des Typs 2 zur Anwendung. Von der Fa. Holcim wurden Betonrezepturen für Typ1 und Typ2-Betone entwickelt und seit 2013 R-Betone bis zur Festigkeitsklasse C25/30 angeboten. Seit 2016 sind

auch R-Betone bis Festigkeitsklasse C30/37 im Programm. Innerhalb des Projekts wurden bewährte Rezepturen der Fa. Holcim verwendet. Im Projekt wurden Betone der Festigkeitsklasse C20/25, C25/30 und C30/37 einbezogen, bei welchen der Anteil von RC-Gesteinskörnung des Typs 2 25 bzw. 35 M.% bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung betrug. Diese Rezepturen haben sich bezüglich aller Kennwerte für die Anwendung in den unterschiedlichen Expositionsklassen des Hochbaus (siehe Abb. 7) als geeignet erwiesen und werden in der Praxis eingesetzt.

Die in der Betonmischanlage auf dem Gelände der Fa. Feess hergestellten, unbewehrten Betonsteine (sogenannte Ökostones) enthalten bis zu 90 M.% der eigenen rezyklierten Typ 2-Körnung. Obwohl der RC-Körnungsanteil viel größer ist als nach den derzeit gültigen Regelwerken in Deutschland zugelassen ist, belegen die Ergebnisse an mehrjährig genutzten, freibewitterten Ökostones, dass diese Betonsteine für die vorgesehenen Einsatzgebiete und Expositionen eine ausreichende Dauerhaftigkeit aufweisen.

3. „Regionalanalyse“: Herstellung von MW-Baustoffen Raum Stuttgart (Hergestellte Mengen, Sortimente, charakteristische Merkmale)

Kapitel 3.4 enthält eine Zusammenstellung von Transportbetonwerken, die in Baden-Württemberg R-Betone in verschiedenen Betongütern zum Teil auch mit Typ 2 Körnungen auf Anfrage liefern oder dauerhaft im Produktportfolio haben.

Auf unterstützende Rahmenbedingungen zum nachhaltigen Bauen mit RC-Baustoffen im Hochbau und bei der Ausschreibung/Vergabe von R-Beton wird in den Kapiteln 10 und 10 eingegangen.

4. R-Betonherstellung, Prüfung aller relevanten Kenndaten, Gefügeuntersuchungen

Im Vergleich der Rezepturen mit RC-Gesteinskörnung des Typs 2 mit den Referenzbetonen lässt sich feststellen, dass sich für Betone in der gleichen Betonfestigkeitsklasse bei ähnlichen Bindemittelanteilen und w/z-Werten vergleichbare Druck- und Biegezugfestigkeiten und leicht reduzierte E-Moduln erzielen lassen. Alle betontechnologischen Anforderungen gemäß Regelwerken werden erfüllt.

Es wurde bestätigt, dass mit Typ 2 Gesteinskörnungen R-Betone unterschiedlicher Druckfestigkeitsklassen durch Anpassungen der Rezeptur herstellbar sind.

Trotz der höheren Wasseraufnahme der Gesteinskörnung und der eher splittigen Kornform der Rezyklate ist bei R-Betonen kein erhöhter Bindemittelanteil notwendig, um vergleichbare Festigkeiten zu erzielen. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass die geringere Rohdichte der Typ 2 Körnungen im Vergleich zu natürlichen Körnungen nicht zu Druckfestigkeitsverlusten führt. Um dies gesichert erfassen zu können, wurde – wie bereits erwähnt - in den R-Betonen und Referenzbetonen mit ausschließlich natürlichen Körnungen vergleichbare w/z-Werte und Bindemittelgehalte verwendet.

Der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand wurde als Maß zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit herangezogen, muss jedoch im Hochbau für die üblichen Expositionsklassen nicht nachgewiesen werden. Die Grenzwerte für den Frostwiderstand werden von den R-Betonen im Gegensatz zu den Referenzbetonen gleicher Festigkeitsklasse unterschritten. Das heißt, es ist eine gute Frostwiderstandsfähigkeit für die Einsatzgebiete im Hochbau gegeben.

Der Grenzwert für den Frost-Tausalz-Widerstand wird von keinem der untersuchten R-Betone und Referenzbetone eingehalten. Dabei ist bemerkenswert, dass einer der R-Betone über die gesamte Prüfdauer die vergleichsweise geringste Abwitterung aufwies. Zur Bewertung dieser Ergebnisse ist anzumerken, dass die Grenzwerte dieser Frost-Tausalz-Prüfung für erhöhte Anforderungen an Wasserbauwerke gelten (d.h. nicht für den Hochbau) und dass in keinem der untersuchten Betone Luftporenbildner eingesetzt wurde, wie das für die Expositionsklassen XF2 und XF4 notwendig und üblich ist.

Gemäß der lichtmikroskopischen und REM- Analysen ist ein sehr guter Verbund zwischen dem Zementstein und Ziegelgesteinskörnern (als Hauptanteil im Mauerwerkbruch) gegeben. Risse entlang der Phasengrenze Zementstein-Ziegelsplitt wurden nicht detektiert (Abb. 161). Die splittige Kornform der Ziegelsplitte und deren offene Poren führen zu einem besseren Verbund im Vergleich zu weniger und anders porösen, natürlichen Gesteinskörnungen, da der Zementleim in die vorgehästete poröse

Struktur der Rezyklate eindringt. Insgesamt wurde eine gute und gleichmäßige Umhüllung der Gesteinskörnungen ohne sichtbare Haufwerksporigkeit oder Fehlstellen dokumentiert. Vereinzelt Poren an der Phasengrenze Zementstein – Ziegelsplitt sind nicht häufiger vorhanden als im Verbundbereich Zementstein – natürliche Gesteinskörnungen (Quarz, Kalkstein). Durch die mikroskopischen Analysen wurden signifikant mehr Fehlstellen und vereinzelt Risse an der Phasengrenze Zementstein – natürliche Gesteinskörnung (Quarz/Kalkstein) festgestellt (Abb. 162).

Durch die Untersuchungen der R-Betone, den Vergleich mit Grenzwerten gemäß Regelwerken und den Vergleich mit den Referenzbetonen konnte nachgewiesen werden, dass die verwendeten R-Betonrezepturen mit RC-Körnungen des Typs 2 vollumfänglich für den Praxiseinsatz gemäß der deklarierten Expositionsklassen geeignet sind.

Mit beiden Typen RC-Körnungen lassen sich nach Rezepturanpassung Betone mit vergleichbaren Eigenschaften wie konventioneller Beton herstellen. Ein gewisser Aufwand für die Rezepturanpassung an die rezyklierten Körnungen ist gegeben, stellt aber für erfahrene Betontechnologen keine Schwierigkeit dar.

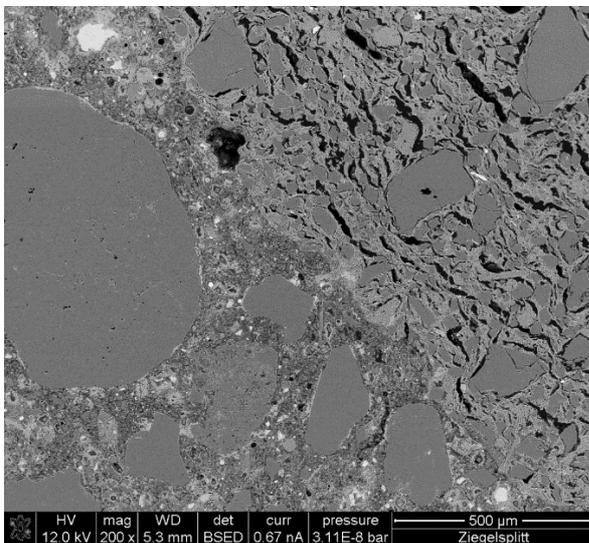


Abb. 161: REM Aufnahme DR 28, rechts Ziegelsplitt, links Zementsteinmatrix, Vergrößerung 200-fach, guter Verbund, kaum Poren an der Grenzfläche

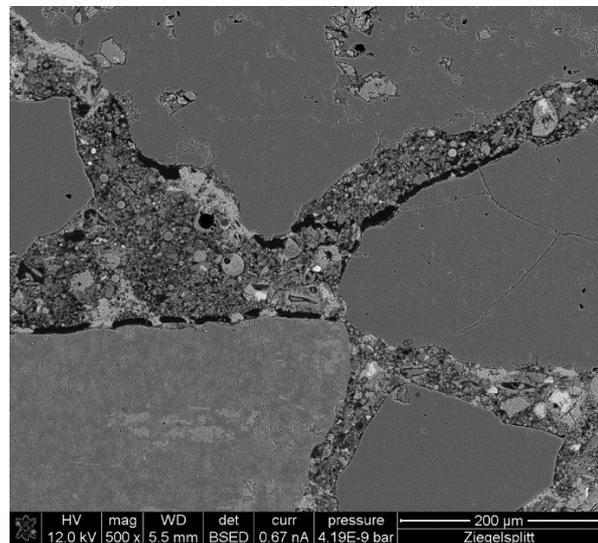


Abb. 162: REM Aufnahme DR 28, links/unten Na-Feldspat, restliche GK Quarz, dazwischen Zementstein, Vergrößerung 500-fach, deutliche Fehlstellen/Risse an den Grenzflächen, zum Teil Brückenbildungen aus Portlandit

5. Untersuchung/ Bewertung realer Mauerwerkbruch-Körnungen: Potential aufgrund der Pozzolanität, Einflüsse der innere Nachbehandlung und des SO_4^{2-} -Gehalts

Die Anforderungen an RC-Körnungen des Typs 2 zur Korngrößenverteilung, Zusammensetzung, Wasseraufnahme und Rohdichte wurden von allen untersuchten RC-Körnungen eingehalten. Die an den im Projekt untersuchten Typ 2-Körnungen ermittelten Werte zeigen Potential, den Mauerwerksanteil in den Körnungen zu erhöhen und die Grenzwerte weiterhin einzuhalten.

Aufgrund der erhöhten Porosität und spezifischen Oberfläche der RC-Körnungen müssen diese vorgegast werden. Diese zusätzliche Wassermenge kann ggf. als inneres Nachbehandlungsmittel wirken, welche vor allem bei niedrigen w/z-Werten zur Nachhydratation führt. Die Möglichkeit der Nachhydratation kann insbesondere für den Betonbruch in den RC-Körnungen von Bedeutung sein, da dort in den REM Analysen anteilig unhydratisierte Zementklinkerphasen nachgewiesen wurden.

Die Verwendung von Flugasche in den R-Betonen führt zu einer Optimierung der Verarbeitbarkeit und einer zusätzlichen Gefügeverdichtung im erhärteten Beton. Auch für die, gegenüber der Hydratation der PZ-Klinkerphasen langsamere puzzolanische Reaktion der Flugasche, sind eine gute Nachbehandlung und „Versorgung“ mit Wasser u. a. aus den feuchten RC-Körnungen vorteilhaft. Wie die

erwähnte zusätzliche Wassermenge aus der Befeuchtung des Mauerwerkbruchs diese Nachbehandlung im Detail beeinflusst, müsste weiter untersucht werden.

Die seit der Antike bis heute in Mörteln genutzte puzzolanische Reaktivität aufgrund amorpher Aluminiumsilikate in schwach gebrannten keramischen Stoffen (Ziegelmehle, Metakaolin) kann bei den Ziegelanteilen im Mauerwerkbruch nur bedingt genutzt werden. Die Ziegel werden seit dem 20. Jh. höher gebrannt, wodurch die puzzolanische Reaktivität stark abnimmt. Ggf. ist diese puzzolanische Reaktivität bei „Ziegelstaub“ bzw. Anhaftungen nach den Aufbereitungsvorgängen des Bauschutts gegeben. Dies müsste jedoch ebenfalls weiterführend untersucht werden.

Die Grenzwerte für die säure- und wasserlöslichen Sulfatgehalte der RC-Körnungen werden unterschritten, so dass nicht mit der Bildung treibfähiger Minerale wie Ettringit und Thaumasit unter den üblichen klimatischen Bedingungen im Hochbau zu rechnen ist. Gerade diese überwiegend trockenen und warmen Klimabedingungen im Hochbau (im Gegensatz zum Verkehrs- und Wasserbau) sind prädestiniert für den R-Beton-Einsatz und eine i.d.R. höhere Dauerhaftigkeit der herkömmlichen und R-Betone.

Zur Einschätzung des Sulfatgehalts durch die Aufbereiter von RC-Körnungen wurde ein handelsüblicher Schnelltest mit Stäbchen auf seine prinzipielle Eignung geprüft. Dieser in Kapitel 5.6.3 beschriebene Schnelltest ermöglicht durch seine einfache Ausführung vor Ort eine schnelle Abschätzung des Sulfatgehalts und damit der Eignung des Mauerwerkbruchs als RC-Körnung. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse des Schnelltest mit bekannten Labormethoden bestätigte die ausreichende Genauigkeit des Tests.

6. Ökologische Bilanzen

Um qualitätsgerechte RC-Gesteinskörnungen für den R-Beton mit wirtschaftlicher Ausbeute bereitzustellen, sind beim Bauschuttaufbereiter zusätzliche Schritte wie nochmaliges Brechen und Klassieren unter Stromverbrauch nötig. Das ist sowohl bei primären als auch RC-Körnungen notwendig. In der Ökobilanz können durch die zusätzliche Aufbereitung ggf. leichte Verschlechterungen für RC-Körnungen eintreten. Wenn RC-Material anfällt, das als Rohstoff unter Umständen geringere Preise erzielt, kann dies durch höhere Erlöse beim Einsatz der RC-Körnung im R-Beton im Zusammenspiel mit Transportkostenvorteilen mehr als ausgeglichen werden.

Eine Verlagerung der Anwendung im R-Beton für den Hochbau anstelle für Erdbaumaßnahmen führt zu einem höherwertigen Recycling – verbunden mit der bereits oben erwähnten zusätzlichen Aufbereitung der Gesteinskörnung, um die Ziele des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms zu erreichen. Der ggf. geringe Nachteil in der Ökobilanz aus Sicht des Bauschuttaufbereiters ist damit mehr als gerechtfertigt.

Die Ökobilanz von konventionellem und R-Beton wird durch die Produktion der Inhaltsstoffe und hier insbesondere der Zementmenge und -art dominiert. Für die Gesamtbilanz des Betons ist die Ökobilanz des Zements sehr viel relevanter als die der natürlichen Gesteins- und RC-Gesteinskörnung. Diese schneidet umso besser ab, je geringer der Klinkeranteil im Zement und je geringer die Zementmenge im Beton ist. Aus diesem Grund wurden in den R-Betonen des Projekts ausschließlich Kompositzemente mit reduziertem Klinkeranteil und geringe Zementgehalte eingesetzt – nur so viel wie für die Sicherung der betontechnischen Eigenschaften gemäß Betongüte und Expositionsklasse notwendig war.

Beide Betone haben dieselben technischen Spezifikationen und Lebenserwartungen, so dass als Funktion direkt die Bereitstellung einer bestimmten Menge Beton angesetzt werden kann. Hinsichtlich des Zements gibt es keine Unterschiede in der Produktion dieser beiden Betone. Unterschiede gibt es in der Art der verwendeten Gesteinskörnung (RC- oder Primär-), der Menge Betonverflüssiger (für R-Beton erhöht wegen stärkerem Wassersaugen) und im Transportaufwand aufgrund der durchschnittlich kürzeren Distanz für RC-Gesteinskörnung zum Betonwerk im Vergleich zur Primärgesteinskörnung.

Die Unterschiede im gesamten Lebenszyklus zwischen R-Beton und herkömmlichen Betonen beschränken sich auf die Herstellung des Betons, weil durch die äquivalenten Eigenschaften keine Unterschiede in Bau-, Nutzungsphase und Abbruch sowie Bauschuttaufbereitung resultieren.

Im Treibhauseffekt werden die geogenen Kohlendioxidemissionen und wie auch im Versauerungs- und terrestrischen Eutrophierungspotenzial die mit der Energiebereitstellung verbundenen Emissionen abgebildet. Der Unterschied zwischen R-Beton und konventionellem Beton ist gering und wird im Projekt durch die im R-Beton etwas reduzierte Zementmenge durch Substitution durch Flugasche erreicht. Die Summe der Nachteile im R-Beton durch leicht erhöhten Betonverflüssigeranteil im Vergleich zu den Vorteilen der RC-Körnung und deren Transportaufwand überwiegen beim Treibhauseffekt leicht. Beim fossilen kumulierten Energieaufwand ist es leicht umgekehrt. Beim terrestrischen Eutrophierungs-, Versauerungs- und Feinstaubpotenzial zeigen sich demgegenüber etwas stärker die Vorteile aus dem nicht notwendigen Sprengprozess für die RC-Körnung im R-Beton und deren geringerer Transportdistanz. **Deutliche Vorteile erzielt der R-Beton in der Kategorie mineralischer kumulierter Rohstoffaufwand, in welchem die Massen aller aus der Erde extrahierten und weiterverarbeiteten Rohstoffe aufaddiert werden sowie auch in der Flächenbelegung.**

Insgesamt ist der R-Beton aufgrund der Ressourceneinsparung zu ansonsten geringen Unterschieden in den anderen Indikatoren und Wirkungskategorien gegenüber dem konventionellen Beton im Vorteil.

7. Erhöhung der Attraktivität durch mehr Basisinformationen, Verbreitung des Wissens im Zielgruppenmarkt und Überwindung von Hemmnissen

Zur Verbreitung der erworbenen Kenntnisse, dem Aufzeigen neuer Anwendungsgebiete und der Überwindung von Hemmnissen bei Bauherren, Planern und Ausführenden wurden die Projektbeteiligten vielfältig aktiv. Dazu gehörten Vorträge, Fachartikel und die Teilnahme an und Mit-Organisation von Workshops und Veranstaltungen mit Bezug auf das Projektthema. Eine Auflistung der Öffentlichkeitsarbeit ist in den Tabellen 39 und 40 im Anhang zu finden.

Anhand der selbst verfassten und durchgeführten Umfragen bei Architekten, Statikern und Betonfertigteilerherstellern wurde ermittelt, welche Erfahrungen und Hemmnisse in Bezug auf R-Beton vorliegen. Auf dieser Grundlage können die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse aus dem Projekt und Objekterfahrungen anhand von Veröffentlichungen und in Informationsveranstaltungen an die Bauherren, Planer etc. herangeführt werden, um damit Kritiker zu überzeugen, Hemmnisse abzubauen und den Bedarf für R-Betone zu wecken sowie dessen Verwendung zu fördern.

8. Entlastung der Umwelt durch: Vermeidung von Deponiebildung, verstärkter Einsatz der RC-Körnung Typ 2 im Hochbau, Erarbeitung von Konzepten für geschlossene Stoffkreisläufe

Die Nutzung von RC-Körnungen dient der Schonung der Ressourcen an natürlichen Gesteinskörnungen und der damit einhergehenden Reduzierung des Landverbrauchs sowie zur Minderung des zu deponierenden Bauschuttvorkommens (siehe auch Punkt 6 der Zusammenfassung). Gemäß Literaturangaben benötigen R-Betone häufig einen erhöhten Zementbedarf. Dies konnte durch die untersuchten R-Betonrezepturen widerlegt werden. In diesen konnte der Zementbedarf gegenüber den Referenzbetonen sogar reduziert werden, da ein Teil gegen Steinkohlenflugasche substituiert wurde (was auch in der Referenzbetonrezeptur möglich wäre).

Ein ökologisch und ökonomisch sinnvoller Einsatz von RC-Körnungen bei vergleichbaren Betonrezepturen mit gleicher Zementart und gleichem Zementgehalt ist nur dann gegeben, wenn die Distanz zwischen Aufbereiter und R-Betonhersteller (=Transportbetonwerk) sowie zwischen R-Betonhersteller und Baustelle gering ist und erstgenannte Distanz deutlich geringer ist als für die Beschaffung der üblicherweise im jeweiligen Betonwerk genutzten natürlichen Gesteinskörnungen. Neben der Zementart und dem Zementgehalt ist die signifikante Einsparung von Kraftstoffen bei den Transporten der wichtigste Indikator für ökologische und ökonomische Vorteile der R-Betone gegenüber herkömmlichen Betonen gleicher Festigkeitsklasse und Expositionsclassen. Demzufolge sind die RC-Körnungen vor allem für die Betonwerke interessant, die ihre natürlichen Gesteinskörnungen aus großer Entfernung beziehen.

Aktuelles

Nach Abschluss des vom BMBF geförderten Verbundforschungsvorhabens "Ressourcen schonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation", das an der TU Kaiserslautern von Professor Wolfgang Breit geleitet wird, ist zu erwarten, dass R-Betone noch in weiteren Betonfestigkeitsklassen und Expositionsklassen eingesetzt werden können. Es wurde gezeigt, dass auch höhere Anteile an Typ 2 Körnungen als die Regelwerke bisher gestatten möglich sind, um qualitätsgerechte Betone herzustellen. Die Erfahrung mit Typ 2 Körnungen der bisherigen Recyclinganbieter zeigen jedoch, dass aktuell nicht genügend Recycler Typ 2-Körnungen im Portfolio führen, um diese Maximalgehalte gemäß Regelwerken auszuschöpfen. Mit Inkrafttreten der neuen DIN 4226-101 und -102 und dem Wegfallen einer notwendigen Zulassung ist zu erwarten, dass das Angebot von RC-Körnungen für Beton ansteigt.

13. Literatur-, Normen- und Richtlinienverzeichnis

- [1] http://www.geoberuf.de/index.php?option=com_content&view=article&id=312&Itemid=144. (Abruf: 20.03.2017).
- [2] Lamprecht, H.-O.: Opus Caementitium – Bautechnik der Römer, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 1984
- [3] Schulz, R.R., Hendricks, Ch.F.: Recycling of Masonry Rubble. [Buchverf.] T.C. Hansen. Recycling of Demolished Concrete and Masonry. London: E&FN Spon An Imprint of Chapman & Hall, 1992.
- [4] Gänßmantel, J., Clemens Hecht, C.: WTA Almanach 2007 - Bauinstandsetzen und Bauphysik, Hrsg.: Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V. -WTA-, München, 2007
- [5] Grübl et. al.: Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045, Zwischenbericht September 1998 (www.b-i-m.de)
- [6] Prof. Müller
- [7] Susset, B.: Ressourcenschonung – Chancen nutzen und Grenzen erkennen unter besonderer Betrachtung der Massenströme in Baden-Württemberg und der Umweltwirkungen während des gesamten Lebenszyklus (LCA), 4. Fachkongress „Neues Bauen“, 08. Februar 2017, Stuttgart
- [8] ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, <http://www.rc-beton.de/herstellung.html> (Abruf: 29.05.2017)
- [9] Allianz für nachhaltige Beschaffung – Expertengruppe Ressourceneffizienz: Leitfaden Ressourceneffiziente Beschaffung – Teil 1 Rezyklierte Baustoffe, Januar 2014
- [10] Umwelt Bundesamt: Bauabfälle. <http://www.umweltbundesamt.de/daten/abfall-kreislaufwirtschaft/entsorgung-verwertung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#textpart-1> (Abruf: 20.03.2017).
- [11] Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2016. Deutschland und Internationales, Umwelt: Abfallbilanz 2014, Wiesbaden, Oktober 2016. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2016.pdf?__blob=publicationFile (Abruf: 20.03.2017).
- [12] Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012, Berlin, 2015. <http://kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-9.pdf> (Abruf: 20.03.2017).
- [13] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAFStb-Richtlinie: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Berlin: Beuth-Verlag, September 2010
- [14] Hofmann, W., Patt, B.: Konstruktionsbeton aus Mischabbruch, In: Tec 21, Jahrgang 132, Nr. 10, 2006, Seite 8-10
- [15] Knappe, F.: Geht doch. In: RECYCLING Magazin 22/2013, Seite 30-31
- [16] DIN EN 12620:2008-07: Gesteinskörnungen für Beton, Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2008
- [17] Weimann, K: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter der Verwendung der Setzmaschinenteknik. Berlin : BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 2009. Doktorarbeit. ISBN 978-3-9812910-7-0.
- [18] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010“, Berlin: Beuth-Verlag, Januar 2011
- [19] DIN EN 206:2017-01: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Berlin: Beuth-Verlag, Januar 2017
- [20] DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Berlin: Beuth-Verlag, August 2008
- [21] DIN 4226-100:2002-02: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen, Berlin: Beuth-Verlag, Februar 2002
- [22] SNV. Schweizerische Normen-Vereinigung. [Online] (Abruf: 20. April 2016) <http://www.snv.ch/de/>.

- [23] sia. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. [Online] (Abruf: 20. April 2016) www.sia.ch.
- [24] Hoffmann, C., Moser, K.: Aktualisiertes SIA-Merkblatt "Recyclingbeton". Die Baustellen. 2010, Juni 2010.
- [25] Hoffmann, C.: Stand von Forschung und Entwicklung in der Schweiz. [Vortrag 9. Schweizer Betonforum]. Würmlingen, Schweiz : 1. Juli 2015.
- [26] Nobis, C., Vollpracht, A.: Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand. Institut für Bauforschung Aachen, RWTH Aachen. Aachen: 2015. Forschungsbericht F 7099.
- [27] DIN EN 933-1:2006-01: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren, Berlin: Beuth-Verlag, Januar 2006
- [28] DIN EN 1097-5:2008-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung, Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2008
- [29] DIN EN 933-11:2009-07: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Beurteilung von Feinanteilen - Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung, Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2009
- [30] Hagen, A.: Holcim Kies und Beton GmbH - Bauen mit RC-Beton. Von http://www.rc-beton.de/vortraege_pdfs/4%20Hagen%20Aichele.pdf (Stand: 3.4.2017)
- [31] DIN EN 1097-6:2010-06: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme (Entwurf), Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2010
- [32] Latscha, H.P., Linit, G.W., Klein, H.: Analytische Chemie – Chemie Basiswissen III, Wiesbaden: Springer, 4. Auflage, 2003
- [33] DIN EN 197-1:2014-07: Zement - Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement (Entwurf), Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2014
- [34] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton - Druckfestigkeit von Probekörpern, Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2009
- [35] DIN EN 12390-5:2009-07: Prüfung von Festbeton - Biegezugfestigkeit von Probekörpern, Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2009
- [36] DIN EN 14146:2004-06: - Prüfverfahren für Naturstein - Bestimmung des dynamischen Elastizitätsmoduls, Berlin: Beuth-Verlag, Juni 2004
- [37] Holcim Betonpraxis – Der Weg zum dauerhaften Beton, Ausgabe Schweiz, 3. Auflage, 2016
- [38] Hoffmann, C.; Jacobs, F.: Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat. Sachstandsbericht. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Beton/Bauchemie und Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB), Dübendorf, Wildeggen: 2007
- [39] DIN EN 12390-7:2009-07: Prüfung von Festbeton - Dichte von Festbeton, Berlin: Beuth-Verlag, Juli 2009
- [40] DIN EN 12390-9:2006-08: Prüfung von Festbeton - Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung, Berlin: Beuth-Verlag, August 2006
- [41] BAW Merkblatt - Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012
- [42] Stark, J., Wicht, B.: Zement und Kalk - Der Baustoff als Werkstoff, Berlin: Birkhäuser, 2000
- [43] DIN 66133:1993-06: Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberfläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion, Berlin: Beuth, Juni 1993
- [44] Verein Deutscher Zementwerke: Zement-Taschenbuch, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik 50. Auflage, 2002
- [45] Fricke-Bergmann, C. et al.: Laser-based online analysis of minerals. ZKG International 2010, Nr.10, S.65-70.
- [46] Gehlen, C.: Momentaufnahme. Automatisierte Online-Analyse. AT Mineral Processing Vol 51, 2010, Nr.10, S.34-39.

- [47] Feierabend, A.: Einsatz von LIBS inline-Elementanalysatoren in Recyclinganlagen. http://www.vivis.de/phocadownload/Download/2015_rur/2015_RuR_619-628_Feierabend.pdf
- [48] SECOPTA laser based sensor systems: Recovery of Recycables -Identification of Recycling Materials. SECOPTA Firmenschrift.
- [49] Bohling, C.; John, A.; Cordts, L.: Sensoren auf Basis der Laserinduzierten Breakdown-Spektroskopie (LIBS) für industrielle Anwendungen. SECOPTA Firmenschrift.
- [50] Wilsch, G. et al.: Chlorid- und Sulfatanalyse mit LIBS – vom Laborverfahren zum Baustellengerät. Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008 - Vortrag 12 Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben.
- [51] Taffe, A. et al.: Development of a portable LIBS-device for quality assurance in concrete repair. Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II –© 2009 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-46850-3
- [52] Beitrag zum DAfStb Heft 422 Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Kapitel 1.2, 2016
- [53] Gaft, M.; Nagli, L.; Fasaki, I.; Kompitsas, M.; Wilsch, G.: Laser-induced breakdown spectroscopy for on-line sulfur analyses of minerals in ambient conditions. Spectrochimica Acta. Part B 64 (2009) 1098-1104
- [54] Weritz, F.; Ryahi, S.; Schaurich, D.; Taffe, A.; Wilsch, G.: Quantitative determination of sulfur content in concrete with laser-induced breakdown spectroscopy. Spectrochimica Acta. Part B 60 (7-8) 1121-1131
- [55] Weritz, F. et al.: Laser Induced Breakdown Spectroscopy as a tool for the characterization and sorting of concrete waste material in view of high-order re-use. International Symposium (NDT-CE 2003) Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003.
- [56] Medienwerkstatt-Wissen: Karte der Bundesländer, September 2011. http://medienwerkstatt-online.de/lws_wissen/vorlagen/showcard.php?id=263&edit=0 (Abruf: 25.03.2017).
- [57] Google: Google Maps. <https://www.google.de/maps/@47.6690891,9.169779,2957m/data=!3m1!1e3> (Abruf: 24.03.2017).
- [58] Bickelmann, R.: Vortrag - Ressourcenschonendes Bauen - Technisches Rathaus Tübingen. Neues Bauen - eine Chance zur Abfallvermeidung in der Bauwirtschaft - mit geschlossenen Stoffkreisläufen nachhaltig bauen, Stuttgart, Februar 2017.
- [59] DIN V 18151-100:2005-10: Hohlblöcke aus Leichtbeton - Hohlblöcke mit besonderen Eigenschaften, Berlin: Beuth-Verlag, Oktober 2005
- [60] Wissenschaftlich-technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA): Merkblatt 4-5-99/D Beurteilung von Mauerwerk – Mauerwerksdiagnostik, München: WTA Publications, 1999
- [61] Kreislaufwirtschaft Bau, Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014. Bericht zum Aufkommen und Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014, Berlin 2017
- [62] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V., Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus TL BuB E-StB 09, Köln 2009
- [63] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Bonn 2012
- [64] Statistisches Bundesamt (Hrg.), Umweltökonomische Gesamtrechnungen, Nachhaltige Entwicklung in Deutschland, Indikatoren zu Umwelt und Ökonomie, S. 7, Wiesbaden 2015, Abb. Verändert
- [65] ifeu Heidelberg / Fa. Krieger / Fa. Feess, Stoffkreisläufe von RC-Beton. Informationsbroschüre für die Herstellung von Transportbeton unter Verwendung von Gesteinskörnungen nach Typ 2, im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, 2013
- [66] TL Gestein-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen für den Straßenbau, Ausgabe 2004/Fassung 2007, Anhang B, Tabelle B.1

- [67] BTU Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), Untersuchungsergebnisse im Forschungsprojekt ifeu / btu / Scherer + Kohl / tbs, Einsatz von Recyclingmaterial aus mineralischen Baustoffen als Zuschlag in der Betonherstellung, durch das DBU gefördertes Forschungsprojekt (DBU AZ 26101-23), 2010
- [68] Tschümperlin, L. und Frischknecht, R.: Ökobilanz ausgewählter Betonsorten. Fachstelle nachhaltiges Bauen und Fachstelle Ingenieurwesen des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich 2016
- [69] Müller, M. und Hampel, C.: Tailor-made Solutions for efficient Water Reduction in Gypsum Wallboard Production. Sika, Kazan 2010
- [70] Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Ökobilanzielle Baustoffprofile für Transportbeton, Duisburg 2007
- [71] ifeu Heidelberg, Criteria for a Sustainable Use of Bioenergy on a Global Scale; prepared for UBA. Heidelberg/Dessau. Bericht herunterladen unter:
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3514.pdf>, Heidelberg 2008
- [72] DIN EN 15804:2012+A1:2013: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Berlin: Beuth, Juli 2014
- [73] Institut Bauen und Umwelt e.V., Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804, Beton der Druckfestigkeitsklasse C 20/25, InformationsZentrum Beton GmbH, 2013
- [74] Abfallvermeidung in der Baubranche - Informationen für Bauherren, Architekten und alle am Bau Interessierten, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
- [75] Gemeinsame Erklärung zur Abfallvermeidung im Bausektor (in Baden-Württemberg vom 11.12.2015 <https://um.baden-wuerttemberg.de>)
- [76] Umweltpakt Bayern – Vereinbarung über die Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken
- [77] <http://www.wuerzburg.de/de/weitere-informationen/presse/aktuelle-pressemitteilungen/414795.Grundsteinlegung-Umweltstation-Aus-altem-Beton-entsteht-moderne-Anlaufstelle.html>
- [78] Dageförde, A.: Vergaberechtliche Aspekte bei öffentlichen Ausschreibungen von Bauvorhaben mit bevorzugtem Einsatz von Recycling-Baustoffen, Fachkonferenz Stärkung des Einsatzes von mineralischen Recyclingbaustoffen, Potsdam, 21. März 2017
- [79] Bauen mit Recyclingbeton, Stuttgart, 20.07.2017
- [80] Bündnis Vereinbarung Kreislaufwirtschaft auf dem Bau, Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung, 15. Oktober 2012
- [81] Müller, A: Das Deutsche Gütesiegel für Nachhaltiges Bauen als neuer Maßstab im internationalen Vergleich. [Masterthesis]. Konstanz : s.n., 2010.
- [82] <http://www.bmub.bund.de/pressemitteilung/hendricks-tragfaehige-loesung-fuer-umgang-mit-bauabfaellen/>
- [83] http://inv-bw.de/wp-content/uploads/2014/11/NBBW_Kompodium_V2014-07.pdf
- [84] InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.) (2016): Geokoffer. Bausteine des Landes. Kies. InformationsZentrum Beton GmbH, zuletzt geprüft am 02.05.2017

Weiteres EU Projekt der TU Kaiserslautern

"Secondary Raw Materials for Concrete Precast Products" (SeRaMCo) beantragt, das sich der vermehrten Verwendung mineralischer Bauabfälle in der Produktion von Betonfertigteilen widmet.

<https://www.uni-kl.de/aktuelles/news/news/detail/News/tu-bauingenieure-koordinieren-eu-projekt-zu-recycling-beton-von-ueber-sieben-millionen-euro/>

14. Anhang

Anhang A



Abb. 163: Vorkommen und Abbaugelände von Gesteinskörnungen als Primärrohstoff in Baden – Württemberg [84]

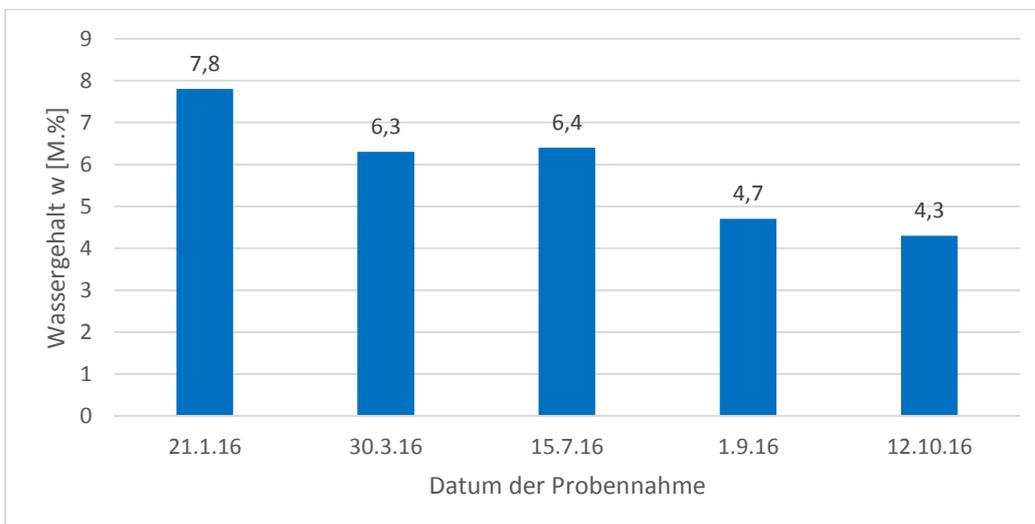


Abb. 164: Feuchtegehalt der Feess 2/16 RC-Gesteinskörnung im Anlieferungszustand



Abb. 165: R-Betonprobe DR 35 vor der CIF Prüfung



Abb. 166: R-Betonprobe DR 35 nach der CIF Prüfung



Abb. 167: R-Betonprobe DR 38 vor der CIF Prüfung



Abb. 168: R-Betonprobe DR 38 nach der CIF Prüfung



Abb. 169: Referenzbetonprobe DN 35 vor der CIF Prüfung



Abb. 170: Referenzbetonprobe DN 35 nach der CIF Prüfung



Abb. 171: Referenzbetonprobe DN 38 vor der CIF Prüfung



Abb. 172: Referenzbetonprobe DN 38 nach der CIF Prüfung



Abb. 173: Truhe für die Frostprüfungen (Labor Fa. Holcim, Dotterhausen)

Quellen zu



Abb. 173: Truhe für die Frostprüfungen (Labor Fa. Holcim, Dotterhausen)

Tab. 34:

¹ Mettke, A.: RC-Beton – Qualität und Qualitätssicherung auf Fachtagung Recycling R`10, Weimar, 22./23. Sept. 2010

² Fischer, T.: Die Waldspirale in zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformationen und Landmanagement, Heft 4/2002, 127. Jahrgang, Fachbeiträge,

³ Mettke, A.: Leuchtturmprojekt aus Recyclingbeton in RECYCLING magazin, Heft 04/2010,

⁴ Bauen mit RC-Beton: Pilotprojekte, <http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html> (Zuletzt geprüft am 20.03.2017)

⁵ Schmid, S., Ingenieurgesellschaft Tompert mbH, Geschosswohnungsbebauung Stuttgart, E-Mail, 23.03.2017

⁶ Mozer, B., Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Tübingen, Servergebäude der Uni/UK Tübingen, E-Mail, 21. März 2017

⁷ Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Referat Abfallwirtschaft: Dokumentation zum Einsatz von ressourcenschonendem Beton – beim „Neubau des Forschungs- und Laborgebäudes für Lebenswissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin“ in Berlin Mitte, März 2015

⁸ Stadsiedlung Heilbronn: Erfahrungen aus der Praxis zu Ressourcenschonendem Beton. Neues Bauen - eine Chance zur Abfallvermeidung in der Bauwirtschaft - mit geschlossenen Stoffkreisläufen nachhaltig bauen, Heilbronn, 09. Feb. 2017

⁹ Hörsch, T.: Einsatz von R-Beton in Bauvorhaben des Landes auf Fachsymposium „Optimierung der Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft: R-Beton hilft Stoffkreisläufe schließen“, Stuttgart, 20. Jan. 2016

¹⁰ Befragung auf Baustelle Pegasus

¹¹ Braunmiller: Objekterfahrung aus der Sicht des Bauherrn. Neues Bauen - eine Chance zur Abfallvermeidung in der Bauwirtschaft - mit geschlossenen Stoffkreisläufen nachhaltig bauen, Ludwigsburg, 09. Feb. 2017

¹² Ökologische Ästhetik – Neubau Umweltbildungszentrum Mainz in context – Das Magazin von HeidelbergCement – Thema: Stadt – Land - Fluss, Ausgabe 3/2016

¹³ Fritz, W., Ackermann+Raff GmbH & Co. KG, Technisches Rathaus Tübingen, E-Mail, 07. Sept. 2016

¹⁴ Stürmer, S., Kurzdokumentation zum Technischen Rathaus Tübingen, E-Mail, 02. Nov. 2016

¹⁵ Schad, K., Heinrich Feess GmbH & Co. KG, Kompetenzzentrum, E-Mail, 12. April 2017

Anhang B: Tabellen zur Dokumentation

Tab. 35: Für die Ökobilanzierung verwendete Datensätze

Datensatz/Modul	Quelle
Allgemeine Daten	
Netzstrommix Deutschland	ifeu-Daten
Radlader	ifeu-Daten
Transporte LKW, Binnenschiff	ifeu-Daten
Zement	
Ethylenglykol, ab Werk	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Klinker, ab Werk	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Kalkstein, gebrochen, für Mahlen	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Gipsrohstein, ab Abbau	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Portlandhüttenzement, ab Werk	Zusammensetzung nach Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
CEM II B	Zusammensetzung nach Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Beton	
Sand, ab Abbau	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Kies	Energieverbrauch nach [Holcim 2010], Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Edelsplitt → Kalkstein, gebrochen, gewaschen	Ecoinvent, zweimal gebrochen, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Zusätzlicher Aufwand RC-Gesteinskörnungsaufbereitung	ifeu-Abschätzungen, [btu 2010]

Tab. 36: Vergleich verschiedener Datensätze zu Zementen

Zementart	Spezifischer Treibhauseffekt [kg CO ₂ -äq./kg Zement]	Quelle
Verwendete Zemente		
CEM II B, Klinkeranteil 68,4 %, deutscher Netzstrommix	0,665	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
CEM II/A-S 42.5, Klinkeranteil 76,4 %, deutscher Netzstrommix	0,747	Ecoinvent, Energievorketten und Transporte ifeu-Daten
Weitere Zemente zum Vergleich		
CEM II/B-LL, Klinkeranteil 71 %	0,595	Tschümperlin / Frischknecht 2016
CEM II/A, Klinkeranteil 78,8 %	0,66	Tschümperlin / Frischknecht 2016
CEM II 42,5	0,853	Ökobaudat
CEM II B	0,775	Ökobaudat

Tab. 37: Transportentfernungen verschiedener Zusatzmittel zum Betonwerk

Betoninhaltsstoff	Angesetzte Transportentfernung zum Betonwerk [km]
Primär-Gesteinskörnung	39
RC-Gesteinskörnung	10
Zement	106
Betonverflüssiger	100
Flugasche	100

Anhang C: Wirkungsindikatoren

Die in dieser Studie umfassten Wirkungsindikatoren werden im Folgenden gegliedert nach Wirkungskategorien vorgestellt und die entsprechenden Charakterisierungsfaktoren beziffert. Der jeweilige Ursprung der Methode wird referenziert. Die Rechenvorschrift zur Berechnung des Indikatorergebnisses befindet sich am Ende jedes Unterkapitels der einzelnen Wirkungskategorien.

C.1 Klimawandel

Diese, früher auch Treibhauseffekt genannte Wirkungskategorie steht für die negative Umweltwirkung der anthropogen bedingten Erwärmung der Erdatmosphäre und ist in entsprechenden Referenzen bereits eingehend beschrieben worden [IPCC 1995, IPCC 2001]. Der bisher in Ökobilanzen meist angewandte Indikator ist das Strahlungspotential (radiative forcing) [CML 1992, Klöpffer 1995] und wird in CO₂-Äquivalenten angegeben. Die Charakterisierungsmethode gilt als allgemein anerkannt.

Mit dem Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) besteht zudem ein internationales Fachgremium, das sowohl Methode als auch die entsprechenden Kennzahlen für jede klimawirksame Substanz errechnet und fortschreibt. Die vom IPCC fortgeschriebenen Berichte sind als wissenschaftliche Grundlage zur Instrumentalisierung des Treibhauseffektes in ihrer jeweils neuesten Fassung heranzuziehen.

In den stofflich genutzten Pflanzen ist Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden, der im Laufe der Zeit, sei es bei Verrottung oder Verbrennung, wieder freigesetzt wird. Diese CO₂-Emissionen werden per Konvention des IPCC *nicht* dem Treibhauseffekt zugerechnet, da hierbei genau so viel CO₂ freigesetzt wird, wie zuvor der Atmosphäre beim Wachstum der Pflanze entzogen wurde. Die zeitweilige Bindung von CO₂ in der Pflanze bzw. dem daraus produzierten Stoff ist in der Regel auf maximal einige Jahrzehnte beschränkt und erfordert aufgrund der langen Integrationszeiträume beim Treibhauseffekt keine Berücksichtigung. Selbstverständlich werden die CO₂-Emissionen, die während der landwirtschaftlichen Produktion etwa beim Maschineneinsatz oder für die Produktion von Düngemitteln durch den Einsatz fossiler Energieträger entstehen, auf den Lebensweg angerechnet.

Bei der Berechnung von CO₂-Äquivalenten wird die Verweilzeit der Gase in der Troposphäre berücksichtigt, daher stellt sich die Frage, welcher Zeitraum der Klimamodellrechnung für die Zwecke der Produkt-Ökobilanz verwendet werden soll. Es existieren Modellierungen für 20, 50 und 100 Jahre. Die Modellrechnungen für 20 Jahre beruhen auf der sichersten Prognosebasis. Das Umweltbundesamt empfiehlt die Modellierung auf der 100-Jahresbasis, da sie am ehesten die langfristigen Auswirkungen des Treibhauseffektes widerspiegelt. Sie wurde in diesem Projekt verwendet.

Nachfolgend werden die in den Berechnungen des Treibhauspotentials angetroffenen Substanzen mit ihren CO₂-Äquivalenzwerten - ausgedrückt als „Global Warming Potential (GWP) - aufgelistet:

Tab. C1: Treibhauspotential der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Treibhausgas	CO ₂ -Äquivalente (GWP _i)
Kohlendioxid (CO ₂)	1
Methan (CH ₄)	30
Methan (CH ₄), regenerativ	28
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	265
Tetrachlormethan	1.730
Tetrafluormethan	6.630
Hexafluorethan	11.100
Quelle: [IPCC 2013]	

Der Beitrag zum Treibhauseffekt wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Mengen der einzelnen treibhausrelevanten Schadstoffe (m_i) und dem jeweiligen GWP (GWP_i) nach folgender Formel berechnet:

$$GWP = \sum_i (m_i \times GWP_i)$$

C.2 Photooxidantienbildung (Photosmog oder Sommersmog)

Aufgrund der komplexen Reaktionsvorgänge bei der Bildung von bodennahem Ozon (Photosmog oder Sommersmog) ist die Modellierung der Zusammenhänge zwischen Emissionen ungesättigter Kohlenwasserstoffe und Stickoxiden äußerst schwierig. Die bisher in Wirkungsabschätzungen verwendeten Ozonbildungspotentiale (Photochemical Ozone Creation Potential - POCP) [CML 1992], ausgedrückt in Ethenäquivalenten, sind in Fachkreisen umstritten, da sie zum einen auf der Änderung bestehender Ozonkonzentrationen aufbauen und zum anderen für regional weiträumige Ausbreitungsrechnungen entwickelt wurden. Sie basieren auf dem Ozonbildungspotential der Kohlenwasserstoffe und blenden den Beitrag der Stickoxide an den Bildungsreaktionen vollkommen aus.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens des UBA [UBA 1998] wurde versucht ein verbessertes Berechnungsmodell zu entwickeln. Dabei war zunächst beabsichtigt, die relevanten Bildungsreaktionen für Photooxidantien vor dem Hintergrund real existierender Konzentrationen und Mischungsverhältnisse unter Berücksichtigung der Stickoxide für eine solche Modellbildung heranzuziehen. Die Atmosphäre über einer gegebenen Fläche - z.B. Deutschlands - wäre als ein Ein-Box-Modell angenommen und mit den zusätzlichen ozonbildenden Agenzien neu berechnet worden. Dieser Ansatz erwies sich jedoch orientiert an der schlechten Datenlage der ozonbildenden Substanzen im Rahmen einer Sachbilanz als zu aufwendig im Vergleich zu seinem möglichen Nutzen.

Um dennoch die Stickoxide in die Modellierung der Photooxidantienbildung mit einbeziehen zu können, wurde von [Stern 1997] eine lineare Berücksichtigung der Stickoxide vorgeschlagen. Dies bedeutet, dass aufbauend auf das POCP-Modell in Ethenäquivalenten jeweils die pro System emittierten Stickoxide zu dem berechneten POCP-Wert multipliziert werden. Es ergibt sich daraus ein neuer Indikator – das Nitrogen Corrected Photochemical Ozone Creation Potential – NCPOCP, das eine lineare Berücksichtigung der Stickoxide ermöglicht. Das Modell wurde bisher vor allem im deutschen Kontext angewendet und es muss noch diskutiert werden, mit welcher wissenschaftlichen Belastbarkeit der gewählte lineare Ansatz die Wechselwirkung zwischen NO_x und den Schadgasen hinsichtlich des Ozonbildungspotentials abzubilden vermag.

Nachfolgend sind die Gase mit ihren photochemischen Ozonbildungspotentialen (POCP) aufgelistet, die im Rahmen dieser Ökobilanz erhoben werden konnten.

Tab. C2: Ozonbildungspotential der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Schadgas	POCP [kg Ethen-Äquivalente]
Ethen	1
Methan	0.006
Formaldehyd	0.519
Kohlenmonoxid	0.027
Benzen	0.218
Acetylen	0.085
Ethanol	0.399
Ethylbenzen	0.73
Ethylacetat	0.209
Hexan	0.482
Toluen	0.637
Xylen	1.108
Aldehyd, unspezifiziert	0.549
Butan	0.352
Buten	1.079
Ethan	0.123
Heptan	0.494
Propen	1.123
MTBE	0.175
Acetaldehyd	0.641
Methanol	0.14
Styren	0.142
Dichlorethen	0.447
Ethenglycol	0.373
Hydrocarbone:	
NMVOC aus Deselemissionen **	0.414
NMVOC (Durchschnitt)*	0.414
VOC*	0.414
Quelle: [Jenkin+Hayman 1999, Derwent et al. 1998] in [CML 2010], *[IFEU 2008], **[UBA 1995]	

Dabei wurden nur Einzelsubstanzen mit einem definierten Äquivalenzwert zu Ethen berücksichtigt. Für die stofflich nicht präzise spezifizierten Kohlenwasserstoffe, die in Literaturdatensätzen häufig angegeben werden, wird ein aus CML [1992] entnommener mittlerer Äquivalenzwert verwendet.

Das POCP wurde nach folgender Formel ermittelt:

$$POCP = \sum_i (m_i * POCP_i)$$

C.3 Eutrophierung und Sauerstoffzehrung

Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. Da zwei unterschiedliche Umweltmedien auf sehr unterschiedliche Weise betroffen sind, soll auch eine Unterteilung in Gewässer-Eutrophierung und Boden-Eutrophierung vorgenommen werden. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass alle luftseitig emittierten Nährstoffe eine Überdüngung des Bodens darstellen und alle wasserseitig emittierten Nährstoffe zur Überdüngung der Gewässer. Da der Nährstoffeintrag in die Gewässer über Luftemissionen im Vergleich zum Nährstoffeintrag über Abwässer gering ist, stellt diese Annahme keinen nennenswerten Fehler dar.

Die Eutrophierung eines Gewässers führt sekundär zu einer Sauerstoffzehrung. Ein übermäßiges Auftreten sauerstoffzehrender Prozesse kann zu Sauerstoffmangelsituationen im Gewässer führen. Ein Maß für die mögliche Belastung des Sauerstoffhaushalts im Gewässer stellen der Biochemische Sauerstoffbedarf (BSB) und der Chemische Sauerstoffbedarf (CSB) dar. Da der Biochemische Sauerstoffbedarf nur mit Hilfe einer Reaktionszeit definiert ist und der Chemische Sauerstoffbedarf quasi das gesamte zur Verfügung stehende Potential zur Sauerstoffzehrung umfasst, wird der CSB als konservative Abschätzung⁹ in die Parameterliste der Eutrophierung aufgenommen.

Zur Berechnung der unerwünschten Nährstoffzufuhr wird der Indikator Eutrophierungspotential gewählt und dieser Indikator in der Maßeinheit Phosphatäquivalente [CML 1992, Klöpffer 1995] angegeben.

⁹ Der CSB ist (abhängig vom Abbaugrad) höher als der BSB₅, weshalb der Äquivalenzfaktor als relativ unsicher einzuschätzen ist und tendenziell zu hoch liegt.

Nachfolgend sind die im Rahmen dieses Projektes vorkommenden verschiedenen Schadstoffe bzw. Nährstoffe mit ihrem jeweiligen Charakterisierungsfaktor aufgeführt:

Tab. C3: Eutrophierungspotential der im Rahmen dieses Projekts berücksichtigten Stoffe

Schadstoffe	PO ₄ ³⁻ Äquivalente (EP _i) in kg PO ₄ ³⁻ äquiv./kg
Eutrophierungspotential (Boden)	
Stickstoffoxide (NO _x als NO ₂)	0.13
Ammoniak (NH ₃)	0.35
Distickstoffmonoxid (N ₂ O)	0.27
Eutrophierungspotential (Wasser) (+ Sauerstoffzehrung)	
Phosphat (PO ₄ ³⁻)	1
Gesamtphosphor	3.06
Chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)	0.022
Ammonium (NH ₄ ⁺)	0.33
Nitrat (NO ₃ ²⁻)	0.1
Stickstoffverbindungen, unspezifiziert	0.42
P als P ₂ O ₅	1.34
Phosphorverbindungen, unspezifiziert	3.06
Quelle: [Heijungs et al 1992] in [CML 2010]	

Für die Nährstoffzufuhr in den Boden und in Gewässer getrennt wird der Beitrag zum Eutrophierungspotential durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen NP berechnet.

Es gilt für die Eutrophierung des Bodens:

$$NP = \sum_i (m_i \times NP_i)$$

Es gilt für die Eutrophierung der Gewässer:

$$NP = \sum_i (m_i \times NP_i)$$

C.4 Versauerung

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Substanzen.

Der in [CML 1992, Klöpffer 1995] beschriebene ausgewählte Wirkungsindikator Säurebildungspotential wird als adäquat dafür angesehen. Damit sind insbesondere keine spezifischen Eigenschaften der belasteten Land- und Gewässersysteme vonnöten. Die Abschätzung des Säurebildungspotentials erfolgt üblicherweise in der Maßeinheit der SO₂-Äquivalente. Nachfolgend sind die in dieser Studie erfassten Schadstoffe mit ihren Versauerungspotentialen, engl. „Acidification Potential (AP)“, in Form von SO₂-Äquivalenten aufgelistet:

Tab. C4: Versauerungspotential der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Stoffe

Schadstoffe	SO ₂ -Äquivalente (APi) in kg SO ₂ -äquiv./kg
Schwefeldioxid (SO ₂)	1
Stickoxide (NO _x)	0.7
Chlorwasserstoff (HCl)	0.88
Schwefelwasserstoff (H ₂ S)	1.88
Fluorwasserstoff (HF)	1.6
Cyanwasserstoff(HCN)	1.6
Ammoniak (NH ₃)	1.88
Salpetersäure (HNO ₃)	0.51
Stickstoffmonoxid (NO)	1.07
Phosphorsäure (H ₃ PO ₄)	0.98
Schwefeltrioxid (SO ₃)	0.8
Schwefelsäure (H ₂ SO ₄)	0.65
Quelle: [Hauschild und Wenzel 1998] in [CML 2010].	

Der Beitrag zum Versauerungspotential wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen AP nach folgender Formel berechnet:

$$AP = \sum_i (m_i \times AP_i)$$

C.5 Toxische Schädigung des Menschen (Humantoxizität)

C.5.1 Feinstaub (PM10)

Als Feinstaub wird die Fraktion des Staubs bezeichnet, deren Partikel einen aerodynamischen Durchmesser $< 10 \mu\text{m}$ aufweisen. Eine Reihe von internationalen Studien erfasst den Zusammenhang der Partikelbelastung und der Mortalität bzw. Morbidität. Im Ergebnis zeigte sich, dass bei Erhöhung der Immissionskonzentration von PM10 die Mortalität infolge von Atemwegs- und Herz-Kreislauf-Erkrankungen stark zunimmt. Neue Studien international anerkannter Organisationen - aktuell der WHO - haben ein hohes Mortalitätsrisiko durch Feinstäube bestätigt.

In Langzeitstudien werden Sterberaten und Beeinträchtigungen der Gesundheit sowie die Luftverschmutzung über einen möglichst langen Zeitraum beobachtet. Dabei wird eine möglichst große Population untersucht. Es zeigte sich in einigen Studien eine Zunahme der Todesfälle durch Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Die Faktoren zum relativen Risiko weisen eine große Bandbreite auf. Nach dem aktuellsten Update der WHO (Air Quality Guidelines global update 2005) ergibt sich der Zahlenwert des relativen Risikos zu $1,03/10 \mu\text{g PM10}/\text{m}^3$ (Bandbreite $1,01/10 \mu\text{g PM10}/\text{m}^3$ bis $1,055/10 \mu\text{g PM10}/\text{m}^3$). Das bedeutet, dass bei einer um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höheren Belastung der Außenluft mit PM10 das Risiko für Todesfälle durch Atemwegs- sowie Herz-Kreislauf-Erkrankungen um den Faktor 1,03 bzw. um 3% ansteigt.

Die großräumige PM10-Belastung der Außenluft wird durch direkte Staubemissionen und Sekundärpartikel verursacht, die sich aus Vorläufersubstanzen wie NO_2 , SO_2 , NH_3 und NMVOC bilden. So verbindet sich z.B. SO_2 in der Luft mit NH_3 und H_2O zu partikelförmigem $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$. Die Zuordnung erfolgt mit aerosol formation factors, die in der Berichterstattung der EU [EEA 2002] angewendet und auch von der WHO als Indikator für die Luftqualität empfohlen werden [WHO 2002]. Die in Tabelle A5 aufgeführten Faktoren wurden aus den Arbeiten von [De Leeuw 2002] abgeleitet und werden von diesem als repräsentativ für die Bedingungen in Europa eingestuft. Sie setzen sich zusammen aus dem Anteil der Vorläufersubstanz, der in Aerosolform umgewandelt wird, und aus einem Massenkorrekturfaktor, der die Umwandlung des gasförmigen Schadstoffs in den Aerosolanteil beschreibt ($\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_4$; $\text{NO}_2 \rightarrow \text{NO}_3$; $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4$). Für PM10 beträgt der Faktor 1. Für NMVOC ist die Zuordnung schwierig und verlangt die Kenntnis der Einzelverbindungen. Der von [Heldstab et al. 2003] für die NMVOC-Emissionen in der Schweiz abgeleitete Mittelwert des PM10-Potentials beträgt 0,012.

Tabelle A5: *PM10-Risikopotential von Luftschadstoffen*

Partikel PM10 und Vorläufersubstanzen	PM10-Äquivalente in kg PM10-Äq./kg
Partikel PM10	1
Partikel aus Dieselemissionen	1
Sekundäraerosolbildner	
NO_x (als NO_2)	0,88
SO_2	0,54
NH_3	0,64
NMVOC	0,012
Source: [Leeuw 2002]; [Heldstab et al. 2003],	

Der Beitrag zum Potential wird durch Summenbildung aus dem Produkt der emittierten Menge der einzelnen Schadstoffe und dem jeweiligen PM10-Potential nach folgender Formel berechnet:

$$PM10 = \sum_i (m_i \times PM10_i)$$

Ansonsten gelten die gleichen Einschränkungen und Bedenken wie beim Krebsrisikopotential beschrieben. PM10-Äquivalente stellen ein Wirkungspotential ohne direkten lokalen Bezug dar. Ein individuelles Mortalitätsrisiko ist daraus nicht ableitbar. Es sind zunächst nur die möglichen Gesundheitsgefahren durch PM10 berücksichtigt.

C.6 Ressourcenbeanspruchung

Der Verbrauch von Ressourcen wird als Beeinträchtigung der Lebensgrundlagen des Menschen angesehen. In allen Überlegungen zu einer dauerhaft umweltgerechten Wirtschaftsweise spielt die Schonung der Ressourcen eine wichtige Rolle. Der Begriff Ressourcen wird dabei manchmal beschränkt auf erschöpfliche mineralische oder fossile Ressourcen angewendet oder sehr weit interpretiert, indem z.B. genetische Vielfalt, landwirtschaftliche Flächen, etc. darin eingeschlossen werden.

Für eine Bewertung der Ressourcenbeanspruchung innerhalb der Wirkungsabschätzung wird üblicherweise die „Knappheit“ der Ressource als Kriterium herangezogen. Zur Bestimmung der Knappheit einer Ressource werden, bezogen auf eine bestimmte geographische Einheit, die Faktoren Verbrauch, eventuelle Neubildung und Reserven in Beziehung gesetzt. Als Ergebnis erhält man einen Verknappungsfaktor, der dann mit den in der Sachbilanz erhobenen Ressourcendaten verrechnet und in einen Gesamtparameter für die Ressourcenbeanspruchung aggregiert werden kann.

Trotz einer vermeintlich guten methodischen Zugänglichkeit zu der Umweltbelastung "Ressourcenbeanspruchung" werden zukünftig noch einige grundsätzliche Aspekte zu klären sein. Dies betrifft insbesondere die sinnvolle Einteilung der Ressourcenarten und die Definition von Knappheit. Erst dann sind nachvollziehbare und akzeptierte Messvorschriften und Bewertungsgrundlagen möglich.

Die Schwierigkeiten bei der Abgrenzung der Ressourcenarten ergeben sich z.B. dadurch, dass Materialien auch Energieträger sein können und umgekehrt, dass biotische Ressourcen unter Umständen nicht erneuerbar sind, dass Wasser ein erneuerbares Material und ein erneuerbarer Energieträger sein kann, usw. Dazu kommen Probleme aus der Sachbilanz: Ist der Anbau einer biotischen Ressource ein Teil des Systems, so ist nicht das biologische Material ein Input in das System, sondern die Fläche, auf der es erzeugt wird. Damit ist Fläche die Ressource, die in der Wirkungsabschätzung und Bewertung zu betrachten ist und nicht die biotische Ressource selbst.

Vor diesem Hintergrund wird von drei Ressourcenkategorien ausgegangen:

- Ressource Energie
- Materialressourcen
- Ressource Naturraum

Aufgrund der in dieser Studie getroffenen Auswahl an vorrangig betrachteten Wirkungskategorien werden im Folgenden nur die beiden Ressourcenkategorien Energie und Flächennutzung/Naturraumbeanspruchung erläutert.

C.6.1 Flächennutzungen bzw. Naturraumbeanspruchung

Fläche kann im Zusammenhang der wirkungsorientierten Bewertung als eine endliche Ressource verstanden werden. Doch ist es nicht hilfreich, Fläche nur als eine zur freien Verfügung stehende Menge zu verstehen. Fläche steht in direktem Bezug zu einem ökologisch bewertbaren Zustand dieser Fläche.

Wird der ökologische Bestand einer Fläche berücksichtigt, so sind darunter alle flächenbezogenen Umweltbelastungen zu verstehen, wie z.B. die Verringerung der biologischen Diversität, Landerosion, Beeinträchtigung der Landschaft usw. Es erscheint angebracht, mit dem Begriff "Naturraum" alle darin enthaltenen natürlichen Zusammenhänge zu verstehen und zu beschreiben – im Gegensatz zum Begriff der Fläche.

Zu diesem Zweck wurde im Rahmen der UBA Ökobilanz für graphische Papiere [UBA 1998] eine Methode zur Wirkungsabschätzung weiterentwickelt, die auf der Beschreibung des „Natürlichkeitsgrades“ (Hemerobiestufen) von Naturräumen [Klopffer, Renner 1995] aufbaut und zunächst speziell für Waldökosysteme spezifiziert wurde. Entscheidender Punkt der Methode ist die Beschreibung der Flächenqualitäten in sieben Qualitätsklassen mit abnehmendem Natürlichkeitsgrad, wobei alle Landflächen in dieses Qualitätsraster einordenbar sein müssen. Waldflächen können den ersten fünf Natürlichkeitsklassen zugeordnet werden. Klasse I entspricht dabei „unberührter Natur“, für die über lange Zeit keinerlei Nutzung erfolgen darf. Die vier folgenden Klassen gelten der forstlichen Nutzung von naturnaher bis naturferner Waldnutzung. Die Natürlichkeitsklassen III, IV, V und VI umfassen die landwirtschaftliche Nutzung und überschneiden sich damit in drei Klassen (III, IV und V) mit der forstlichen Nutzung. Die Natürlichkeitsklasse VII entspricht versiegelten oder sehr lange Zeit degradierten Flächen, wie z.B. Deponien.

Tab. C6: Charakterisierung der sieben Natürlichkeitsklassen zur Quantifizierung der Naturraumbeanspruchung [UBA 1999]

Natürlichkeitsklasse	Charakterisierung der Nutzungsformen
Natürlichkeitsklasse I	über lange Zeit keinerlei Nutzung, Unbeeinflusstes Ökosystem, z.B. Urwald
Natürlichkeitsklasse II	naturnahe forstwirtschaftliche Nutzung
Natürlichkeitsklasse III	bedingt naturnahe forst- und landwirtschaftliche Nutzung
Natürlichkeitsklasse IV	halbnatürliche forst- und landwirtschaftliche Nutzung
Natürlichkeitsklasse V	bedingt naturferne forst- und landwirtschaftliche Nutzung
Natürlichkeitsklasse VI	naturferne landwirtschaftliche Nutzung, Intensivlandwirtschaft
Natürlichkeitsklasse VII	langfristig versiegelte oder degradierte Flächen

Die Methode ist in [UBA 1999] ausführlich beschrieben. Dort wird auch darauf hingewiesen, dass die Methodenentwicklung derzeit noch nicht abgeschlossen ist. Insbesondere fehlt eine über die Forstnutzung hinausgehende durchgängige Einteilung aller Ökobilanz relevanten Naturraumnutzungen in die angesprochenen Natürlichkeitsklassen. Dies liegt unter anderem auch daran, dass die verfügbaren Datensätze in aller Regel nicht die benötigten Informationen mitführen und zudem für Naturraumnutzungen außerhalb der Bundesrepublik Deutschland die Indikatoren zur Klassenbildung erst noch entwickelt werden müssen.

C.7 Stratosphärischer Ozonabbau

Tabelle A7: Potenzial zum stratosphärischen Ozonabbau durch Luftschadstoffe

Partikel PM10 und Vorläufersubstanzen	R11-Äquivalente in kg R11-Äq./kg
Halon 1211	7,9
Halon 1301	15,9
R11	1
R113	0,85
R114	0,58
R115	0,57
R12	0,82
R123	0,01
Trichlorethan	0,16
R141	0,12
R142	0,06
R22	0,04
Tetrachlorkohlenstoff	0,82
N_2O	0,017

Quellenverzeichnis zu Anhang B und C

- [CML 1992]: Environmental life cycle assessment of products, Guide and backgrounds, Center of Environmental Science (CML), Netherlands Organisation for Applied Scientific Research (TNO), Fuels and Raw Materials Bureau (B&G), Leiden, 1992
- [CML 2002]: Guinée, J.B. (Ed.) – Centre of Environmental Science – Leiden University (CML), de Bruijn, H., van Duin, R., Huijbregts, M., Lindeijer, E., Roorda, A., van der Ven, B., Weidema, B.: Handbook on Life Cycle Assessment. Operational Guide to the ISO Standards. Eco-Efficiency in Industry and Science Vol. 7. Kluwer Academic Publishers, Netherlands 2002.
- [CML 2010]: CML-IA database that contains characterisation factors for life cycle impact assessment (LCIA) for all baseline characterisation methods mentioned in [CML 2002]. Database CML-IA v3.7, Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden, November 2010; <http://www.cml.leiden.edu/software/data-cmlia.html>
- [Derwent et al. 1999]: Derwent, R., R. Friedl, I.L. Karol, V.W.J.H. Kirchhoff, T. Ogawa, M.J. Rossi, P. Wennberg, 1999: Impacts of aircraft emissions on atmospheric ozone. – In J.E.Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M.McFarland (Eds): Aviation and the Global Atmosphere. A Special Report of IPCC Working Groups I and III. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 27–64
- [Guinee 2008]: personal communication between Jeroen Guinée and Martina Krüger, January 2008.
- [Hauschild & Wenzel 1998]: Michael Hauschild & Henrik Wenzel, 1998: Environmental Assessment of Products, Volume 2: Scientific Background London, Chapman & Hall

- [Heijungs et al 1992]: Heijungs, R., J. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleeswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin, H.P. de Goede, 1992: Environmental Life Cycle Assessment of products. Guide and Backgrounds. Centre of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden.
- [Heldstab et al. 2003]: Heldstab, J. et al.: Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010. Environmental Documentation No.169. Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL. Bern, Switzerland, 2003.
- [Holcim 2010] Holcim (Schweiz) AG, Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton, Zürich, Dezember 2010
- [IFEU 2006]: Ökobilanzieller Vergleich von Getränkekartons und PET-Einwegflaschen, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, im Auftrag des Fachverband Kartonverpackungen (FKN), Heidelberg, 2006
- [IFEU 2008]: Characterisation factors for group emissions VOC, NMVOC for the impact category Summer Smog (POCP). Heidelberg, 2008. (unpublished)
- [Impact 2002+]: Olivier Jolliet, Manuele Margni, Raphaël Charles, Sébastien Humbert, Jérôme Payet, Gerald Rebitzer and Ralph Rosenbaum: IMPACT 2002+: A New Life Cycle Impact Assessment Methodology. Int J LCA 8 (6) 324 – 330 (2003)
- [IPCC 1995]: IPCC (Publisher): Intergovernmental panel on the climatic change. Climatic Change, Report to the United Nations 1996, New York (USA) 1995.
- [IPCC 2001]: Climate Change 2001 – Third Assessment Report. Cambridge UK, 2001
- [IPCC 2007]: IPCC Fourth Assessment Report – Contribution of Working Group I: Technical Summary 2007; 31.03.2008
- [Leeuw 2002]: Leeuw, F.D.: A set of emission indicators for long-range transboundary air pollution, Bilthoven 2002
- [Kim et al. 1997] Allocation for cascade recycling system; Kim et al., in Int. J. LCA 2 (4) 27-32 (1997)
- [Klöpffer & Renner 1995]: Methodik der Wirkungsbilanz im Rahmen von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorien, UBA-Texte 23/95, Berlin, 1995.
- [UBA 1995]: Umweltbundesamt (Publisher): Ökobilanz für Getränkeverpackungen. Datengrundlagen. Berlin, 1995. (UBA-Texte 52/95)
- [UBA 1998]: Umweltbundesamt Berlin (Publisher): Ökobilanz Graphischer Papiere. Berlin, 1998.
- [UBA 1999] Umweltbundesamt: Bewertung in Ökobilanzen. UBA-Texte 92/99, Berlin, 1999.

Anhang D: Fragebögen zu Umfragen



Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Am der Bormau 2
49090 Osnabrück



Fakultät Bauingenieurwesen
Braunegger Straße 55
D- 78462 Konstanz

Fragebogen zu RC-Beton im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Forschungsprojekts

Bei RC-Beton handelt es sich um Beton mit einem Anteil an genomter rezyklierter Gesteinskörnung aus Beton- und Mauerwerksabbruch. Durch RC-Beton werden u.a. Kiesvorkommen geschont und Mauerwerks- und Betonabbruch aus Rückbauarbeiten wieder in den Stoffkreislauf geführt, sodass Deponieflächen gespart werden können.

Aufgaben des Projekts sind u.a. die Erfassung weiterer technischer Daten z. B. zur Dauerhaftigkeit des RC-Betons im Vergleich zu Normalbeton und die Erhöhung des Bekanntheitsgrades des RC-Betons bei den Ausschreibenden und Ausführenden.

Ihre persönliche Einschätzung ist uns sehr wichtig. Wir würden uns sehr freuen, wenn Sie unser Forschungsprojekt mit der Beantwortung dieser Fragen unterstützen würden. Bitte kreuzen Sie in der pdf.-Datei die Kästen an (Mehrfache Kreuze sind möglich) und senden Sie ihre Antworten per e-Mail an twoll@htwg-konstanz.de - für Rückfragen gern auch telefonisch - vormittags unter Tel: 07531-206-289

1 Haben Sie schon mal von RC-Beton gehört?

Ja Nein

Wenn ja: In welchem Zusammenhang?

Bitte ankreuzen:

- Vortrag
- Zeitschrift
- Ausschreibung
- „Mundpropaganda“
- Sonstige:

Abb. 174: Fragebogen Architekten, Teil 1



2 Haben Sie bereits mit RC-Beton gearbeitet?

Ja Nein

Wenn ja: Auf welcher Baustelle bzw. bei welchem Objekt?

.....
.....
.....

Wenn nein: **Könnten Sie es sich vorstellen mit RC-Beton zu planen und zu bauen?**

Ja Nein

3 Wenn Sie bereits mit RC-Beton geplant und/oder gebaut haben:

Um RC-Beton mit welcher Betongüte handelte es sich:

C16/20 C20/25 C25/30 C30/37 weiß ich nicht mehr

4 Was wären Gründe für Sie, um mit RC-Beton zu planen und zu bauen und für wie wichtig halten Sie diese?

4.1 Ökologische Gründe

(Bitte ankreuzen und die Kästchen neben den angekreuzten Felder mit je einer der Ziffern 1 (sehr wichtig), 2 (wichtig) oder 3 (unwichtig) versehen.)

- Ressourcenschonung (Kiesabbau, Landschaftsflächenverbrauch)
- Verringerung von Treibhausgasen
- Vermeidung von Deponieflächen
- Hochwertige Wiederverwendung von Werkstoffen
- Eigene Gründe:

Abb. 175: Fragebogen Architekten, Teil 2



4.2 Monetäre Gründe

- Verwendung bei niedrigerem Beton-Preis
- Verwendung bei gleichem Beton-Preis
- Verwendung auch bei höherem Beton-Preis

4.3 Gründe gegen eine Verwendung von RC-Beton

- RC-Beton regional nicht verfügbar
- Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung
- Keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten
- Fehlende Informationen über Einsatzmöglichkeiten
- Zu wenig verfügbare Materialkennwerte (E-Modul, Festigkeit)
- Persönliche Gründe:.....

5 Hatten Sie bereits mit Bauherren zu tun, die RC-Beton angefragt haben?

Ja Nein

6 In welcher Region Baden-Württembergs sind Sie im Hochbau tätig:

Nord Süd Ost West

Ballungsraum Stuttgart

Ballungsraum Karlsruhe

Ggf. PLZ angeben:

Abb. 176: Fragebogen Architekten, Teil 3



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Am der Bormau 2
49090 Osnabrück



Fakultät Bauingenieurwesen
Braunegger Straße 55
D- 78462 Konstanz

7 Würde es Sie interessieren, im Rahmen einer Fortbildung der Architektenkammer mehr über RC-Beton zu erfahren?

Ja Nein

Vielen Dank, dass Sie sich Zeit genommen haben, die Fragen zu beantworten.



Fragebogen zum Thema RC-Beton

Sehr geehrte Damen und Herren,

Das Forschungsprojekt *"Untersuchung von Mauerwerksabbruch zur Verwendung im RC-Beton für den ressourcenschonenden Hochbau"* wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert.

Bei RC-Beton handelt es sich um Beton, der einen genormten Anteil an recycelter Gesteinskörnung aus Beton- und Mauerwerksabbruch enthält. Durch die Wiederverwendung der recycelten Gesteinskörnung können Ressourcen, hier vor allem Kiesvorkommen, geschont und Deponieflächen gespart werden.

Mit Ihrer Beantwortung des Fragebogens unterstützen Sie unser Forschungsprojekt und die Verbreitung des RC-Betons. Ihre persönliche Einschätzung ist uns sehr wichtig.

Füllen Sie bitte den nachfolgenden Fragebogen aus (Mehrfachnennungen sind möglich) und senden sie diesen per Mail an vanessa.milkner@htwg-konstanz.de.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Vanessa Milkner (B. Eng.)



1. Haben Sie schon mal von RC-Beton gehört?

Ja Nein

Wenn ja:

1.1 In welchem Zusammenhang?

- Vortrag
- Zeitschrift
- Ausschreibung
- "Mundpropaganda"
- Sonstige:

2. Haben Sie bereits mit RC-Beton gearbeitet?

Ja Nein

Wenn nein: Fahren Sie bei Frage 2.5 fort.

Wenn ja:

2.1 In welchem Bereich?

- Verkehrswegebau
- Konstruktiver Ingenieurbau
- Industrie- und Gewerbebau
- Wasserbau

2.2 Welche Betongüte(n) haben Sie verwendet?

C20/25 C25/30 C30/37 C35/45 Andere:

Abb. 179: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 2



2.3 Wie sind Ihre Erfahrungen mit RC-Beton?

- Es gab keine Komplikationen
- Es gab Komplikationen, aufgrund...
 - einer zu geringen Anzahl an Bietern
 - zu langer Transportwege
 - mangelhafter Güte
 - der Aufstellung und Prüfung der Standsicherheitsnachweise
 - Bedenken beim Bauherrn
 - Bedenken bei den ausführenden Firmen

2.4 Würden Sie RC-Beton wiederverwenden?

- Ja Nein

Wenn Frage 2. mit nein beantwortet wurde:

2.5 Könnten Sie sich vorstellen mit RC-Beton zu planen bzw. zu bauen?

- Ja, ohne Vorbehalte
- Ja, aber mit Vorbehalten
- Nein, weil ich nicht weiß worauf ich mich einlasse
- Nein, weil ich kein Vertrauen in RC-Beton habe



Gründe für oder gegen die Verwendung von RC-Beton:

3.1 Würden Sie aus monetärer Sicht mit RC-Beton planen bzw. bauen?

(Bitte ankreuzen und in den Kästchen daneben Ihre Wertung 1 (sehr wichtig), 2 (wichtig), 3 (unwichtig) eintragen)

- 1 nur, wenn der Preis für RC-Beton niedriger ist
- 1 auch, wenn der Preis für RC-Beton gleich ist
- 1 auch wenn der Preis für RC-Beton höher ist, bis zu %

3.2 Was sind Gründe gegen eine Verwendung von RC-Beton?

- 1 RC-Beton regional nicht verfügbar
- 1 Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung
- 1 Keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten
- 1 Fehlende Informationen über Einsatzmöglichkeiten
- 1 Zu wenig verfügbare Materialkennwerte (E-Modul, Festigkeit)
- 1 Andere Gründe:

4. Würden Sie einen erheblichen Mehraufwand in der statischen Berechnung sehen, wenn Sie RC-Beton verwenden würden?

- Ja Nein

Wenn ja: Worin bestände dieser?

Abb. 181: Fragebogen Tragwerksplaner, Teil 4



5. Welche Kennwerte benötigen Sie für die statische Berechnung mit RC-Beton (über die Normkennwerte wie die Druckfestigkeit hinausgehend)?

6. Worin sehen Sie Vor- bzw. Nachteile in der Verwendung von RC-Beton?

Vorteile:

Nachteile:

7. Hatten Sie bereits mit Bauherren zu tun, die speziell RC-Beton nachgefragt haben?

Ja Nein

8. Würde es Sie interessieren, im Rahmen einer Fortbildung der Ingenieurkammer mehr über RC-Beton zu erfahren?

Ja Nein

Vielen Dank dafür, dass Sie sich die Zeit genommen haben diesen Fragebogen auszufüllen!



Fragebogen zum Thema RC-Beton in Betonwaren und Betonfertigteilen

Sehr geehrte Damen und Herren,

die Entwicklung und Einführung eines ressourcenschonenden Transportbetons (R-Beton) ist eine Erfolgsgeschichte aus Baden-Württemberg. Nun sollen Konzepte zur Übertragung dieser Erfolge auf die Herstellung von Betonwaren und Betonfertigteile erarbeitet werden.

Bei RC-Beton handelt es sich um Beton, der einen genormten Anteil an recycelter Gesteinskörnung aus Beton- und Mauerwerksabbruch enthält. Durch die Wiederverwendung der recycelten Gesteinskörnung können Ressourcen, hier vor allem Kiesvorkommen, geschont und Deponieflächen gespart werden.

Mit Ihrer Beantwortung des Fragebogens unterstützen Sie unsere Konzeptstudie und die Verbreitung des RC-Betons. Ihre persönliche Einschätzung ist uns sehr wichtig.

Das Projekt wird vom Fachverband Beton- und Fertigteilwerke Baden-Württemberg e.V. partnerschaftlich begleitet.

Füllen Sie bitte den nachfolgenden Fragebogen aus (Mehrfachnennungen sind möglich) und senden sie diesen per Mail an vanessa.milkner@htwg-konstanz.de.

Vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Vanessa Milkner, B. Eng.



1. Haben Sie schon mal von RC-Beton gehört?

Ja Nein

Wenn ja: In welchem Zusammenhang?

- Vortrag
- Zeitschrift
- Ausschreibung
- "Mundpropaganda"
- Sonstige:

2. Was wären Gründe für Sie, um mit RC-Beton Betonwaren bzw. Betonfertigteile herzustellen?

2.1 Ökologische Gründe

(Bitte ankreuzen und in den Kästchen daneben Ihre Wertung 1 (sehr wichtig), 2 (wichtig), 3 (unwichtig) eintragen)

- 1 Ressourcenschonung (Kiesabbau, Landschaftsflächenverbrauch)
- 1 Verringerung von Treibhausgasen
- 1 Vermeidung von Deponieflächen
- 1 Hochwertige Wiederverwendung von Werkstoffen
- 1 Andere Gründe:

Abb. 184: Fragebogen Betonfertigteilerhersteller, Teil 2



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



HOCHSCHULE
KONSTANZ
TECHNIK, WIRTSCHAFT
UND GESTALTUNG

2.2 Monetäre Gründe

- 1 Verwendung nur bei niedrigerem Betonpreis
- 1 Verwendung auch bei gleichem Betonpreis

2.3 Gründe gegen eine Verwendung von RC-Beton

- 1 RC-Beton regional nicht verfügbar
- 1 Bedenken bzgl. Qualität und Erfahrung
- 1 Keine Bereitschaft zur Übernahme von Mehrkosten
- 1 Fehlende Informationen über Einsatzmöglichkeiten
- 1 Zu wenig verfügbare Materialkennwerte (E-Modul, Festigkeit)
- 1 Andere Gründe:

3. Worin sehen Sie Vor- bzw. Nachteile in der Verwendung von RC-Beton?

Vorteile:

Nachteile:

4. Hatten Sie bereits Anfragen zu Betonwaren bzw. -fertigteilen mit RC-Beton?

Ja Nein

Vielen Dank dafür, dass Sie sich die Zeit genommen haben diesen Fragebogen auszufüllen!

Seite 3 von 3

Abb. 185: Fragebogen Betonfertigteilhersteller, Teil 3

Anhang E: Beispiele Ausschreibungen

Ortbeton Deckenpl. Stahlbeton C30/37 Decken-D 30-35cm, Recyclingbeton

Ortbeton Deckenplatte, als Stahlbeton, Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bis max. C 30/37 DIN EN 206-1, DIN 1045-2,
Gesteinskörnung Typ 1, DIN EN 12620, DAfStb-Richtlinie
„Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“,
Bauregelliste B Teil 1 Anlage 1/1.3, Umweltverträglichkeit der Gesteinskörnung (abZ oder Nachweise für ZiE),
Expositionsklasse Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung XC3, in feuchter Umgebung WF, Deckendicke über 30 bis 35cm.

Abb. 186: Auszug aus der Ausschreibung zum Praktikums- und Laborgebäude Pegasus der Universität Stuttgart-Vaihingen.

StLB-Bau in der Fassung Oktober 2015

Ortbeton Deckenplatte, obere Betonfläche waagrecht, als Stahlbeton,
Normalbeton C 30/37 DIN EN 206, DIN 1045-2, als RC-Baustoff
zugelassen, Deckendicke 30 bis 35 cm.

Abb. 187: Auszug aus dem StLB-Bau zum Praktikums- und Laborgebäude Pegasus der Universität Stuttgart-Vaihingen.

Quelle zu Abb. 186 und Abb. 187:

Hörsch, T.: Einsatz von R-Beton in Bauvorhaben des Landes. Optimierung der Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft: R-Beton hilft Stoffkreisläufe schließen, Stuttgart, Januar 2016.

Der Einsatz von RC-Beton in den folgenden Bauteilen kann aus Sicht des Planers durchaus als Neuland betrachtet werden:

Pfahlgründung

Die Anforderungen an den Beton der Pfähle bezüglich Festigkeit und Expositionsklasse betragen C25/30, XA1, XC 2. Diese Eigenschaften lassen sich auch mit einem RC-Beton realisieren. Die Pfähle sind vornehmlich auf Biegung und Normalkräfte beansprucht. Unserer Kenntnis nach wäre dies die erste Pfahlgründung mit RC-Beton in Baden-Württemberg.

Decken

Decke über Untergeschoss

Diese Decke wird als Flachdecke aus Beton C30/37, XC 1 ausgeführt. Sie weist in Teilbereichen Spannweiten bis zu 10 m auf und besitzt dort zusätzlich eine hohe Anzahl an Deckendurchbrüchen, was einerseits die Bemessung und andererseits die konstruktive Ausbildung deutlich verkompliziert. Aufgrund der großen Spannweite sind Untersuchungen der Deckenverformungen erforderlich. Bei Ausführung dieser Decke in RC-Beton ist auf eine sorgfältige Auswahl des Zuschlags zu achten sowie eine Überprüfung des tatsächlichen E-Moduls des eingebauten RC-Beton durch entsprechende Betonversuche erforderlich. Dies bedeutet ebenfalls betreten von Neuland.

Decken über Erdgeschoss und Obergeschosse

Die Decken der Obergeschosse bestehen aus C30/37, XC 1. Die Flachdecken haben eine Dicke von nur 24 cm. Sie kragen im Innenhof an der Ost- bzw. Westseite bis zu 3,0 m weit aus. Hierzu werden aufwändige Rechenmethoden unter Berücksichtigung des gerissenen Betons (Zustand II) sowie von Kriechen und Schwinden (Langzeitverhaltens) geführt. Zur Bestätigung des für die Deckenverformung wichtigen E-Moduls empfehlen wir, Betonversuche an Probekörpern durchzuführen, die bereits bei der Erstellung der Untergeschosswände gewonnen werden können.

Treppenläufe

Die Treppenläufe in den Treppenhäusern werden als Stahlbeton-Fertigteile und in Sichtbeton C30/37, XC1 ausgeführt. Auch hier wäre die Ausführung in RC-Beton neu, da dieser bei Fertigteilen nach unserem Kenntnisstand aufgrund der hohen Anforderung an die Sichtbetonflächen bisher noch nicht verwendet wurde.

Abb. 188: Auszug aus Ausführungen der Tragwerksplanung der Fa. Werner Sobek GmbH zur Erweiterung des Landratsamts Ludwigsburg.

Mehr / Minderpreis Recycling Beton

ZZ:001.1

Mehr- / Minderpreis für die Ausführung der Vorpositionen Ort beton Wände / Decken / Unterzüge / Bohrpfahlgründung für alle Bereiche bis OK Decke über UG außer in den Treppenträumen statt mit neuen Zuschlagstoffen mit Beton nach DIN EN 1992, DIN EN 206-1, DIN 1045-2, unter Verwendung von Zuschlagstoffen aus rezyklierten Gesteinskörnungen, DIN EN 12620, DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Bauregelliste B Teil 1 Anlage 1/1.3.

Abb. 189: Wahlposition im LV zur Erweiterung des Landratsamts Ludwigsburg.

Quelle zu Abb. 188 und Abb. 189:

Braunmiller: Objekterfahrung aus der Sicht des Bauherrn. Neues Bauen - eine Chance zur Abfallvermeidung in der Bauwirtschaft - mit geschlossenen Stoffkreisläufen nachhaltig bauen, Ludwigsburg, Februar 2017.

Recycling Beton bis C25/30

Vorbemerkung Recycling Beton

Der Neubau Technisches Rathaus Tübingen soll als Recycling Betongebäude ausgeführt werden.

Alle Ortbeton Elemente bis Qualität C25/30 sind aus Recycling Beton herzustellen.

Herstellung Transportbeton durch Zertifizierte Unternehmen.

möglicher Ansprechpartner für RC Beton im Raum Tübingen:

- Wenzelburger Transportbetonwerk GmbH & Co. KG
Schillerstrasse 26
72666 Neckartailfingen

- Heinrich Feeß GmbH & Co. KG
Heinkelstr. 2
73230 Kirchheim/Teck

Recycling Beton

als Zulage zu Betonierarbeiten für alle Bauteilelemente, liefern und einbauen von Recyclingbeton nach DIN 12620/DAfStb-Richtlinie. Einbau alle Querschnitte und Abmessungen.

Ausführung: Gründungen, Bodenplatte, Keller Außenwand, Decken, Stützen, Unter- und Überzüge, Innen- und Außenwände, Brüstungen, Attika

Alle Mehraufwendungen wie Transportkosten, Bereitstellung von RC Material, Vorhalten von Silos und Materialprüfungen sind in dieser Position mit einzukalkulieren.

Die entsprechenden RC-Beton Materialprüfungen sind entsprechend den Vorschriften baubegleitend zu erbringen.

1068,5 m³

03.06.08 Recycling Beton bis C25/30

Abb. 190: Auszug aus dem LV des Technischen Rathauses Tübingen.

Quelle zu Abb. 190:

Fritz, W.: Technisches Rathaus Tübingen, E-Mail, September 2016.

Tab. 38: Übersicht zu Expositionsclassen

Betontyp	Verwendung für		Zementgehalt [kg/m ³] ¹⁾	Zementart
	Betonsorten gemäss NPK	Expositionsklasse(n) / Anwendungsbereich(e)		
0	Sorte 0	X0	150	CEM II/A
0	Sorte 0	X0	150	CEM II/B
Magerbeton I	keine Definition	keine Anforderung	150	CEM II/A
Magerbeton II	keine Definition	keine Anforderung	150	CEM II/B
Hochbaubeton I	NPK A, NPK B, NPK C	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XD1	300	CEM II/A
Hochbaubeton II	NPK A, NPK B, NPK C	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XD1	300	CEM II/B
Tiefbaubeton I	NPK C, NPK D, NPK E, NPK F, NPK G	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XF2, XF3, XF4, XD1, XD2a, XD2b, XD3, XA1, XA2, XA3	320	CEM I
Tiefbaubeton II	NPK C, NPK D, NPK E, NPK F, NPK G	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XF2, XF3, XF4, XD1, XD2a, XD2b, XD3, XA1, XA2, XA3	320	CEM II/A
Tiefbaubeton III	NPK C, NPK D, NPK E, NPK F, NPK G	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XF2, XF3, XF4, XD1, XD2a, XD2b, XD3, XA1, XA2, XA3	320	CEM II/B
Bohrpfahlbeton I	NPK H, NPK I, NPK K, NPK L	P1, P2, P3, P4	380	CEM I
Bohrpfahlbeton II	NPK H, NPK I, NPK K, NPK L	P1, P2, P3, P4	380	CEM II/A
Bohrpfahlbeton III	NPK H, NPK I, NPK K, NPK L	P1, P2, P3, P4	380	CEM II/B
1) Zementgehalt = Mindestzementgehalt gemäss SN EN 206-1				
Betontyp	Verwendung für		Zementgehalt [kg/m ³] ¹⁾	Zementart
	Betonsorten gemäss NPK	Expositionsklasse(n) / Anwendungsbereich(e)		
0	Sorte 0	X0	150	CEM II/A, CEM II/B
Magerbeton	keine Definition	keine Anforderung	150	CEM II/A, CEM II/B
Hochbaubeton	NPK A, NPK B, NPK C	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XD1	300	CEM II/A, CEM II/B
Tiefbaubeton	NPK C, NPK D, NPK E, NPK F, NPK G	XC1, XC2, XC3, XC4, XF1, XF2, XF3, XF4, XD1, XD2a, XD2b, XD3, XA1, XA2, XA3	320	CEM I, CEM II/A, CEM II/B
Bohrpfahlbeton I	NPK H, NPK I, NPK K, NPK L	P1, P2, P3, P4	380	CEM I, CEM II/A, CEM II/B

Tab. 39: Projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit der Projektbeteiligten im Jahr 2016

Veranstaltung	Ort / Zeitschrift	Datum	Teilnehmer	Titel	Art
Veröffentlichung	Wissenschaftliche Hochschulzeitschrift HTWG Forum	2016	Prof. Dr. Sylvia Stürmer	Hochwertiger Beton mit recycelten Gesteinskörnungen	Fachartikel
Veröffentlichung	Elsevier	Eingereicht	Steffen Liebezeit, Anette Müller, Barbara Leydolph und Ulrich Palzer	Microwave-Induced Interfacial Failure to Enable Debonding of Composite Materials for Recycling	Fachartikel
3. Fachsymposium des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg	Stuttgart	20.01.2016	Prof. Dr. Sylvia Stürmer, Prof. Dr. Anette Müller	Einsatz von Mauerwerkbruch als rezyklierte Gesteinskörnung im Beton - ein DBU-Forschungsprojekt	Tagungsband + Vortrag
01./02. März 2016 Baustoff Recycling Forum / 3. bvse-Mineraliktag	München	01.03.2016	Prof. Dr. Anette Müller	Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch. Reduktion des Sulfatgehaltes	Vortrag
IFF-Baustoffforum	Weimar	03.03.2016	Prof. Dr. Anette Müller	Recyclingstrategien – ein Ausblick	Vortrag
Manuskriptband für die Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte und Abfälle	Berlin	01.06.2016	Steffen Liebezeit, Anette Müller, Barbara Leydolph und Ulrich Palzer	Mikrowelleninduziertes Grenzflächenversagen zur Trennung von Materialverbunden	Tagungsband + Vortrag Liebezeit
17. Dialog Abfallwirtschaft MV	Rostock	15.06.2016	Prof. Dr. Anette Müller	Ziegelrecycling	Tagungsband + Vortrag
22. Internationale Sommerakademie Jahr »Eins« nach Paris – Klimaschutz im urbanen Raum; Veranstalter DBU	Ostritz-St. Marienthal	20. bis 22. Juni 2016	Prof. Dr. Anette Müller	Ressourcen- und klimaschonendes Bauen: übereinstimmende oder widersprüchliche Ziele?	Vortrag
Recycling 2016 Weimar	Weimar	Sept. 2016	Prof. Dr. Anette Müller	Recyclingtechnologien – Rückblick und Ausblick	Vortrag
RKW Informationen Bau-Rationalisierung	Eschborn	Dez. 2016	Prof. Dr. Anette Müller	Ressourceneffizienz am Bau - Potentiale des Baustoffrecyclings	Interview

Tab. 40: Projektbezogene Öffentlichkeitsarbeit der Projektbeteiligten im Jahr 2017

Veranstaltung	Ort	Datum	Teilnehmer	Titel	Art
4. Fachkongress des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg	Stuttgart	08.02.2017	Prof. Dr. Sylvia Stürmer	R-Beton auch in Betonwaren und -fertigteilen?	Vortrag
61. Ulmer Betontage	Ulm	15.02.2017	Prof. Dr. Sylvia Stürmer, Mirko Landmann, Prof. Dr. Anette Müller	Untersuchungen zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 2 - Ergebnisse und Anwendungsbeispiele	Vortrag, Kurzbeitrag im Tagungsband
IFF-Baustoffforum	Weimar	02.03.2017	Prof. Dr. Anette Müller	Leichtbeton-Recycling: Wertstoff der Zukunft	Vortrag
1. Norddeutsches Fachsymposium Recycling-Baustoffe	Kiel	29.03.2017	Prof. Dr. Anette Müller	Ziegelrecycling	Tagungsband + Vortrag
Veröffentlichung	HTWG Nachrichten, Seehas Magazin	19.04.2017	Prof. Dr. Sylvia Stürmer	Beton - gebaut für die Ewigkeit?	Fachartikel
Schüttgut & Recycling-Technik (Messe)	Dortmund	11.05.2017	Prof. Dr. Anette Müller	Massenstromsortierung versus Einzelkornsortierung – ein Überblick	Vortrag
Schüttgut & Recycling-Technik (Messe)	Dortmund	11.05.2017	Christoph Kulle	Mauerwerkbruch als rezyklierte Gesteinskörnung in Beton – technische Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten im Hochbau	Vortrag
HISER International Conference TU Delft	Delft	21, 22 & 23 June 2017	Prof. Dr. Anette Müller	The Manufacture of Lightweight Aggregates from Recycled Masonry Rubble	Tagungsband + Vortrag
Veröffentlichung	Process - Chemie, Pharma, Verfahrenstechnik	05.07.2017	Prof. Dr. Sylvia Stürmer	Forschungsprojekt: Recycling von Baustoffen - Ressourceneinsparung mit Recyclingbeton	Fachartikel
Veröffentlichung	AT Processing	Eingereicht	Annett Lipowsky, Anette Müller, Barbara Leydolph, Ulrich Palzer	Feinpartikuläre mineralische Anfallstoffe als Additive für Beton	Fachartikel
Fachsymposium Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen	TU Kaiserslautern	20.09.2017	Prof. Dr. Anette Müller, Prof. Dr. Sylvia Stürmer	Aufbereitungstechnik - Status Quo und Zukunft	Vortrag

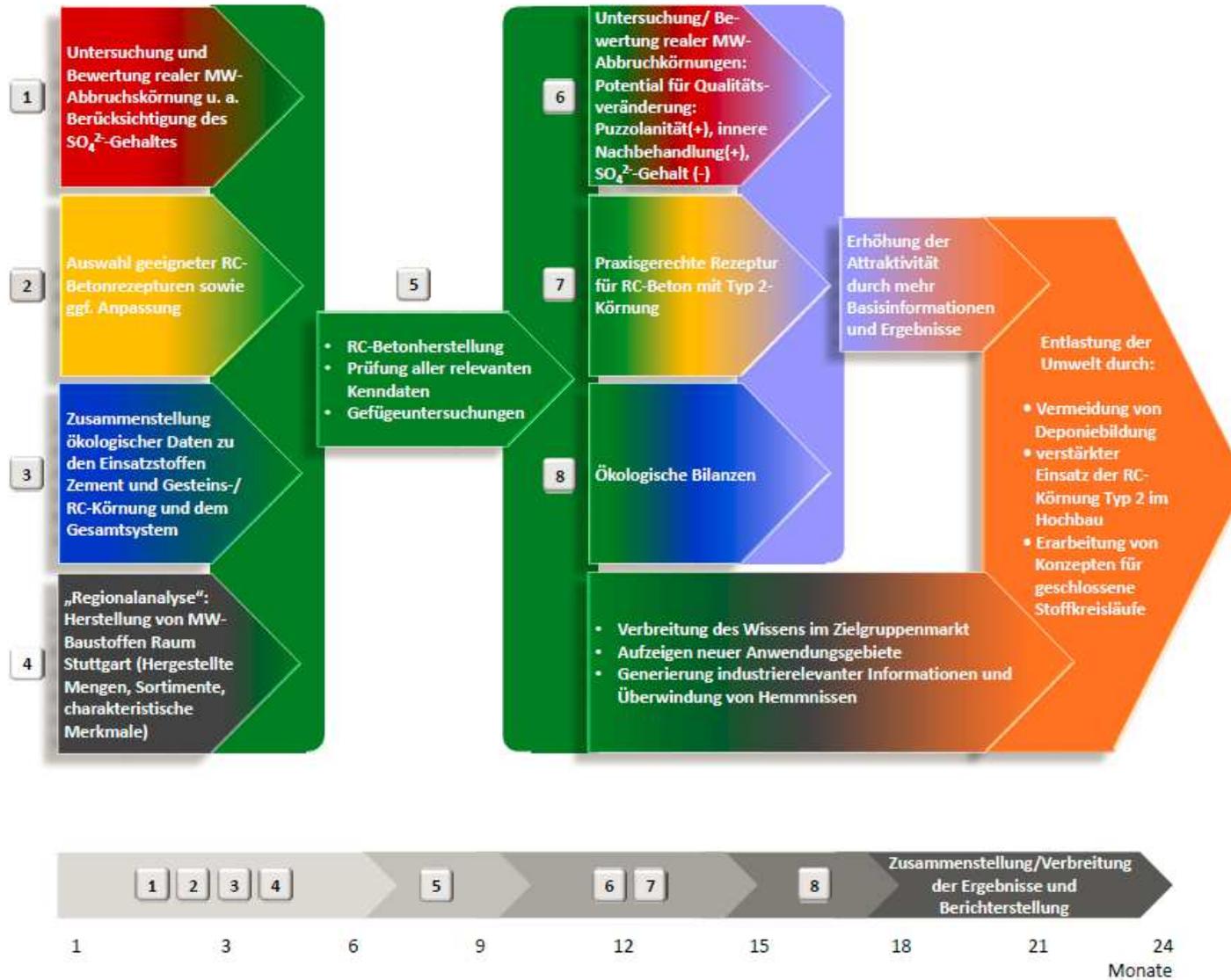


Abb. 191: Sankey Diagramm