

Entwicklung eines Verfahrens zur Wiederverwertung von Hochbaurestmassen als Zuschlag in zementgebundenen Systemen der Betonsteinproduktion

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) Osnabrück
Az: 09452



IWT Bremen



Manzke GmbH



RWB Bremen

Entwicklung eines Verfahrens zur Wiederverwertung von Hochbaurestmassen als Zuschlag in zementgebundenen Systemen der Betonsteinproduktion	1
1. Einleitung	3
1.1. Grundlagen.....	4
1.2. Problemstellung.....	8
1.3. Stand der Technik, Ausgangspunkt des Vorhabens	10
1.4. Abweichung vom Projektplan	13
1.5. Abgrenzung zu anderen Projekten	16
2. Untersuchung der einzelnen Recyclingzuschläge	19
2.1. Technologische Kennwerte.....	19
2.2. Mikroskopische Beschreibung	22
2.2.1. Präparation und Methodik	22
2.2.2. Lichtmikroskopische Untersuchungen	22
2.2.3. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen	26
2.2.3.1. Betonbruch/Natursandfraktion.....	26
2.2.3.2. Betonbruch/Matrixfraktion	27
2.2.3.3. Porenbetonbruch	28
2.2.3.4. Ziegelbruch	29
3. Serie I: Versuche mit reinen Recyclingzuschlägen	30
3.1. Technologische Kennwerte.....	30
3.1.1. Festbetonprüfungen	30
3.1.2. Sieblinie in Abhängigkeit von der Mischdauer (HCl-Aufschlüsse).....	34
3.2. Mikroskopische Untersuchungen.....	36
3.2.1. Kryo-mikroskopische Untersuchungen am Frischbeton	36
3.2.2. Gefügebeurteilung der Neumatrix an Festbeton	43
3.2.3. Einfluß der Vornässung und Mischzeiten bei unterschiedlichem Ziegelmaterial	48
3.2.4. Effekt der CO ₂ -Nachbehandlung	53
3.3. Zwischenbilanz für die weiteren Serien.....	54
4. Serie II: Versuche mit gemischten Recyclingzuschlägen	56
4.1. Technologische Kennwerte.....	56
4.1.1. Variation Betonbruch/Ziegelbruch	56
Mischzeit 2 min	57

Mischzeit 5 min	57
4.1.2. Kontrolle Handeinfüllung/Maschineneinfüllung	58
4.2. Mikroskopische Untersuchungen.....	58
4.3. Zwischenbilanz für die weiteren Serien.....	61
5. Serie III: Gezielte Zusätze	62
5.1. Technologische Kennwerte.....	62
5.1.1. Zusatz von Flugasche	62
5.1.2. Zusatz von Kalkstein- und Hüttenmehl	64
5.1.3. Austausch Natursand durch Hüttensand.....	65
5.1.4. Zusatz von Microsilica	66
5.2. Zwischenbilanz für die optimierte Rezeptur	66
6. Optimierte Rezeptur.....	67
6.1. Technologische Kennwerte.....	67
6.2. Mikroskopische Beschreibung	68
6.3. Probeflächen	70
7. Zusammenfassung und Ausblick	70
8. Projektrelevante Literatur.....	75

1. Einleitung

Der Einsatz insbesondere poröser Recycling-Zuschläge in zementgebundenen Systemen erfordert für eine Optimierung der Qualitätseigenschaften des Betons die grundlegende Kenntnis über die festigkeitsbestimmenden Vorgänge während des Erstarrungs- und Erhärtungsprozesses. Speziell in Betonen erdfeuchter Konsistenz (Betonsteine) werden diese im Grenzbereich Zuschlag / Zementmatrix in mikrokristallinen Größenordnungen ablaufenden Reaktionen noch nicht vollständig verstanden. Neben der Korneigenfestigkeit hat die Porosität der Zuschläge aus Baurestmassen über das veränderliche Wasser-Saugverhalten und die Optionen des Vornässens großen Einfluß auf die Festigkeit des Betons.

Die Ausbildung der Grenzfläche Zuschlag / Zementmatrix muß in Betonen erdfeuchter Konsistenz besondere Beachtung finden, da es hier aufgrund unzureichender Kontakte des Zuschlags mit dem hochviskosen Zementleim zu Festigkeitseinbußen kommen kann. Mit den Methoden der Licht- und Elektronenmikroskopie, insbesondere durch den Einsatz der Kryopräparation sollen die Stadien des Aushärtens des Zementes insbesondere an der Grenzfläche zum porösen Zuschlagkorn untersucht werden. Auch die Wirkungsweise oberflächenaktiver Zusatzmittel (z.B. Fließmittel) kann derart verstanden werden.

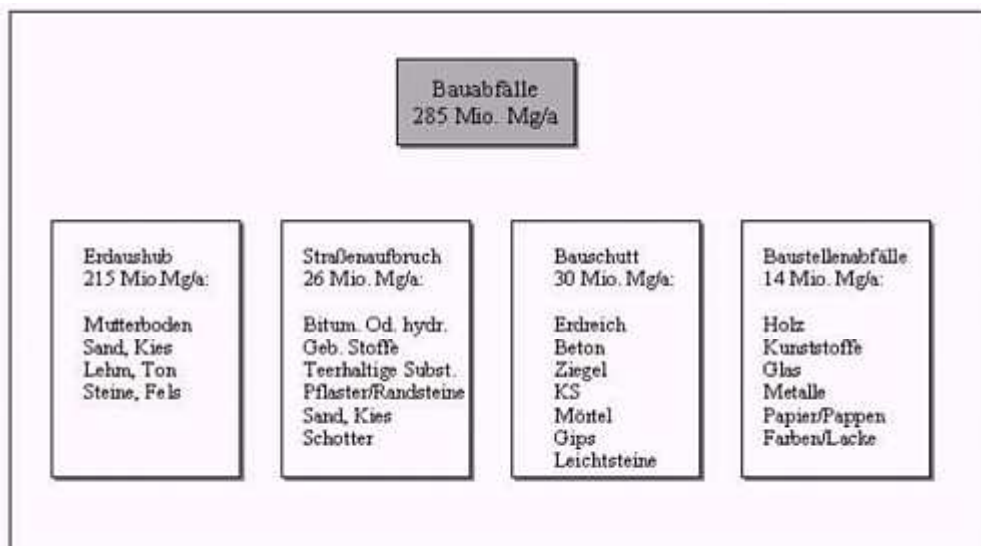
Unter Einbezug der gewonnenen Erkenntnisse zu den Vorgängen beim Abbinden und Erhärten von Zement mit porösen Zuschlägen erfolgen die Entwicklung und Optimierung von Verfahren unter größtmöglicher Verwendung von Hochbaurestmassen für einen hochwertigen Einsatz in neuen, unbewehrten Baustoffen auf Zementbasis erdfeuchter Konsistenz (Betonsteine). Hierbei werden Grenzwertmengen zum Einsatz von "festigkeitsmindernden" Komponenten wie Kalksandstein und Porenbeton ermittelt. Die Prüfkörper werden zunächst den betontechnologischen Norm-Prüfungen wie Druckfestigkeit, Rohdichte, etc. unterzogen. Hierbei werden nicht die in der Pflastersteinnorm 18501(1982) [1] geforderten 60 N/mm^2 Druckfestigkeit als Auswahlkriterium herangezogen, sondern es wird ein Mittelwert von 45 N/mm^2 als für den anwendungsspezifischen Einsatz als ausreichend erachtet. Ausgewählte Serien von Prüfkörpern, die ein charakteristisches Verhalten zeigen, werden mit Hilfe mikroskopischer Methoden auf ihre kleinräumigen Eigenschaften hin untersucht.

Ein Einsatz von geeigneten Betonsteinen auf einer Versuchsfläche ist vorgesehen.

Mit der Zielsetzung, die problematischen Hochbaurestmassen, z.B. in Betonsteinen, auf hohem technischen Niveau zu verwerten, wird ein wissenschaftlich nicht bearbeitetes Gebiet betreten, so daß neue betontechnologische Erkenntnisse zu erwarten sind. Es ist ein erster Schritt, durch den hochwertigen Einsatz von Bauschutt neue Absatzmöglichkeiten zu erschließen.

1.1. Grundlagen

Der behutsame Umgang mit natürlichen Ressourcen und die Schonung des in Deutschland knappen Deponieraums macht seit mehreren Jahrzehnten die weitgehende Abfallverwertung zu einer zentralen Aufgabe unserer Gesellschaft. In diesem Sinne wurde auch das Kreislaufwirtschafts-/Abfallgesetz [2] im Herbst 1996 eingeführt, welches in seinen Grundsätzen jedoch nur die bereits in früheren Abfallgesetzgebungen formulierten Grundgedanken fortführt. Danach sind Abfälle in erster Linie zu vermeiden oder, wenn dies nicht möglich ist, schadlos zu verwerten. Erst wenn Vermeidung und Verwertung nicht leistbar oder wirtschaftlich zumutbar sind, sind Abfälle zu beseitigen. Das Verwertungsgebot trifft in einem erheblichen Maße auf die Bauabfälle zu, welche mit einer Menge von ca. 220 – 280 Mio. Tonnen/Jahr bei einer Gesamtmenge an Abfällen von ca. 400 Mio. Tonnen/Jahr in Deutschland den größten Anteil ausmachen. Die Tonnage-Angaben sind seit mehreren Jahren uneinheitlich: So entstammen die genannten 220 Mio. Tonnen einer Bundesstatistik; die Verbände des Baustoffrecyclings schätzen dagegen den Anteil auf ca. 280 Mio. Tonnen. Die Unterschiede haben ihre Ursache in der Tatsache, dass eine Vielzahl von Bauabfällen insbesondere in den 80er und Anfang der 90er Jahre statistisch nicht erfasst wurden oder nicht erfasst werden konnten. Die Bauabfälle lassen sich nach allgemein akzeptiertem Sprachgebrauch in folgende Bereiche einteilen [3]:



Den größten Teil beansprucht der Erdaushub; Bauschutt hat einen Anteil von 11 %, Straßenaufbruch von 9 % und Baumischabfälle (auch Baustellenabfälle genannt) einen Anteil von ca. 5 %. Auf die spezielle Verwertungssituation des Erdaushubs („Bodenbörsen“) soll hier nicht näher eingegangen. Auch die nur unter erheblichem Aufwand („Handsortierungen“) zu verwertenden Baumischabfälle sollen hier lediglich der Vollständigkeit halber erwähnt

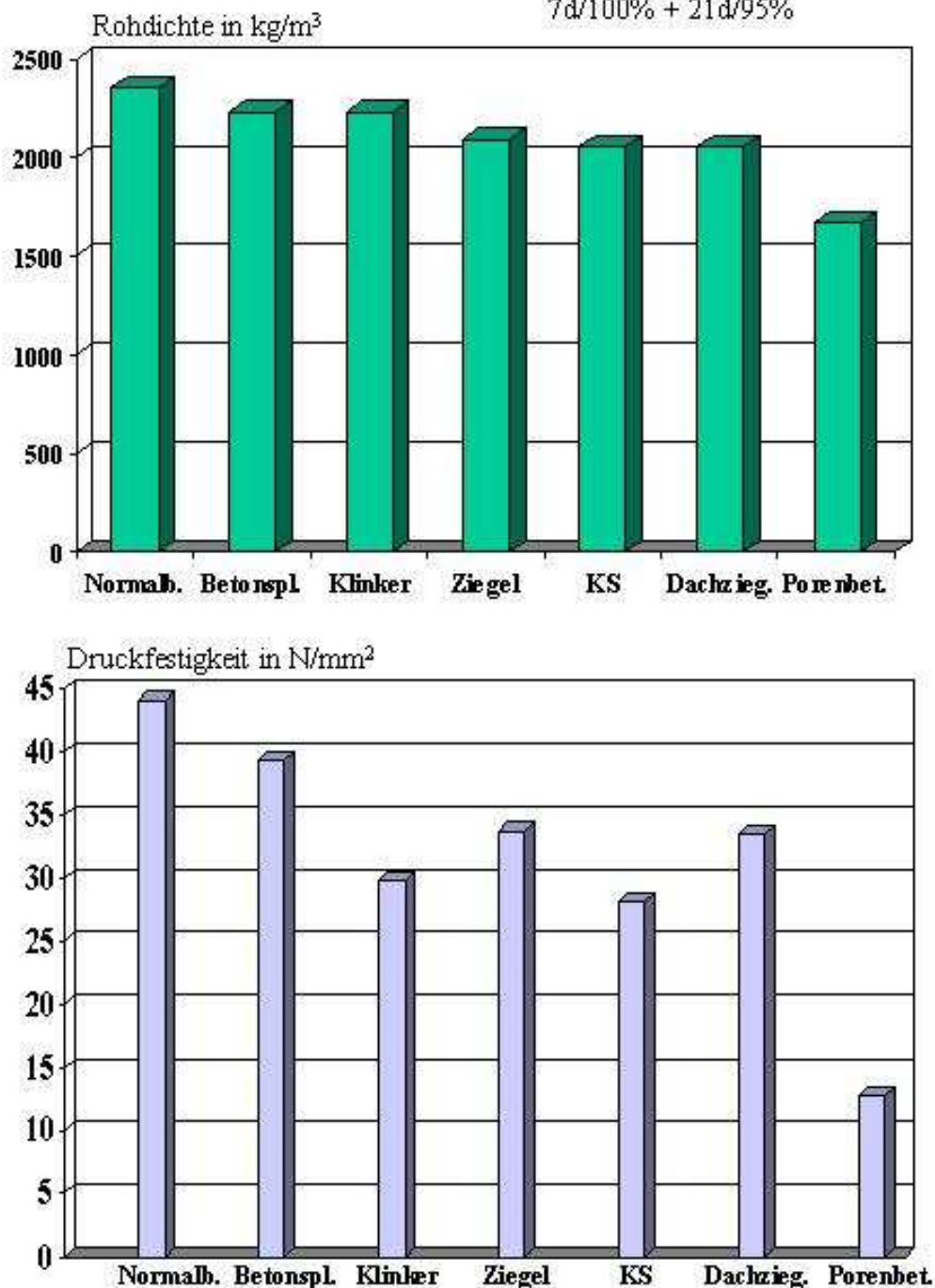
werden. Die Verwertungsquoten für Straßenaufbruch und Bauschutt sind ebenfalls sehr unterschiedlich: Während für Straßenaufbruch seit mehreren Jahren Verwertungsquoten von über 90% realisiert wurden, lagen die Quoten für Bauschutt in der Vergangenheit unter 60%. Nach neuesten Erhebungen insbesondere des KWTB (Kreislaufwirtschaftsträger Bau, Selbstverpflichtungsorganisation der Bauwirtschaft zur Verwertung von Bauabfällen) liegt diese Quote jetzt bei ca. 70% [4]. Die Verwertung von Bauschutt, die für das vorliegende Forschungsprojekt von zentraler Bedeutung ist, vollzieht sich in der Praxis auf technisch sehr unterschiedlichem Niveau. Eine Verwertung im Straßen- und Wegebau, bzw. zur Verfüllung bei Tiefbaumaßnahmen oder die Aufschüttung in z.B. Lärmschutzwällen sind heute noch immer die Regel. Der Grundsatz, wonach unter einem tatsächlichen Recycling das Schließen von Stoffkreisläufen zu verstehen ist, wird nur in Ausnahmefällen praktiziert. Geschlossene Stoffkreisläufe würden implizieren, dass Baumaterialien aus dem Hochbau wiederum für Hochbaustoffe, Straßenbaustoffe im Straßenbau eingesetzt werden. Die unterschiedlichen Verwertungsquoten und –möglichkeiten von Straßenaufbruch und Bauschutt haben ihre Ursache in der Zusammensetzung dieser Stoffe. Im Straßenaufbruch hat man es meist mit einem relativ homogenen Material in großer Menge zu tun; die Homogenität erleichtert die Verwertung und begünstigt den Wiedereinbau als Straßenbaustoff. Anders beim Bauschutt, insbesondere aus Hochbauabbruchmaßnahmen: Eine weitgehende Stofftrennung an der Baustelle findet in der Praxis aus Kosten- und häufig auch aus Zeit- und Platzgründen nicht statt. Es wird in der Regel versucht, nicht-mineralische Bestandteile wie Kunststoffenster, Metalle, Holz etc. auszusortieren. Auch eine Trennung von Beton- oder größerformatigen Betonteilen wird vorgenommen. Eine weitere Differenzierung der anorganischen mineralischen Bauschutt-Bestandteile wie Mörtel, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Naturstein etc. findet jedoch im allgemeinen nicht statt. Der dazu notwendige kontrollierte Rückbau ist leider bis heute eine Fiktion. Eine analoge Situation findet sich bei den stationären Baustoffrecycling-Anlagen: Meist werden dort nur zwei Sorten angeboten: relativ reiner Betonbruch und gemischter Mauerwerksbruch. Eine weitergehende Sortierung ist ausgesprochen selten und wenig rentabel. Im vorliegenden Projekt musste es als ein besonderer „Glücksfall“ erscheinen, dass bei der Fa. Manzke, einem der Projektpartner im hier diskutierten Vorhaben, eine Sortensortierung nach Ziegel-/Beton-/Kalksandstein- und Porenbeton-Bruch vorgenommen wird. Hierdurch ergab sich der für das Projekt glückliche Umstand, über unvermischte reine Bauschutt-Sorten verfügen zu können.

Betonbruch wird heute mit gutem Erfolg als Tragschichtmaterial im Straßenbau eingesetzt. Vermischter Bauschutt (Mauerwerksbruch) findet im untergeordneten Wegebau der Landwirtschaft auf technisch unterstem Niveau Verwendung.

Ausgangspunkt des vorliegenden Projektes war es, nach weiteren Einsatzmöglichkeiten für Bauschutt zu suchen, die als „technisch anspruchsvoll“ zu bezeichnen sind. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz von Bauschutt als Zuschlag in der Betonpflasterstein-Produktion. Im folgenden soll zunächst auf die Situation beim Einsatz von Bauschutt als Betonzuschlag allgemein eingegangen werden:

Beton mit rezykliertem Zuschlag:

Versuche der MPA Bremen
Fraktion 0/2 Natursand, Lag.
7d/100% + 21d/95%



Die Erkenntnis, dass gebrochener Altbeton als Zuschlag in einem neuen Beton verwendet werden kann, ist nicht neu. Beispielhaft sollen hier Ergebnisse angeführt werden, die von der MPA Bremen und der Forschungsvereinigung RWB vor einigen Jahren durchgeführt wurden.

Die Ergebnisse wurden auf dem Recyclingsymposium des Bundesverbandes VBR im Jahr 1994 in Mannheim vorgetragen. Für die Versuche wurden neue Baustoffe wie Mauerziegel, Dachziegel, Beton, Porenbeton gebrochen und als Zuschläge in ihren korrespondierenden Volumenanteilen im Beton als Zuschlag eingesetzt. Nach 28 Tagen Lagerung wurden die Würfel auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Die Ergebnisse finden sich im oben stehenden Diagramm.

Gleichzeitig wurden die Festbetonrohddichten ermittelt. Sie korrespondieren weitgehend mit den ermittelten Festigkeiten. Bereits bei diesen Versuchen wurde man auf ein Phänomen aufmerksam, welches auch für das vorliegende Projekt von gewisser Bedeutung war: Offensichtlich war die Eigenfestigkeit der Zuschläge nicht die alleinige Einflussgröße für die später erreichten Druckfestigkeiten; der hartgebrannte Ziegel (Klinker) erreichte z.B. geringere Festigkeiten als der relativ „weiche“ poröse Mauerziegel. Es bestehen offensichtlich kompliziertere Zusammenhänge innerhalb eines Recyclingbetons, die mit der Wasseraufnahme, -abgabe, Verankerung der Zementmatrix an den Zuschlägen usw. in Verbindung stehen. Selbstverständlich ist die Eigenfestigkeit eine wichtige – aber nicht allein entscheidende – Größe, wie die Versuche mit Porenbeton beweisen konnten. Die genannten Versuche wurden durch mikroskopische Untersuchungen begleitet. Bereits damals wurde deutlich, welche wertvolle Hinweise die Baustoffmikroskopie zum Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Zementmatrix und Recyclingzuschlägen beitragen kann.

Betone mit Betonsplitt

Während insbesondere in den Niederlanden aufgrund der dortigen Rohstoffgegebenheiten die Verwendung von Betonsplitt im Neubeton seit Jahren als gängige Praxis bezeichnet werden kann, war die Entwicklung in Deutschland hinsichtlich einer Erfassung der RC-Materialien als Betonzuschlag eher verhalten. Bis vor einigen Jahren konnte Betonsplitt in einem Konstruktionsbeton nach der Norm DIN 1045 nur mit besonderen Zulassungen als Zuschlag eingesetzt werden. Seit Herbst 1998 ist dies durch eine Ergänzende Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton DAfStb möglich. Die Richtlinie basiert auf Ergebnissen eines umfangreichen Verbund-Forschungsprojektes BiM („Baustoffkreislauf im Massivbau“) des DAfStb zusammen mit einer Vielzahl von Forschungscooperanden [5]. Auch die MPA Bremen und die Forschungsgemeinschaft RWB haben sich in einem Teilprojekt zusammen mit der Gesellschaft zur Aufbereitung von Baustoffen mbH, Bremen, und der Bauhaus-Universität Weimar engagiert [6]. Die Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ erlaubt den

volumetrischen Einsatz von Betonsplitt in einer Größenordnung zwischen 20 und 35% als Ersatz für groben Naturzuschlag. Bei den Betonbrechsanden wurden die Einsatzmengen aufgrund vielfältiger Probleme im Frisch- und Festbeton drastisch begrenzt. Auch wenn die Richtlinie seit 2 Jahren den Einsatz von Betonbruch im Beton nach DIN 1045 ausdrücklich gestattet, ist bis heute nicht zu erkennen, dass insbesondere im Transportbeton nennenswerte Mengen an Recyclingbeton hergestellt würden. Die Anwendungsfälle beschränken sich auf einige Demonstrationsvorhaben wie z.B. das Verwaltungsgebäude der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU [5], zwei Bauvorhaben in Darmstadt („Parkhaus“ und „Waldspirale“, beide Objekte betreut durch die TU Darmstadt, Herrn Prof. Grübl [5]). Die Vorbehalte gegen einen Einsatz von Betonsplitt sind vielfältig: So sind diese Zuschläge in der notwendigen Qualität und mit der erforderlichen Überwachung bisher kaum verfügbar; ein Preisvorteil ist bei der gegenwärtigen Marktlage, die durch günstige Primärbaustoffe (Sand und Kies) gekennzeichnet ist, nicht zu erkennen. Weiterhin sehen sich die Transportbetonwerke bisher nicht in der Lage, dieses Material in ihren Betriebsablauf zu integrieren – hierfür wären neue und zusätzliche Silos notwendig. Nach den Erkenntnissen aus dem BiM-Projekt ist wahrscheinlich ein Einsatz von Fließmitteln auf der Baustelle unerlässlich, um die Konsistenz des RC-Betons nachzuregulieren und die Einbaubarkeit sicherzustellen.

Um auch weitere mineralische Baurestmassen außerhalb des Straßenbaus oder zur Verfüllung nutzbar zu machen, ist man im DIN z.Zt. damit beschäftigt, die DIN 4226 (Zuschlagnorm) um einen Teil 100 zu ergänzen. Während man im bautechnischen Bereich bereits zu Fortschritten gekommen ist, ist die Einschätzung der Umweltverträglichkeit strittig. Vorschlägen zur Eingruppierung nach LAGA Z2 (mäßig belastet) stehen Forderungen nach Z0 (nahezu unbelastet) gegenüber.

1.2. Problemstellung

Die oben skizzierten Ergebnisse beziehen sich auf den in der Betontechnologie mit Abstand am häufigsten anzutreffenden Anwendungsfall des Transportbetons. In Deutschland werden ca. 80% aller hergestellten Betone als Transportbeton verarbeitet. Die dabei verwendeten Konsistenzen bewegen sich vorzugsweise im sog. KR-Bereich (weiche Regelkonsistenz). Der Beton wird in einem Mischwerk nach vorgegebenen Rezepturen häufig unter Zusatz von Betonzusatzmitteln und Betonzusatzstoffen (z.B. Kalksteinfüller oder Steinkohlenflugaschen) hergestellt und in Fahrmischern zur Baustelle transportiert. Dort wird der Beton in vorbereitete Schalungen zwischen die Bewehrung gefüllt/gepumpt und mit Außen- oder Innenrüttlern verdichtet. Hierfür ist eine weiche Konsistenz des Frischbetons unerlässlich. Völlig anders verhält sich die Herstellung von Betonwaren (zu denen auch Betonpflastersteine zählen):

Das zementäre Bindemittel und die Zuschläge werden mit Wasser gemischt; die angestrebte Betonkonsistenz weicht dabei erheblich von der des Transportbetons ab – während beim Transportbeton Wasser-Zement-Werte (W-/Z-Werte) von 0,5 bis 0,6 gebräuchlich sind, bewegen sich die W-/Z-Werte bei Betonwaren eher im Bereich von 0,3. Die resultierende Konsistenz ist erdfeucht/steif (KS). Die Zugabe von Zusatzmitteln – speziell auf diese Betonarten abgestimmt – ist üblich. Der Frischbeton wird in Formen gefüllt und mit einer hohen Rüttelbewegung maschinell stark verdichtet. Meist werden Betonpflastersteine in einem Zweistufen-Prozess hergestellt. Zunächst erfolgt die Füllung der Form zu ca. 80% des Gesamtvolumens. Diese Füllung stellt den sog. „Kern“ dar. Anschließend erfolgt eine zweite Füllung bis zum Restvolumen. Diese Füllung wird häufig als pigmentierte, farbige Betonmischung zur Herstellung des sog. „Vorsatzes“ verwendet. Der Vorsatz bildet dabei die optisch und oberflächenrelevante Nutzschiicht. Nach dem Verdichtungsvorgang, der einige Sekunden dauert, wird die Form hochgezogen; der Frischbeton verbleibt auf dem Förderband in Betonsteinform. Entscheidend ist dabei die sog. „Grünstandsfestigkeit“, d.h. der Beton darf beim Entschalungs- und Transportvorgang auf dem Band keine Formveränderungen z.B. in Form von Kantenabbrüchen erleiden.

Bereits bei der Planung des vorliegenden Projektes war den Beteiligten bewusst, dass die dem Vorhaben zugrundeliegende Betonpflastersteinherstellung und die Optimierungsversuche in einem Labor kaum zu simulieren waren.

Folgende Parameter wurden innerhalb des Vorhabens variiert:

- Untersuchungen der in Frage kommenden Ausgangsmaterialien
- Menge des zementären Bindemittels
- Menge und Art der Natur- und RC-Zuschläge: Bei den RC-Zuschlägen wurden relativ reine Fraktionen aus Ziegelbruch, Betonbruch (Produktionsausschuss aus der Betonsteinproduktion der Fa. Manzke), Porenbetonbruch, Kalksandsteinbruch verwendet.
- ein Zusatzmittel (auf Kieselsäurebasis zur besseren Homogenisierbarkeit der Mischung) und Zusatzstoffe (z.B. Kalksteinfüller, Steinkohlenflugaschen, Silicastaub)
- Art und Dauer des Vormässens
- Fraktion 0/2 Natursand, Mischungen aus Natursand/Hüttensand sowie reiner Hüttensand
- Mischdauer
- händische und maschinelle Formenfüllung
- Lagerungseinflüsse
- Frostbeständigkeit.

Im Labor wären die zur Herstellung notwendigen Randbedingungen der Verdichtung mittels Druck und Rüttelenergie nicht simultan einstellbar gewesen. Es wurde daher der aufwendigere aber praxisgerechtere Weg beschritten, grundsätzlich sämtliche Versuche zur Steinherstellung auf der Produktionsanlage der Fa. Manzke zu fahren.

Die Aufgabenverteilung erfolgte wie im Antrag vorgesehen derart, dass die Herstellversuche der einzelnen Serien auf der Manzke-Anlage durchgeführt wurden; die Prüfung der mechanischen Kennwerte der Ausgangsstoffe und der hergestellten Betonsteine erfolgte durch das Heide-Labor; die Aufgabe der MPA Bremen bestand darin, mit Hilfe ihrer Ausrüstung sämtliche Versuchsschritte licht- und elektronenmikroskopisch eng zu begleiten; die RWB übernahm projektbegleitende, beratende und nach Projektabschluss öffentlichkeitswirksame Aufgaben.

1.3. Stand der Technik, Ausgangspunkt des Vorhabens

Bzgl. einer umfassenden Darstellung des Standes der Technik zum Zeitpunkt der Projektbeantragung verweisen die Autoren auch auf den Projektantrag.

Als Recycling-Zuschlag in Betonwaren wurden bisher hauptsächlich ungebrauchte Restbetone, Ausschuß bei der Betonherstellung oder zurückgeführte Altprodukte der Betonsteinindustrie verwendet [7]. So produzierte das Unternehmen Kronimus AG, Iffezheim, einen Recycling-Betonstein (Rasengitterstein) aus firmeneigenen Produktionsrückständen/ Produktionsbruch (altes graues Doppelverbundpflaster, Betonplatten, andere Betonprodukte). Der Betonstein entspricht den Anforderungen der Pflastersteinnorm DIN 18 501 [8].

Ein weiterer Recycling-Betonstein der Kronimus AG wird aus 45% wiederaufbereiteten Baurestmassen (in Gew% ca.: Beton 57, Naturstein 20, Asphalt 19, Kies/Sand 3, Ziegel 1) der Körnung 0/16 (davon 5% 8/16), 30% Rheinsand 0/2 und 25% Rheinkies 2/8 zusammengestellt. Die Herstellung des Recycling-Zuschlags durchläuft im wesentlichen die Stationen: Prallbrecher, Magnetabzug, Windsichter, Absiebung, Silolagerung, EDV-gesteuerte Dosierung, Zwangsmischung und Wasserzugabe. Es wurden der Zement CEM I 45,5 RF, Verflüssiger, Flugasche und Sägeschleifschlamm verwendet. Der optimale Wassergehalt lag bei 0.36. Das Produkt wurde analog zum konventionellen Stein (Vorsatz aus Normalbeton) gefertigt und erfüllt die Kriterien der technischen Eignung, Umweltverträglichkeit, Gebrauchsfähigkeit und preislichen Darstellbarkeit [9].

Die von der Kronimus AG produzierten Beton-Pflastersteine tragen zu einer sinnvollen Verwertung von Produktionsrückständen und Baurestmassen, die andernfalls eine Deponie be-

lasten würden, bei. Da jedoch neben der Hauptkomponente Beton lediglich maximal 0.55% Ziegelmaterial eingesetzt werden, ist eine Verwertung von Hochbaurestmassen, in denen ein höherer Ziegelanteil angestrebt ist, in dieser Rezeptur nicht vorstellbar. Kalksandstein- und Porenbetongehalte wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Auch die Fa. Manzke hatte zu Beginn des vorliegenden Projektes bereits einige Erfahrungen mit der Herstellung eines Betonpflastersteins aus RC-Material gesammelt. Diese Erfahrungen beruhten auf werkseigenen Versuchen, die jedoch – bedingt durch den dafür notwendigen Personal- und Finanzierungsaufwand – naturgemäß nicht in der Breite vorgenommen werden konnten, die ein öffentlich gefördertes Forschungsvorhaben zulässt.

Das Unternehmen K. & B. Manzke, Volkstorf, produzierte einen aus eigener Erfahrung/Entwicklung gereiften Beton-Pflasterstein unter Verwendung von sortenreinen, gezielt zusammengesetzten Hochbaurestmassen mit einem hohen Anteil an Ziegelsplitt im Kern und einem Vorsatz aus Normalbeton. Die hierfür notwendige Aufbereitungstechnik, die nach Kuhne [10] und Beenken [11] ein Schlüssel zum Recycling ist und häufig erst die Voraussetzungen für ein weiteres Verwertungsverfahren schafft, ist bei dem Unternehmen Manzke gegeben. Die Aufbereitung von Bauschutt, der bereits bei der Anlieferung eine weitgehende Vorsortierung durchlaufen hat, ermöglicht nach den traditionellen Verfahren Sortieren, Zerkleinern, Klassieren und einer getrennten Lagerung der unterschiedlichen Komponenten der Fa. Manzke die nach Bedarf gezielte Zusammensetzung von Komponenten und macht den Betreiber einer Recycling-Anlage nahezu unabhängig von der jeweils angelieferten Bauschutt-Zusammensetzung.

Da – wie oben beschrieben – die Fertigungsversuche ausschließlich auf der Produktionsanlage der Fa. Manzke durchgeführt wurden, kamen den Projektpartnern Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen und der Forschungsgemeinschaft RWB in der Hauptsache steuernde Aufgaben zu. Die Erfüllung dieser Aufgabe wurde insbesondere in der MPA durch die intensiv projektbegleitende Baustoffmikroskopie ermöglicht. Es setzt sich heute in immer stärkerem Maße auch in der Baustoff-Forschung die Erkenntnis durch, dass eine alleinige Beurteilung von Baustoffen anhand mechanischer Parameter wie Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit oder E-Modul etc. zur Beurteilung besonders von Versuchsansätzen z.B. in der Beton- und Mörteloptimierung häufig nicht ausreichen. Die alleinige Beurteilung mechanischer Parameter ergibt meist keine oder nur begrenzte Aussagen, warum sich z.B. in Betonen (und verstärkt in RC-Betonen) Festigkeitsentwicklungen nach scheinbar nur schwer vorherzusagenden Kriterien entwickeln. Insbesondere in den RC-Betonen musste beispielsweise das Augenmerk auch auf den sehr wichtigen Kontaktbereich zwischen Bindemittel und Zuschlag gelegt werden. Dieser Kontaktbereich wird in Normalbetonen durch eine, wenige Mikrometer starke Schicht gebildet, die bereits von Zimbelmann [12] u.a. mikroskopisch cha-

rakterisiert worden war. An dem oberflächlich absolut dichten Zuschlagkorn (z.B. Quarz), welcher im REM keine glatte, sondern eine leicht genarbte Oberfläche aufweist, lagern sich in unmittelbarer Nähe (die Ausbildung der Kontaktschicht ist vom W-Z-Wert abhängig) Ettringite und Portlandite an; die Portlandite stehen tafelförmig nahezu im rechten Winkel von der Zuschlagsoberfläche ab. Erst im Anschluß an diese Schicht beginnt die eigentliche, zementäre Bindemittelmatrix mit ihren Geflechten aus CSH-Phasen. Dies bedeutet, dass das zementäre Bindemittel nicht als adhäsiver „Kleber“ für die Zuschlagskörner fungiert, so wie Beton bisweilen vereinfacht dargestellt wird. Die Kontaktschicht stellt somit eine Schwächezone dar, die bei entsprechender mechanischer Belastung versagt (um die Zuschlagskörner umlaufende Risse).

Diese Kontaktschicht muss in einem RC-Beton naturgegeben eine völlig andere Erscheinungsweise bieten: Die Zuschläge sind porös, je nach Zeitdauer der Vornässung (im Versuchsprogramm zeigte sich, welchen gravierenden Einfluss die Dauer der Vornässung hatte) sind sie mit Wasser randgefüllt bzw. kerngefüllt. Die oberste Kontaktschicht kann als mattfeucht abgetrocknet betrachtet werden. Der RC-Zuschlag verhält sich im RC-Beton im Vergleich zu einem dichten Normalzuschlag in zweifacher Hinsicht gegensätzlich: Während einerseits die Eigenfestigkeit deutlich niedriger als die eines Normalzuschlags ausfällt (Druckfestigkeit eines Normalzuschlags i.d.R. größer als 100 N/mm^2 ; Druckfestigkeit eines RC-Zuschlags – je nachdem, ob es sich um einen festen oder minderfesten Beton, um einen weichen Handstrichziegel oder um einen hartgebrannten Klinker handelt – zwischen 20 und 60 N/mm^2), ist das Wasserangebot des RC-Zuschlags in Aushärtungs- (Hydratations- bzw. Reaktionsphase des Zementes) deutlich höher als bei einem Normalzuschlag. Beim Normalzuschlag findet sich ein dünner Wasserfilm auf der Oberfläche, während der RC-Zuschlag aufgrund seiner Porosität als Wasserspeicher dienen kann. Dieses Wasser kann für den Hydratationsprozess des Zementes zur Verfügung gestellt werden („innere Nachbehandlung“); es besteht außerdem die Möglichkeit, dass sich die CSH-Phasen in Richtung auf das angebotene Wasser bilden und damit eine engere Verzahnung von RC-Zuschlag zum Bindemittel bewirken. Derartige Phänomene lassen sich nur in entsprechenden Mikroskopen beobachten. Während die geringere Eigenfestigkeit der RC-Zuschläge eine resultierende niedrigere Betonfestigkeit erwarten lässt, so könnte das Wasserangebot und eine intensivere Verzahnung mit dem Bindemittel Festigkeitsgewinne vermuten lassen. Es war daher u.a. die Aufgabe der Mikroskopie, die erzielten mechanischen Ergebnisse der Versuchsansätze zu interpretieren und die daraus gezogenen Rückschlüsse für die Nachfolgeserien nutzbar zu machen. Dieser Exkurs soll daher die Rolle unterstreichen, welche die Baustoffmikroskopie bei einer Rezeptur-Optimierung spielen kann.

Das Vorhaben war dergestalt konzipiert, dass Hochbaurestmassen – d.h. mineralische Fraktionen aus dem Abbruch von Hochbauten für die Entwicklung eines Betonpflastersteins genutzt werden sollten. In Vorversuchen mit „reinen“ Rezyklaten sollte zunächst ermittelt werden, welche RC-Baustoffe sich generell für die gestellte Aufgabe eignen würden; als reine Rezyklate wurden Betonbruch, Ziegel-/Klinkerbruch, KS- und Porenbetonbruch als typische, mineralische Vertreter von Hochbauabbrüchen eingesetzt. Von Beginn an war es das Ziel, einen Betonpflasterstein zu entwickeln, der in seinen Eigenschaften (Aussehen, Produzierbarkeit, Druckfestigkeit, Frostwiderstand) mit einem herkömmlichen Betonpflasterstein aus Naturzuschlägen vergleichbar sein sollte. Dabei waren die Projektpartner zu Beginn eher skeptisch, ob dieses hochgesteckte Ziel überhaupt erreichbar sein würde.

Während man bei den Rezyklaten Ziegel, KS und Porenbeton auf Hochbaurestmassen aus der Baustoffaufbereitung der Fa. Manzke zurückgreifen konnte, gestaltete sich die Auswahl des Betonbruchs abweichend: Hier wurde kein „gewöhnlicher Hochbaubetonbruch“ sondern Produktionsbruch aus der Betonsteinproduktion der Fa. Manzke eingesetzt. Dies stellte eine Abweichung zum Titel dar, zumal die Auswahl von Produktionsbruch zwei entscheidende Vorteile gegenüber herkömmlichem Betonbruch mit sich brachte: 1. Einheitliche Produktqualität des RC-Materials und 2. relativ hohe Festigkeiten des Ausgangsmaterials, aus dem der Bruch gewonnen wurde. Insofern ist auch nach Abschluss des Projektes die berechtigte Frage zu stellen, ob die positiven Ergebnisse mit einem herkömmlichen Betonbruch hätten erzielt werden können. Dies darf bezweifelt werden.

1.4. Abweichung vom Projektplan

Bereits zu Beginn des Projektes war aus den ersten Versuchen erkennbar, dass der Versuchsplan an die Gegebenheiten der Praxis - insbesondere auch an die Möglichkeiten der Produktionsanlage - angepasst werden musste. Hierdurch ergaben sich zwangsläufig Abweichungen im Versuchsplan, die im folgenden beschrieben werden sollen; andererseits konnten die im Plan vorgesehenen Versuchsschritte als wertvolle Anregung und Hilfestellung verstanden werden, so dass in vielen Fällen eine Kongruenz zum Plan hergestellt werden konnte.

Das Forschungsprojekt startete planmäßig mit der Untersuchung (Charakterisierung) der zur Verfügung stehenden Natur- und RC-Zuschläge. Die hier durchgeführten Versuche sind unter dem Oberbegriff „Serie I“ - wie auch im Projektplan - zusammengefasst. Wie im Plan wurden als RC-Zuschläge Betonbruch, Ziegelbruch Porenbetonbruch und Kalksandsteinbruch eingesetzt. Als Vergleich dienten Naturzuschläge, wie sie sereinmäßig in der Produktion der Fa. Manzke eingesetzt werden. Die Prüfparameter richteten sich nach den Anforde-

rungen der DIN 4226 [13] mit Prüfungen auf Eigenfeuchte, Kornform, Kornrohichte, Schüttdichte, quellfähige und abschlämmbare Bestandteile. Außerdem wurden die Wasseraufnahmen nach 10, 20 und 30 Minuten ermittelt. Letztere Prüfung erfolgte gemäß dem Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben „Bestimmung der Wasseraufnahme und Rohdichte von wiederaufbereitetem Beton“ der MPA Eckernförde.

Nach der Charakterisierung der Natur- und RC-Zuschläge wurden die Versuchsbetone (Pflastersteine) auf der Anlage der Fa. Manzke hergestellt. Die Pflastersteine wurden sämtlichst im Zweischicht-Verfahren gefertigt; d.h. die im Plan beschriebenen und in der Praxis durchgeführten Versuchsvariationen bezogen sich auf den sog. „Kernbeton“; oberhalb des Kerns wurde eine zweite Schicht - bestehend aus einem Normalbeton als „Vorsatz“ aufgebracht. Die Herstellung der Kernmischung erfolgte im Heide-Labor GbR, die Vorsatzmischung wurde als Standardrezeptur auf der Manzke-Anlage hinzugefügt. Bei der Auswahl des Zementes musste auf die Produktionsgegebenheiten der Anlage Rücksicht genommen werden; außerdem war es zweckmäßig, auf die vieljährigen Erfahrungen der Produktionsfirma zurückzugreifen. Dies hatte zur Folge, dass einem Hochofenzement CEM III A 42,5 der Vorzug gegenüber einem CEM I 42,5 gegeben wurde. Der CEM III hat sich bei der Fa. Manzke u.a. deshalb bewährt, weil er unter der dort verwendeten Kammernachhärtung eine bessere Festigkeitsentwicklung zeigt. Die spezielle Nachhärtung ist durch eine erhöhte Temperatur von 38°C, eine erhöhte relative Luftfeuchte von 98% und ein erhöhtes Angebot an Kohlenstoffdioxid von bis zu 12% gekennzeichnet.

Wie im Plan vorgesehen wurden die Zementgehalte auf 320, 340 und 360 kg/qm eingestellt. Ausgehend von den Vorversuchen wurden hinsichtlich des Vornässens und der Mischzeiten zunächst die Variationen 2 und 5 Minuten für die Mischzeit und 10 minütiges Vornässen ausgewählt. Es stellte sich hierbei jedoch heraus, dass mit 10 Minuten die Wasseraufnahme des Ziegelbruchs noch nicht abgeschlossen ist. Für den Ziegelsplitt wurden daher die Mischzeiten auf 7 und 10 Minuten erhöht. Eine erweiterte Mischzeit sollte insbesondere bei „weichen“ Zuschlägen wie Ziegelbruch auch zu einem verstärkten Abrieb führen, dies müsste durch eine Veränderung der Sieblinie in Abhängigkeit von der Mischdauer nachweisbar sein. Um dies zu kontrollieren, wurden in Auswaschversuchen und mittels Festbetonanalysen die Sieblinienveränderungen untersucht.

Im Gegensatz zum Versuchsplan wurde bei der Serie I von Anfang an ein Zusatzmittel auf Kieselsäure-Basis verwendet. Vorversuche hatten ergeben, dass eine optimale Homogenisierung der Mischung ohne Zusatzmittel nicht zu erreichen war.

Die Prüfung der Betone kann in Frisch- und Festbetonuntersuchungen unterteilt werden. Für jede Serie wurden die Aussen- und die Frischbetontemperatur gemessen. Die Konsistenz-

ermittlung erfolgte durch den Verdichtungsversuch (Verdichtungsmaß). Außerdem wurden am Frischbeton die unverdichtete und die verdichtete Rohdichte ermittelt.

Die Prüfung der Festbetone erfolgte i.d.R. nach 28-tägiger Lagerung. Dabei verblieben die Steine nach dem Entschalen zunächst für 24h in der o.g. Nachhärtetkammer. Bis zum 26. Tag wurden sie anschließend unter Wasser gelagert. Die Prüfung umfasste folgende Punkte: Abmessungen, Gewicht, Rohdichte und Druckfestigkeit. In der MPA Bremen erfolgten begleitend und steuernd hierzu bei sämtlichen Serien zusätzlich die mikroskopischen Untersuchungen. Um den Einfluss einer langsameren Erhärtung eines CEM III überprüfen zu können, wurden zusätzlich zum ursprünglichen Plan als spätere Ergänzung der Serie I auch die Festigkeiten nach 56 Tagen kontrolliert (alle RC-Zuschläge, 2 Mischzeiten, 3 Zementgehalte).

Die in der Serie I erlangten Erkenntnisse führten - wie im Projektplan ausgewiesen - zu einer Serie II, in der die Ergebnisse der Serie I berücksichtigt wurden. Um das Projektziel der Entwicklung eines RC-Pflastersteins mit den annähernden Eigenschaften eines Steins aus Normalbeton weiterverfolgen zu können, wurden in der Serie II nur noch die RC-Zuschläge Ziegel- und Betonbruch in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen (10, 30 und 50% Ziegel, der Rest jeweils Betonbruch) verwendet. Die Sandfraktion bestand - wie im Plan ausgewiesen - aus Natursand. Die Mischzeiten betragen 2 und 5 Minuten; die Wasseraufnahme 10 Minuten. Der Zementgehalt wurde auf 340 kg/qm festgelegt. Auch hier wurde aus den oben dargelegten Gründen auf die Versuchsvariante ohne Zusatzmittel verzichtet. Der Prüfungsumfang am Frisch- und Festbeton war mit dem der Serie I identisch. Auch für diese Serie wurden als Erweiterung die Festigkeiten nach 56 Tagen ermittelt (Ziegel/Beton 10/90; 30/70 und 50/50%); Wasseraufnahme 10 Minuten, 2 Mischzeiten).

Während sich die Serien I und II im wesentlichen noch recht eng an das im Antrag vorgesehene Versuchsschema hielten, musste das weitere Versuchsprogramm spätestens beim Beginn der dritten Serie entsprechend dem Projektfortschritt angepasst werden. In diesem Stadium war es nicht mehr notwendig, genau nach Plan vorzugehen; vielmehr konnte aufbauend auf den Ergebnissen der ersten beiden Serien und den erfolgversprechenden Zwischenresultaten jetzt der Versuch einer gezielten Rezepturoptimierung gesucht werden. Diese Rezepturoptimierung war nicht nur unter dem Aspekt von möglichst optimalen Eigenschaften des zu entwickelnden Steines zu sehen, sondern musste im Hinblick auf eine spätere wirtschaftliche Verwertung der Projekterkenntnisse auch ökonomische Gesichtspunkte mit einbeziehen. Hierdurch ergaben sich erhebliche Veränderungen. Zur Eigenschaftsbesserung wurde der Versuch unternommen, die bisher erzielten Druckfestigkeiten weiter zu steigern. Um dem festigkeitsbestimmenden Bindemittel Zement weitere reaktionsfähige, festigkeitssteigernde Additive hinzuzufügen, wurde zunächst der Zusatz von Silicastaub ver-

sucht. In weiteren Mischungen wurde versucht, dass latenthdraulische Potential von Hüt-
tensand als Zuschlag auszunutzen. Zu diesem Zweck wurde der Natursand teilweise und in
Gänze durch groben Hüttsand der Körnung 0/2 ersetzt. Abweichend vom Plan erfolgten
auch Versuche, mögliche Unterschiede zwischen einer während des Projektes bevorzugt
praktizierten Handeinfüllung der Form mit einer maschinellen Einfüllung herauszufinden.

Im Sinne einer Verbesserung auch der Wirtschaftlichkeit wurde das bisherige Bindemittel
eines reinen Hochofenzementes durch eine Mischung aus Hochofenzement und Flugasche
ersetzt. Der resultierende RC-Betonpflasterstein glich sich so immer weiter den normalen
Produktionsbedingungen für Betonpflastersteine an.

In der Serie IV wurde im Hinblick auf eine greifbar nahe optimierte Rezeptur eines RC-Be-
tonpflastersteines mit den Eigenschaften eines Steines aus Normalbeton nicht mehr der
Einsatz von unsortiertem Bauschutt verfolgt. Es war in diesem Stadium absehbar, dass diese
Versuchsvariante die bisher erzielten unerwartet positiven Ergebnisse letztlich nur ver-
schlechtern konnte. Der Abschluss der Versuchsphase des Projektes war vielmehr dadurch
geprägt, die gefundene Rezeptur geringfügig weiter zu modifizieren und den Produktionsbe-
dingungen anzupassen und kleinere Produktionschargen zu fertigen.

Die abschliessenden Untersuchungen wurden an diesen Produktionschargen durchgeführt.
An diesem Material erfolgte auch die Prüfung der Frostbeständigkeit.

Der ursprüngliche Zeitplan konnte nicht eingehalten werden. Technische Störungen auf der
Produktionsanlage der Fa. Manzke zwang die Projektpartner zu einer beantragten und be-
willigten kostenneutralen Projektverlängerung um drei Monate.

1.5. Abgrenzung zu anderen Projekten

Bereits in den ersten Kapiteln des vorliegenden Berichts war auf das Verbund-Forschungs-
projekt des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton DAfStb „Baustoffkreislauf im Massivbau“
(BiM), gefördert aus Mitteln des BMBF, hingewiesen worden. Dieses mehrjährige Projekt mit
einer Vielzahl von Teilnehmern aus industriellen und universitären Forschungseinrichtungen
kann für sich mit Recht beanspruchen, den Stand der Technik/Forschung auf dem Gebiet
des Recyclingbetons repräsentieren zu können. Allerdings ist festzuhalten, dass im „BiM“ –
gemäß seiner Bedeutung für die Bauindustrie – das Hauptaugenmerk insbesondere auf den
Transportbeton und die dort üblichen Wasser-Zement-Werte bzw. Konsistenzen gelegt
wurde. Der Unterschied zwischen Transportbeton und der Herstellung von Betonwaren wie
z.B. Betonpflastersteinen wurde im Einleitungsteil zu diesem Abschlussbericht ausführlich

beschrieben. Die Abgrenzung zum „BiM“ war im Vorfeld bei der Beantragung des vorliegenden Projektes vom Fördermittelgeber und von Seiten der Gutachter gefordert worden und konnte nachvollziehbar von den Antragstellern der MPA Bremen erläutert werden: Tatsächlich bestehen zwischen der Herstellung und Handhabung von Transportbeton und Betonwaren elementare Unterschiede, so dass Forschungsergebnisse der einen Seite nicht auf die andere zu übertragen sind. Überschneidungen waren daher nicht zu erwarten.

Innerhalb des „BiM“ wurde jedoch auch die Herstellung von Betonwaren in einem Teilprojekt untersucht. Im folgenden soll auf dieses Vorhaben näher eingegangen werden, weil es in seiner Grundkonzeption nicht in das sonstige, o.g. BiM-Spektrum passte und vom Ansatz gewisse Parallelen zum vorliegenden Projekt aufwies. Es handelt sich hierbei um das BiM-Teilprojekt E/05 der RWTH Aachen mit dem Titel „Betonwaren mit Recyclingzuschlägen“ [5]. Als bearbeitende Wissenschaftler und Berichtsaufsteller werden Dipl.-Ing. Ch. Müller und Dipl.-Ing. U. Wiens genannt. Auch dieses Projekt setzte auf die Kooperation mit der Betonwaren-Industrie – vermutlich aus ähnlichen Gründen – wie sie für das vorliegende Vorhaben von Bedeutung waren: Die Herstellung von Betonpflastersteinen ist im Labor nur schwer zu simulieren; die Laborergebnisse sind nicht unbedingt auf den industriellen Herstellprozess zu übertragen. Im Projekt der RWTH fungierte als Betonstein-Hersteller eine Fa. Klausmann aus Krefeld. Ziel des Projektes war ebenfalls, Betonsteine mit unterschiedlichen Anteilen und Arten von Bauschutt-Rezyklaten herzustellen. Während im vorliegenden Projekt jedoch versucht und umgesetzt wurde, den Grobzuschlag-Anteil zu 100% aus Rezyklaten einzusetzen, wurde im Projekt der RWTH nur ein teilweiser Ersatz des natürlichen Grobzuschlages realisiert. Für die Serien A – D wurden in den Fraktionen 2/8 und 8/16 38 M-% bzw. 37 M.% durch Betonbruch ersetzt, in den Serien E – H 25 bzw. 20 M.%. Der Sand 0/2a bestand nur zu 80 % aus Natursand – im Gegensatz zum vorliegenden Projekt, wo für den Sandanteil reiner Natursand verwendet wurde. Während im vorliegenden Projekt als Betonbruch nur hochwertige Splitte aus der Betonsteinproduktion (Produktionsbruch) zum Einsatz kamen, wurde im RWTH-Projekt allgemeiner Betonbruch eingesetzt; möglicherweise auch ein Grund für die unterschiedlichen Ergebnisse. Der grundlegende Unterschied bestand nach Ansicht der Autoren des vorliegenden Berichts jedoch in einer abweichenden Zielsetzung: Im RWTH-Projekt war die Forschung grundlagenorientiert breiter angelegt; so wurden z.B. auch nicht nur Druckfestigkeiten und Frostbeständigkeiten – wie im vorliegenden Projekt – bestimmt sondern auch Frost-Tausalz-Beständigkeiten, Wasseraufnahmen unter verschiedenen Bedingungen und Schleifverschleiss. Dafür fehlten in Gänze mikroskopische Untersuchungen sowie die im vorliegenden Projekt akribisch vorgenommene Variation/Optimierung der Vornäss- und Mischzeitbedingungen unter mikroskopischer Kontrolle. Im vorliegenden Projekt lag die Entwicklungsrichtung nicht in erster Linie in einer *Grundlagenforschung zur Betonsteinherstellung mit Rezyklaten* sondern diente der *Optimierung von Rezepturen und Fer-*

tigungsprozessen mit dem Ziel, einen möglicherweise verkaufsfertigen Betonstein zu entwickeln, der in seinen Eigenschaften und hier in erster Linie der Druckfestigkeit einem Betonstein aus Naturzuschlägen möglichst nahe kommt. Die mikroskopische Begleitung wurde dabei als wichtige Steuerungshilfe eingesetzt.

Die Endergebnisse in den erzielten Druckfestigkeiten unterscheiden sich so erheblich: Mit Ausnahme einer RWTH-Serie C mit geringen RC-Anteilen wurden die im vorliegenden Projekt in der optimierten Rezeptur erreichten 71 N/mm^2 beim RWTH-Projekt deutlich unterschritten und lagen nach vergleichbaren 90 Tagen bei $40 - 60 \text{ N/mm}^2$.

2. Untersuchung der einzelnen Recyclingzuschläge

Das Unternehmen K. & B. Manzke, Volkstorf, betreibt sehr anspruchsvolle Bauschuttannahme- und sortiermodalitäten. Der Bauschutt wird sortenrein in unterschiedlichen Fraktionen auf Halde gelagert. Die benötigten Recycling-Baustoffe werden in der Körnung 0/16 verwendet. Es erfolgt stets eine Eingangskontrolle der RC-Zuschläge in Form einer petrologischen Charakterisierung und in Anlehnung an DIN 4226 für Leichtzuschläge.

Folgende Recyclingmaterialien standen für die Versuchsreihen zur Verfügung

1. Ziegelsplitt 0/16
2. Gasbetonbruch (Porenbetonbruch) 0/16
3. Betonbruch 0/16
4. Mauerwerksbruch 0/16

2.1. Technologische Kennwerte

Folgende Kennwerte bzw. Prüfparameter wurden von den einzelnen RC-Zuschlägen ermittelt:

Eigenfeuchte, Kornform, Schüttdichte, abschlämmbare und quellfähige Bestandteile nach DIN 4226.

Aus betontechnologischen Gründen ist eine kubische Kornform besonders unter verarbeitungstechnischen Gesichtspunkten als günstig anzusehen. Die beim Projektpartner K. & B. Manzke verwendete Prallmühle erzeugt ein vorwiegend kubisch gebrochenes Recyclingkorn und dürfte - nach dem gegenwärtigen Stand der Technik - die beste Vorbehandlung von Bauschutt für den Einsatz als Betonzuschlag bieten. Die Kontrolle erfolgte dabei durch Augenscheinnahme und ergab bei allen Zuschlagsarten zufriedenstellende Ergebnisse.

In Tabelle 1 sind die Kennwerte der einzelnen Recyclingzuschläge, die in den Versuchen zum Einsatz kamen, zusammengefaßt. In Abb. 1 ist die Korngrößenverteilung der verwendeten Recyclingzuschläge als Diagramm dargestellt.

	Ziegelsplitt	Betonbruch	Mauerwerksbruch	Gasbetonbruch
Kornrohichte [kg/dm ³]	2,01	2,25-2,33	2,17	1,07
Schüttdichte [kg/dm ³]	0,942	1,353	0,985	0,374
Eigenfeuchte [%]	5,44	4,11	4,77	12,54
Wasseraufnahme [%]				
W 10 min.	5,03	5,21	8,3	72,8
W 20 min.	6,32	5,25	8,54	73,1
W 30 min.	6,39	5,31	8,8	74,6
Kornform	N.A. i.O.	N.A. i.O.	N.A. i.O.	N.A. i.O.
abschlämbbare Bestandteile [%]	0,7	0,1-0,2	0,3	0,5
quellfähige Bestandteile [%]	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 1: Kennwerte der einzelnen Recyclingzuschläge (gemäß DIN 4226)
(N.A. = Nach Augenscheinnahme)

Korngrößenverteilung

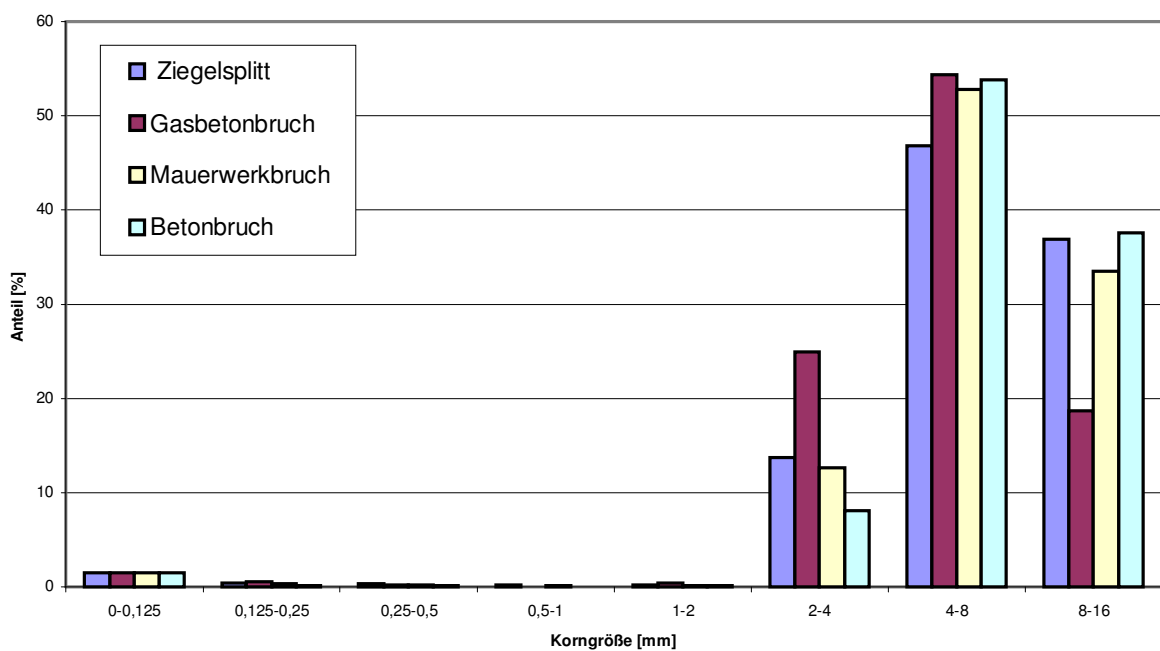


Abb. 1: Korngrößenverteilung der Recyclingzuschläge

Als Grundlage zur Ermittlung der Wasseraufnahme diente der Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben "Bestimmung der Wasseraufnahme und Rohdichte von wiederaufbereitetem Beton" der MPA Eckernförde [14]. Die Wasseraufnahme wurde demnach am lufttrockenen Zuschlag nach einer Wasserlagerung von 10, 20 und 30 Minuten ermittelt. Die Kornroh-dichte wurde mit dem Messzylinderverfahren am mit Petroleum beschichteten Bruch durchgeführt.

2.2. Mikroskopische Beschreibung

Der Gefügestand der verschiedenen Ausgangs-Recycling-Materialien wurde licht- und rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Die untersuchten Proben enthalten in einem Prallbrecher zerkleinertes Material, das als Zuschlag zur Herstellung der Pflastersteine verwendet werden soll. Da die Pflastersteine bei der maschinellen Herstellung unter hohem Druck in Form gepreßt werden, ist zu diskutieren, ob eventuell schädliche Gefügeveränderungen der Zuschlagstoffe durch diese Beanspruchung auftreten.

Zu diesem Zweck sollte zunächst festgestellt werden, wie der Gefügestand des zerkleinerten Recycling-Materials vor der Weiterverarbeitung ist. Die Ergebnisse ermöglichen bei einer späteren Untersuchung der fertigen Pflastersteine eine Unterscheidung zwischen Gefügeschäden, die bereits durch die Zerkleinerung des Recycling-Materials hervorgerufen worden sind, und solchen, die erst bei der Herstellung der Pflastersteine entstehen.

2.2.1. Präparation und Methodik

Es wurden drei der unter 2.1 beschriebenen Recycling-Materialien untersucht:

- a) Betonbruch
- b) Porenbetonbruch
- c) Ziegelbruch

Bei allen Proben handelte es sich um gebrochenes Lockermaterial, die Kongrößenverteilung ist in 2.1 beschrieben. Der Betonbruch konnte noch in zwei verschiedene Fraktionen getrennt werden (reiner Natursand, Matrixanhaftungen), die getrennt untersucht wurden.

Das Lockermaterial wurde zunächst in niedrigviskosem Epoxyharz (SPURR) eingebettet. Die eingebetteten Proben wurden anschließend geschnitten, geschliffen und poliert. Die lichtmikroskopischen Untersuchungen zur Beurteilung des Gefügestandes erfolgten bei 50facher Vergrößerung im Auflichtmikroskop. Anschließend wurden die Proben an den polierten Flächen mit einer elektrisch leitenden Schicht aus Platin besputtert und im Rasterelektronenmikroskop bei maximal 1000facher Vergrößerung untersucht.

2.2.2. Lichtmikroskopische Untersuchungen

Die Ergebnisse der lichtmikroskopischen Untersuchungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei der gewählten Auflösung des Stereo-Auflichtmikroskops bei ca. 50facher Vergrößerung

weisen alle untersuchten Bruchstücke ein scheinbar intaktes internes Gefüge auf. Die Abbn. 1-4 zeigen den Betonbruch bei unterschiedlichen Vergrößerungen. In Abb. 2 ist die Natursandfraktion abgebildet. Hier liegen fast nur reine Natursandkörner vor ohne größere Anhaftungen alter Betonmatrix. Dieser Zuschlag wird sich im neuen Beton wie normaler Natursand verhalten. Abb. 3 dagegen zeigt die Matrixfraktion, die aus Bruchstücken alter



Abb. 2: Betonbruch/Natursandfraktion
Es haften nur geringe Mengen Zementsteinmatrix an den ursprünglichen Sandkörnern
SteMi-Aufnahme: 8x



Abb. 3: Betonbruch/Matrixfraktion
überwiegend bestehend aus reiner Zementsteinmatrix
SteMi-Aufnahme: 8x

Betonmatrix oder aus Sandkörnern mit überwiegenden Anhaftungen alter Matrix bestehen.

Bei dieser Fraktion wird ein anderes Verhalten bei der Wiederverwendung zu vermuten sein.

Abb. 4 zeigt die Matrixfraktion in höherer Vergrößerung, wobei die alte Betonmatrix ein intaktes Interngefüge zeigt, während bei den Zuschlägen in wenigen Fällen Spaltflächen und Risse zu erkennen sind, allerdings bei gleichzeitiger fester Einbindung in eine ungestörte Betonmatrix. Diese Risse müssen deshalb bereits vor oder während der ersten Betonherstellung entstanden sein.

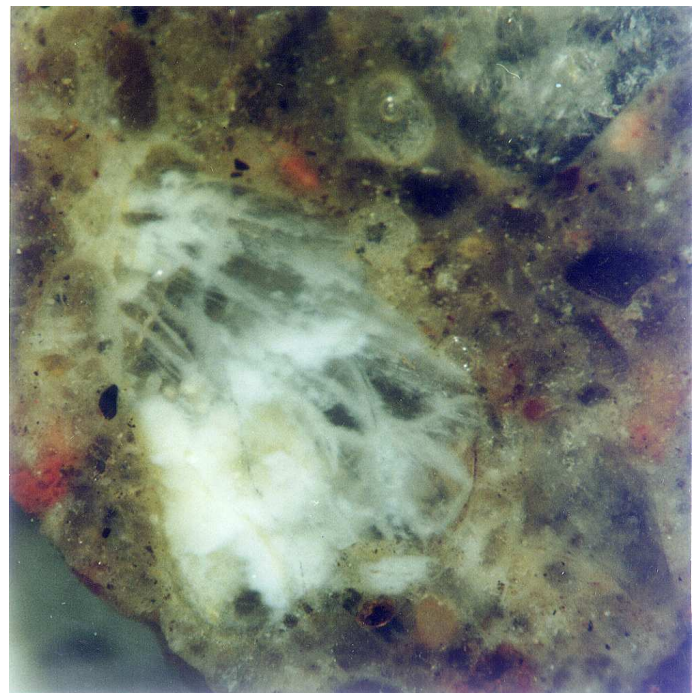


Abb. 4: Betonbruch/Matrixfraktion
fest eingebundenes Sandkorn mit Spalttrissen
SteMi-Aufnahme: 50x



Abb. 5: Porenbetonbruch
SteMi-Aufnahme: 8x

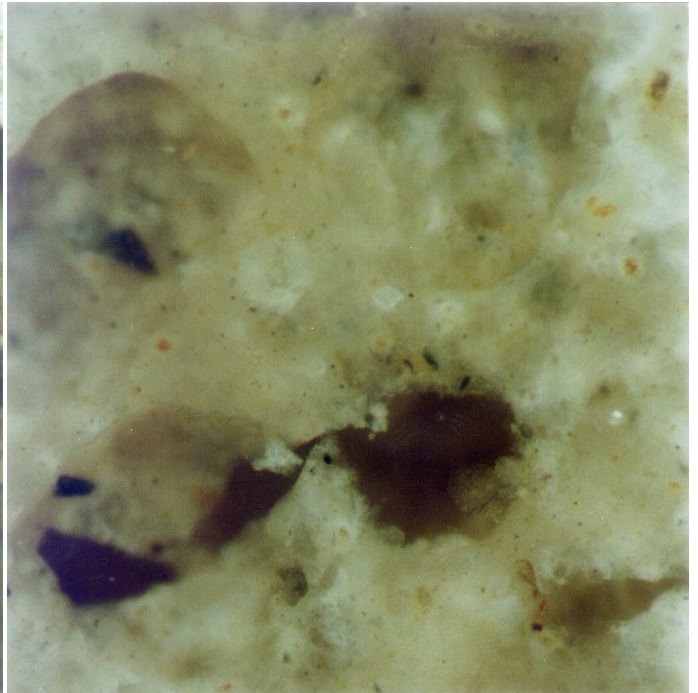


Abb. 6: Porenbetonbruch, Ausschnitt aus Abb. 5
SteMi-Aufnahme: 50x

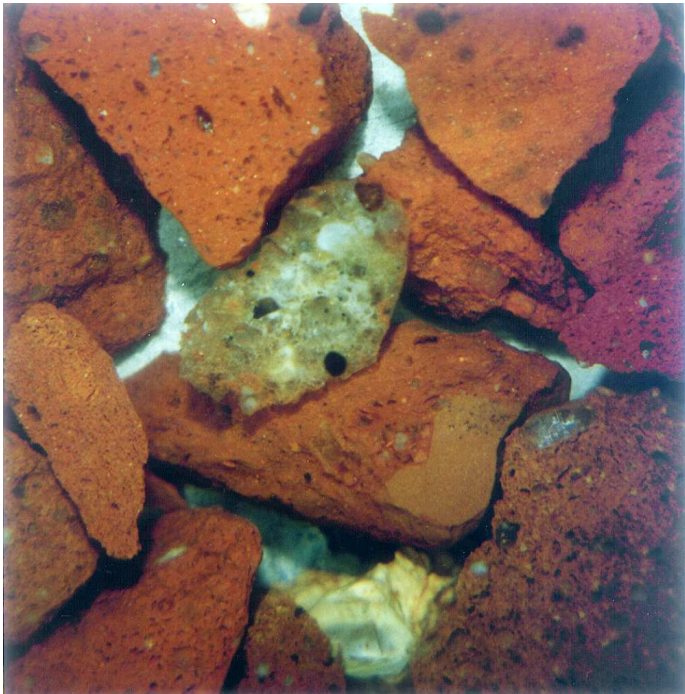


Abb. 7: Ziegelbruch
hohe Qualität mit wenigen Anhaftung an alter
Zementsteinmatrix, SteMi-Aufnahme: 8x

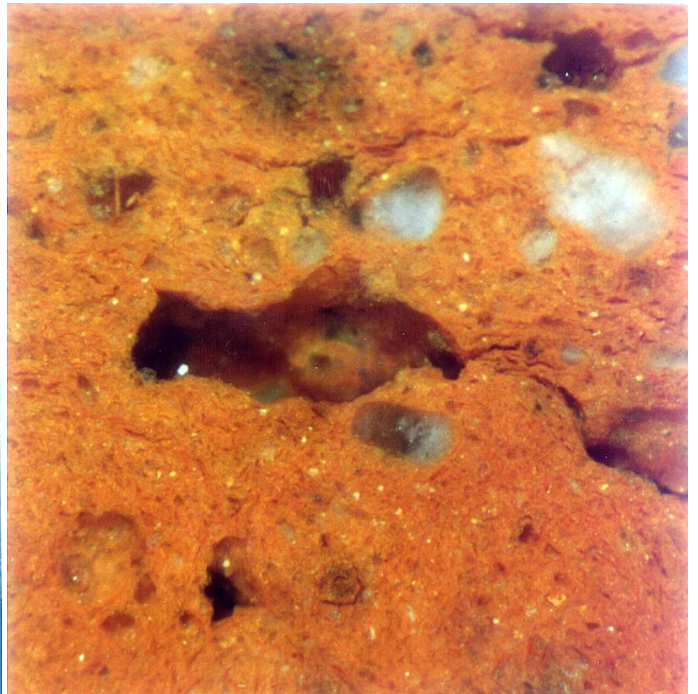


Abb. 8: Ziegelbruch, Ausschnitt aus Abb. 7
vereinzelt treten texturbedingte Risse auf,
SteMi-Aufnahme: 50x

Die Abbn. 5 und 6 zeigen den Recycling-Zuschlag aus Porenbetonbruch., der ebenfalls in höherer Vergrößerung ein intaktes Interngefüge ohne Rissbildungen zeigt.

Lediglich bei einzelnen Bruchstücken des Ziegelbruchs waren geringfügige Rissbildungen erkennbar, die mit einer lagigen Porentextur der entsprechenden Bruchstücke einhergehen. (Abb. 7). Beim Ziegelbruchmaterial war auffallend, dass es sich um sehr reines Material ohne größere Anhaftungen alter Beton- oder Mörtelmatrix handelte (Abb. 6). Das bedeutet, dass in den späteren Versuchen davon ausgegangen werden kann, dass die beobachteten Effekte als reine Wechselwirkung zwischen Ziegeloberfläche und neuer Zementsteinmatrix gewertet werden können.

2.2.3. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Im Rasterelektronenmikroskop konnten Rissbildungen festgestellt werden, die lichtmikroskopisch nicht erfassbar waren. In Abhängigkeit vom jeweiligen Recyclingmaterial kommen unterschiedliche Formen der Rissbildung vor.

2.2.3.1. Betonbruch/Natursandfraktion

Innerhalb von körnigen Bruchstücken treten besonders in randlichen Bereichen Risse entlang von Mineralkorngrenzen auf. (Abb. 9 u. 10). Die Risse reichen bis zu 20 µm Breite. Kompakte, monomineralische Bruchstücke sind dagegen im allgemeinen unversehrt (Abb. 11 u. 12). Vereinzelt treten hier bis zu 50 µm breite randliche Risse auf.

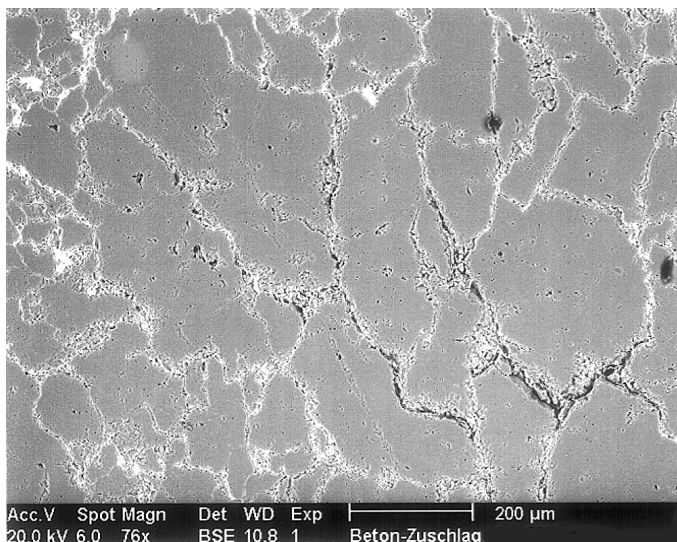


Abb. 9: Betonbruch/Natursandfraktion
Körniges Quarzitbruchstück mit Rissen
entlang der Korngrenzen

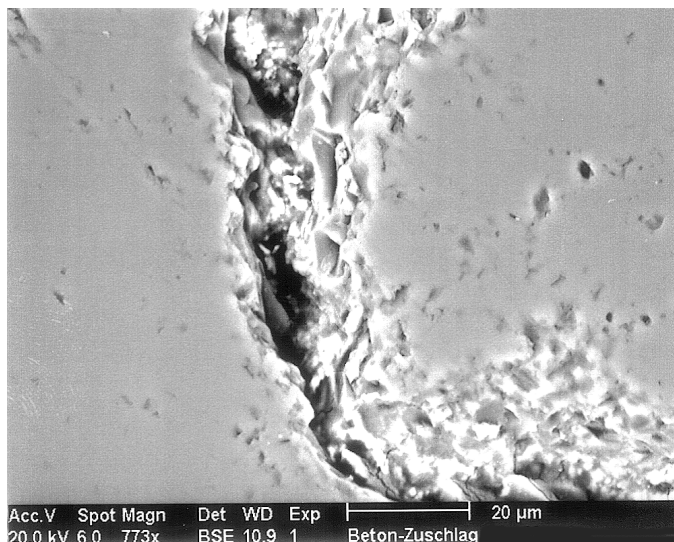


Abb. 10: Betonbruch/Natursandfraktion
Ausschnitt aus Abb. 9

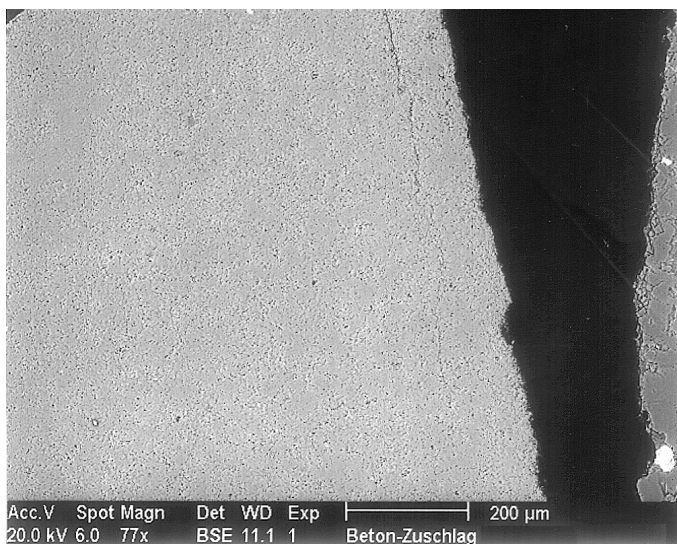


Abb. 11: Betonbruch/Natursandfraktion
Kompaktes monomineralisches Bruchstück

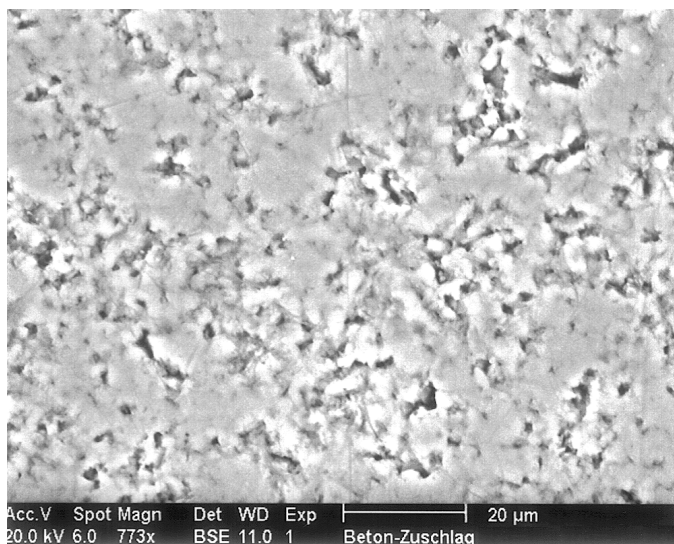


Abb. 12: Betonbruch/Natursandfraktion
Intaktes Intergefüge, Ausschnitt aus Abb. 11

2.2.3.2. Betonbruch/Matrixfraktion

Bruchstücke der Matrixfraktion weisen in randlichen Bereichen z.T. Risse mit Breiten bis zu 2 µm auf. Diese Risse gehen z.T. durch die Zementmatrix oder entlang der Zuschlagskörner, die dann aus dem Bindemittel gelöst werden. Vereinzelt durchziehen diese Risse auch die Zuschlagskörner selbst (Abbn. 13 u. 14). Die Bruchstückszentren sind in der Regel unversehrt, bei hohen Vergrößerungen werden jedoch auch hier feine Haarrisse mit Breiten deutlich unterhalb 1 µm sichtbar (Abbn. 15 u. 16).

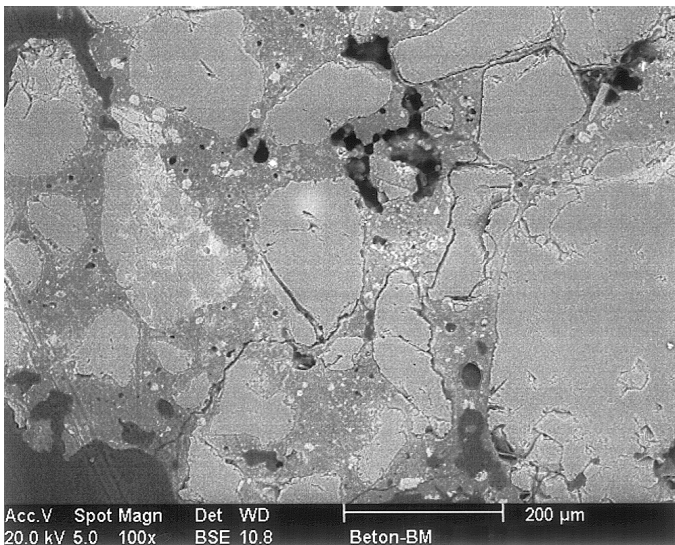


Abb. 13: Betonbruch/Matrixfraktion
Randlicher Bruchstückbereich mit
gestörtem Gefüge

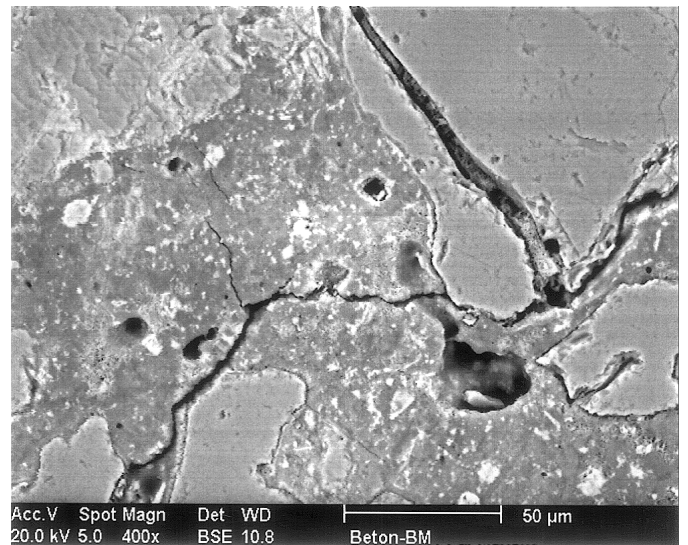


Abb. 14: Betonbruch/Matrixfraktion
Ausschnitt aus Abb. 14

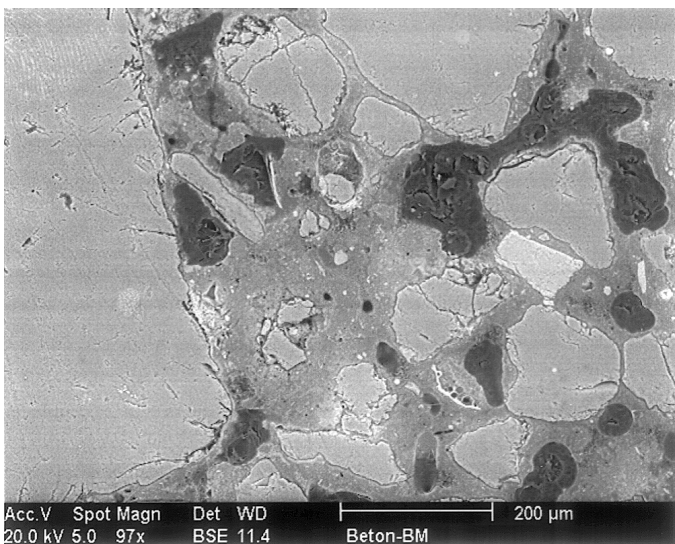


Abb. 15: Betonbruch/Matrixfraktion
Bruchstückzentrum mit intaktem Gefüge

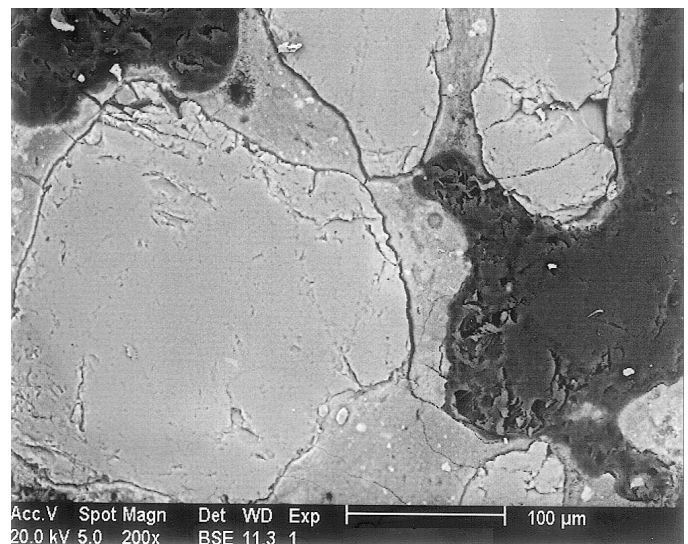


Abb. 16: Betonbruch/Matrixfraktion
Haarrisse um die Feinzuschläge

2.2.3.3. Porenbetonbruch

Bei den Porenbeton-Bruchstücken treten Risse sehr selten und dann lediglich in Randbereichen auf. Hier können schwache Brücken zwischen größeren Poren zerbrochen sein. Dadurch verursachte Risse im Betongefüge erreichen Breiten bis zu 20 µm und verzweigen seitlich in bis zu 1 µm breite Risse. (Abbn. 17 u. 18). Generell ist das Porenbetongefüge jedoch ungestört (Abbn. 19 u. 20).

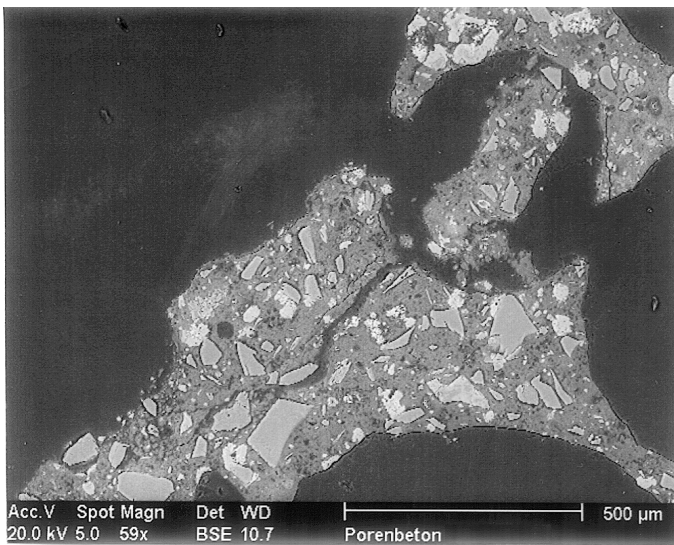


Abb. 17: Porenbetonbruch
Randlicher Bruchstückbereich mit
gestörtem Gefüge

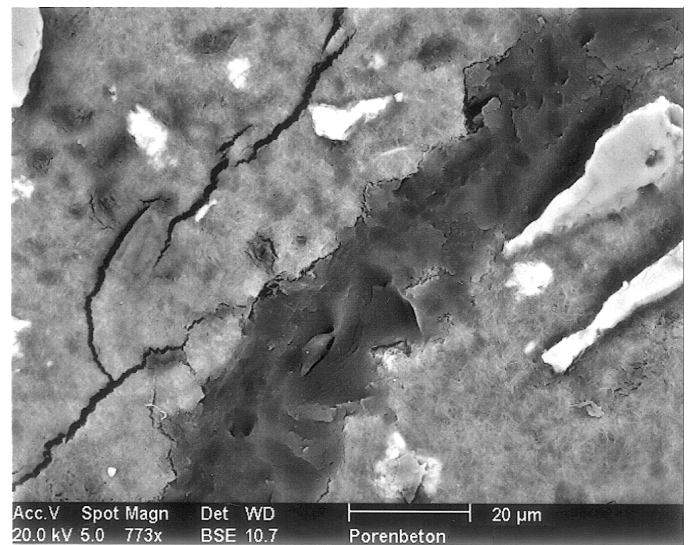


Abb. 18: Porenbetonbruch
Rissbildung, Ausschnitt aus Abb. 17

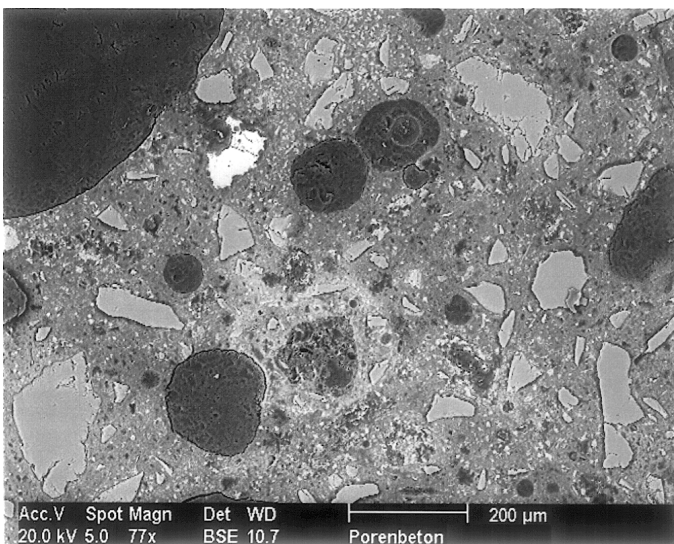


Abb. 19: Porenbetonbruch
Intaktes Gefüge im Kern eines Bruchstücks

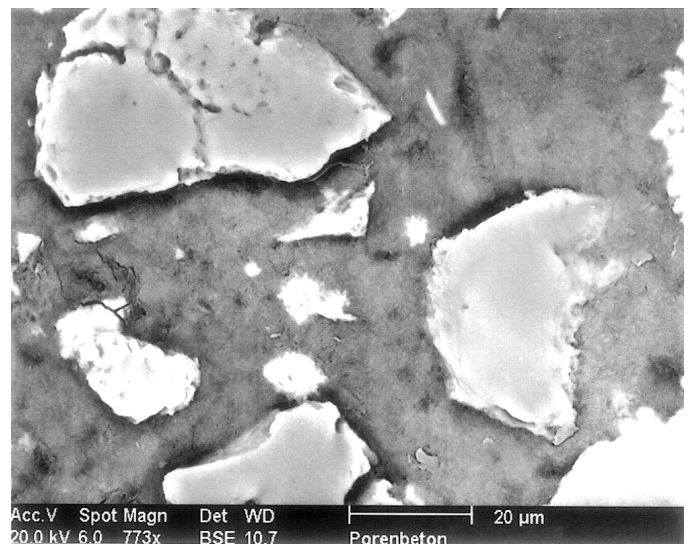


Abb. 20: Porenbetonbruch
Ausschnitt aus Abb. 19

2.2.3.4. Ziegelbruch

Im Rasterelektronenmikroskop hat sich das Ergebnis der lichtmikroskopischen Untersuchungen noch einmal bestätigt, wonach Risse an Ziegelbruchstücken auftreten, die eine lagige Porentextur aufweisen. Die Risse erreichen Breiten bis zu 30 µm (Abbn. 21 u. 22).

Ziegelbruchstücke ohne erkennbare Porentextur weisen dagegen keine Gefügeschäden auf (Abbn. 23 u. 24), auch dann nicht, wenn sie insgesamt hochporöse Strukturen aufweisen.

Ebenfalls frei von Gefügeschäden sind Ziegelbruchstücke mit einem dichten Gefüge.

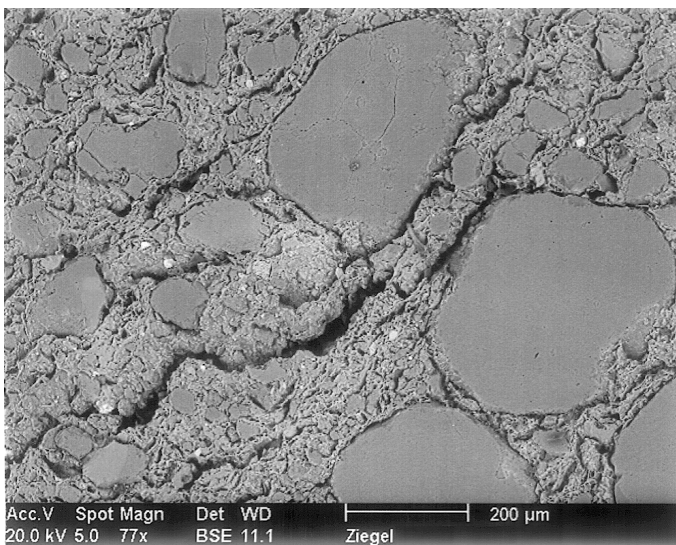


Abb. 21: Ziegelbruch
Bruchstück mit lagiger Porentextur und
resultierenden Rissen

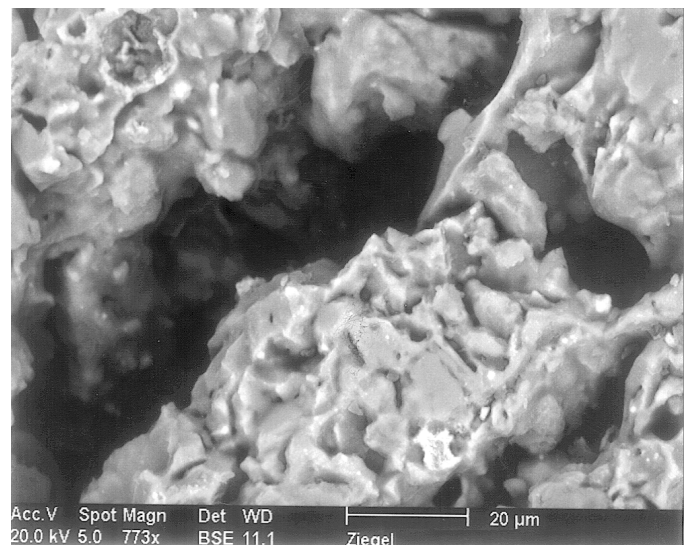


Abb. 22: Ziegelbruch
Ausschnitt aus Abb. 21, Riss mit mehr als
20 µm Breite

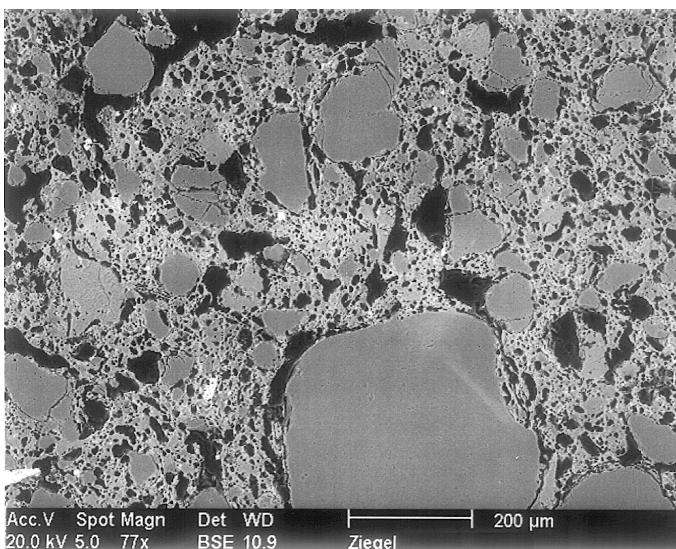


Abb. 23: Ziegelbruch
Bruchstück ohne erkennbare Porentextur

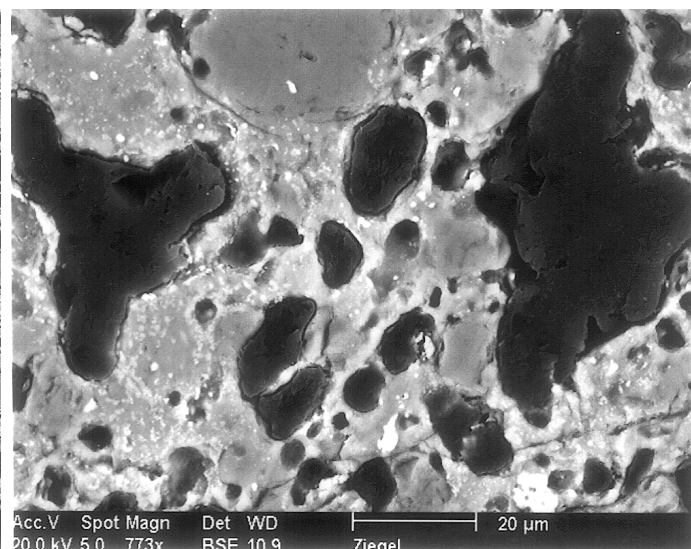


Abb. 24: Ziegelbruch
Intaktes Gefüge, Ausschnitt aus Abb. 23

3. Serie I: Versuche mit reinen Recyclingzuschlägen

In der ersten Versuchsreihe wurden die einzelnen RC-Zuschläge "pur" für die Herstellung von Pflastersteinen verwendet. Die Herstellung der Kernmischung erfolgte im Heide-Labor GbR.

Die Vorsatzmischung ist als Standardmischung werkseitig auf der Großanlage Fa. Manzke hinzugefügt worden. Als Zement wurde ein CEM III A 42,5 verwendet, da er gegenüber einem CEM I 42,5 eine schnellere und bessere Härteentwicklung hinsichtlich der nachgeschalteten CO₂-Behandlung aufweist. Hierbei werden die Proben bei einer Temperatur von 38 °C, einer Umgebungsluftfeuchtigkeit von 98% r.F. und einem CO₂-Gehalt von bis zu 12% in einer Kammer für 24 Stunden behandelt.

Für das Mischen der RC-Betone wurde ein 60 Liter Zwangsmischer verwendet. Nachdem der RC-Zuschlag die benötigte Wasseraufnahme aufgenommen hatte, konnten die letzten Komponenten wie Sand und Zement hinzugegeben werden. Anschließend wurde das benötigte Wasser unter Einspülung eines Betonzusatzmittels in den Zwangsmischer gegeben.

Bei der Betonierung wurden die Außen- und Betontemperatur gemessen. Für die Konsistenzmessung kam der Verdichtungsversuch nach DIN 1048-Teil 1, Abschnitt 3.1.1 zum Einsatz. Gleichzeitig sind während des Verdichtungsversuchs die unverdichtete und verdichtete Rohdichte ermittelt worden.

Die Mischzeiten betragen zunächst 2 bzw. 5 Minuten. Der Zementgehalt betrug 320 kg/m³, 340 kg/m³ und 360 kg/m³.

Alle Proben dieser Serie wurden mit einer Vornässvariante von 10 min Wasseraufnahme durchgeführt.

3.1. Technologische Kennwerte

3.1.1. Festbetonprüfungen

Nachdem die Probekörper 24 Stunden in der Härtekammer verblieben, wurden sie gewogen, abgemessen und abgeschliffen. Bis zum 26. Tag verblieben die Steine im Wasserbad (gemäß DIN-Lagerung).

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Festbetonprüfungen zusammengestellt.

Wasseraufnahme [min]	10			2
Zementgehalt [kg/m³]	320	340	360	340

Ziegelbruch**Mischzeit 2 min**

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,13	2,03	2,03	2,11
Druckfestigkeit [N/mm²]	33	26	20	36

Mischzeit 5 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,02	2,05	2,06	2,03
Druckfestigkeit [N/mm²]	21	23	30	23

Mischzeit 7 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]		2,16		2,03
Druckfestigkeit [N/mm²]		40		26

Mischzeit 10 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]		2,11		2,06
Druckfestigkeit [N/mm²]		42		30

Gasbetonbruch**Mischzeit 2 min**

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	1,84	1,8	1,74
Druckfestigkeit	12	11	10

Mischzeit 5 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	1,85	1,83	1,78
Druckfestigkeit	9	10	11

Betonbruch**Mischzeit 2 min**

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,3	2,28	2,35
Druckfestigkeit	48	47	58

Mischzeit 5 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,3	2,27	2,32
Druckfestigkeit	47	41	51

Mauerwerksbruch**Mischzeit 2 min**

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,17	2,2	2,13
Druckfestigkeit	30	33	32

Mischzeit 5 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,17	2,21	2,13
Druckfestigkeit	29	29	28

Tabelle 2: Druckfestigkeiten und Festbeton Rohdichten der Serie 1

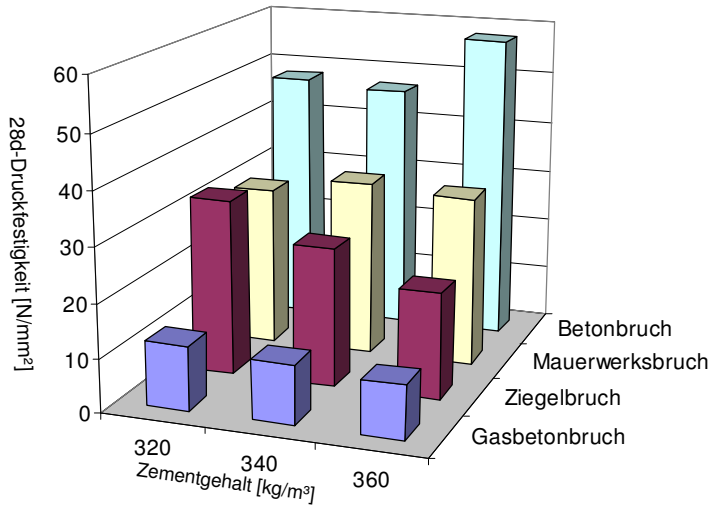


Abb. 25
Druckfestigkeiten am Festbeton mit verschiedenen RC-Zuschlägen in Abhängigkeit vom Zementgehalt:
Mischzeit: 2 min

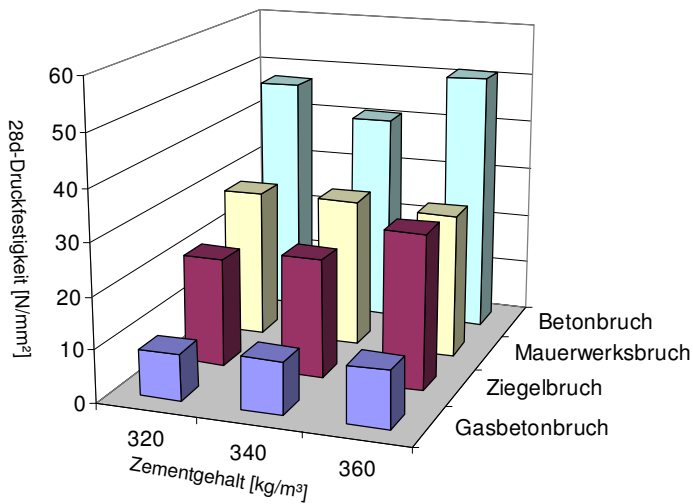


Abb. 26
Druckfestigkeiten am Festbeton mit verschiedenen RC-Zuschlägen in Abhängigkeit vom Zementgehalt:
Mischzeit: 5 min

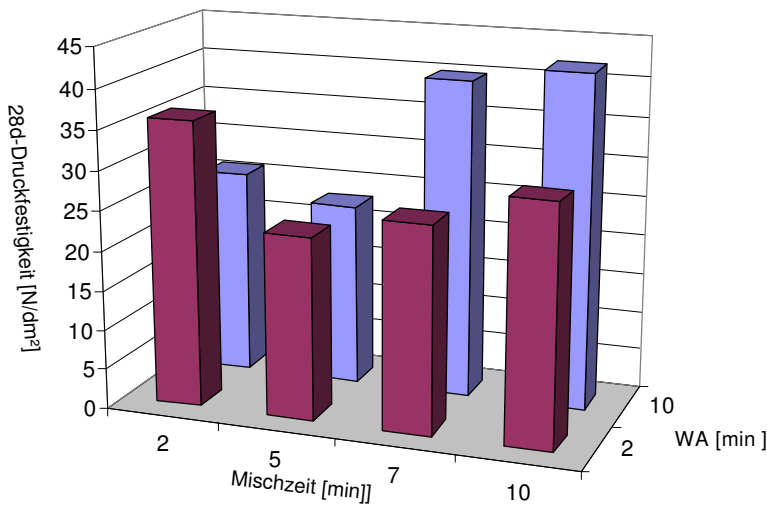


Abb. 27
Druckfestigkeiten am Festbeton in Abhängigkeit von der Mischzeit mit dem RC-Zuschlag
Ziegelbruch

Die Ergebnisse aus Tabelle 2 sind in den Abbn. 25-27 zur Verdeutlichung noch einmal grafisch dargestellt.

Eine Erhöhung des Zementgehaltes bringt im Fall niedriger Mischzeiten (Abb. 25) nur bei Betonbruch als RC-Material eine Verbesserung der Druckfestigkeiten. Mit Zementgehalten von 360 kg/m^3 erreicht man bereits annähernd die geforderten Werte von 60 N/mm^2 . Allerdings scheinen hierbei längere Mischzeiten schädlich zu sein, weil bereits nach 5 Minuten Mischen die Festigkeiten wieder abnehmen (Abb. 26).

Sowohl bei Mauerwerksbruch als auch bei Gasbetonbruch hat ein höherer Zementgehalt kaum einen Einfluß auf die Festigkeiten. Bei Verwendung von Gasbetonbruch liegen die Maximalwerte der Festigkeiten im Bereich von 10 N/mm^2 und sind damit indiskutabel.

Interessant ist der Einfluß der Mischzeiten auf das Ergebnis bei Ziegelbruch als RC-Material. Bei kurzen Mischzeiten nehmen die Festigkeiten mit zunehmendem Zementgehalt ab. Erhöht man die Mischzeiten (hier zunächst auf 5 Minuten), zeigt sich der umgekehrte Effekt.

Aus der Tabelle 1 geht hervor, dass die Wasseraufnahme der Ziegel nach 10 Minuten noch nicht abgeschlossen ist. Unter Umständen sind deshalb die Mischzeiten für einen optimalen Wassergehalt des Ziegelsplitts nicht ausreichend (siehe Kap. 3.3). Aus diesem Grunde wurden mit Ziegelbruch-RC-Material weitere Versuchen mit längeren Mischzeiten (7 und 10 min) durchgeführt.

Desweiteren wurde eine Serie mit Ziegelbruch und den Mischzeiten 2, 5, 7 und 10 Minuten durchgeführt, jetzt allerdings mit einer Vornässung die der Wasseraufnahme nach zwei Minuten entspricht. Der Rest Wasser als Differenz zum theoretisch vorbestimmten Wert wurde dann später während des Mischvorgangs zusätzlich zum Anmachwasser gegeben.

Bei diesen Versuchen wurde ein bezüglich der bis dahin zugegebenen Mengen mittlerer Zementgehalt von 340 kg/m^3 verwendet.

In Abb. 27 erkennt man, dass interessanterweise bei kleinen Mischzeiten und nur wenig Vornässung (2 min) ein relativ hoher Druckfestigkeitswert ermittelt werden konnte. Bei Erhöhung der Mischzeiten fallen die Werte zunächst ab und nehmen bei 7 und 10 min wieder zu. Der gleiche Trend zeigte sich bei längerer Vornässung (10 min) wobei allerdings zu längeren Mischzeiten hin ein höherer Absolutwert der Druckfestigkeiten erreicht wurde.

Bei Beginn des Vorhabens wurde zunächst davon ausgegangen, dass nicht die in der Pflastersteinnorm geforderten 60 N/mm^2 Druckfestigkeit als Auswahlkriterium herangezogen werden können, sondern ein Mittelwert von 45 N/mm^2 als für den anwendungsspezifischen Einsatz als ausreichend erachtet werden muss. Dieses selbst definierte erste Ziel scheint

hier bereits zur Herstellung eines RC-Beton-Pflasterstein unter Verwendung von Ziegelbruch erreicht zu sein. Allerdings sind die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit einer Vornässzeit von 10 min und einer ebenso langen Mischzeit unter Verwendung eines relativ hohen Zementgehalts von 340 kg/m^3 (oder sogar mehr) noch nicht akzeptabel. Immerhin konnten diese Ergebnisse mit reinem Ziegelbruch als RC-Material ohne Verwendung anderer Zusatzstoffe erreicht werden.

3.1.2. Sieblinie in Abhängigkeit von der Mischdauer (HCl-Aufschlüsse)

Theoretisch ist zu erwarten, dass mit zunehmender Mischdauer eine Zerkleinerung der RC-Zuschlagsfraktionen erfolgen wird. Bereits im mikroskopischen Bild zeigt sich dieser Effekt, der besonders bei den Ziegelsplittfraktionen gut sichtbar ist. In Abb. 28 sind bei einer Mischung mit Ziegelsplitt als Grobzuschlag nach 10 min Mischzeit kleinere Partikel unter 1 mm erkennbar. Es konnte allerdings festgestellt werden, dass auch bei kürzeren Mischzeiten durchaus Abrieb von Ziegelteilchen auftritt, ohne durch reine mikroskopische Auswertungen einen qualitativen Wert angeben zu können.

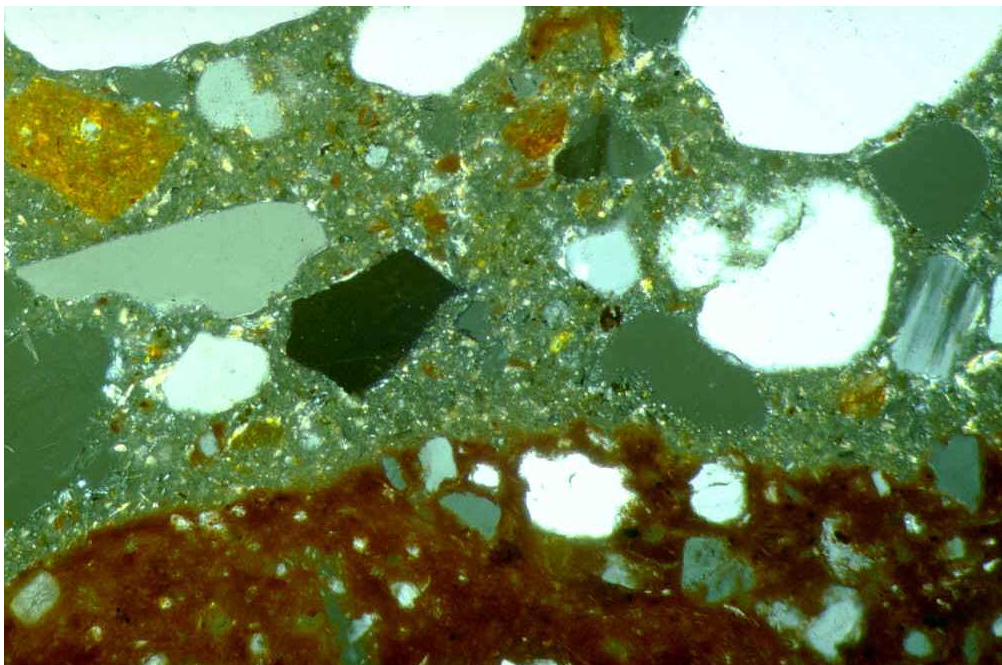
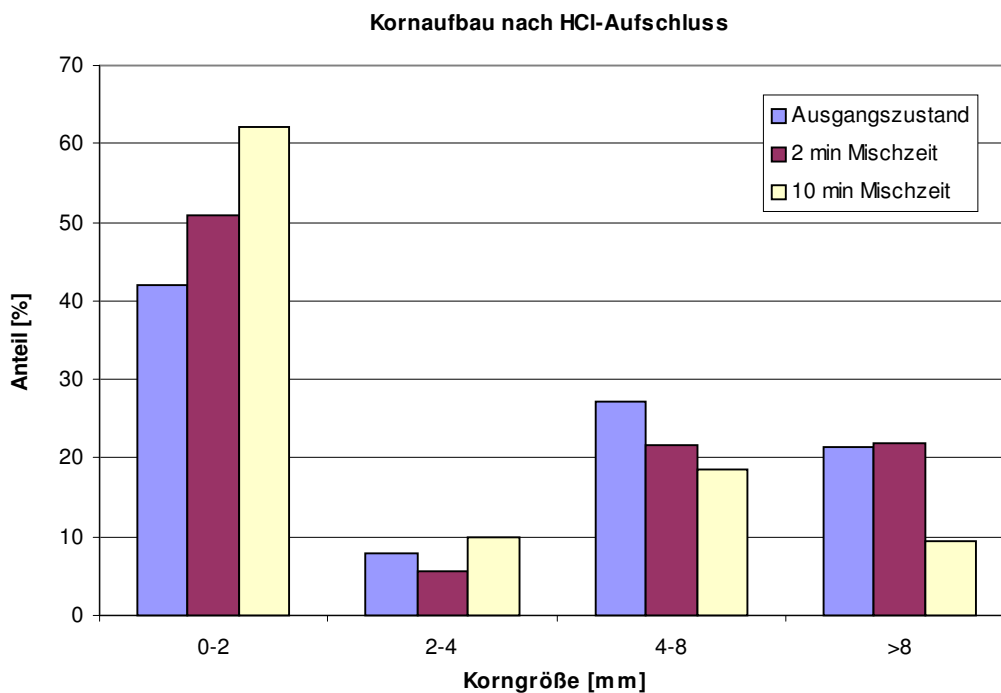


Abb. 28: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
Nach einer 10 minütigen Mischzeit sind kleine Ziegelabriebteilchen < 1mm zu erkennen. Sie stammen aber offenbar nicht von dem im unteren Teil des Bildes erkennbaren dunkelroten Ziegelzuschlag, sondern haben eine hellere Ziegelvariation als Ursprung.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

Um einen Eindruck vom Ausmaß der Zuschlagverfeinerung zu erhalten, wurden Aufschlüsse von zwei ausgehärteten Proben mit Ziegelsplitt als RC-Zuschlag, aber mit unterschiedlichen Mischzeiten (2 und 10 min) vorgenommen. Dabei wurde die Auflösung aus thermisch vorbehandeltem Material mit verdünnter Salzsäure vorgenommen.

Im Sandanteil der Probe mit 10 min Mischdauer war objektiv etwas mehr Ziegelbruch erkennbar. Die abschlämmbaren Teile wurden nicht bestimmt.

In Abb. 29 sind in der grafischen Darstellung beide Sieblinien der Ausgangssieblinie gegenübergestellt.



Abb, 29: Vergleich der Sieblinien nach zwei verschiedenen Mischzeiten (2 und 10 min) mit der Ausgangssieblinie des Ziegelsplitt-RC-Materials

Man erkennt, dass durch das Mischen das Ziegelsplitt-RC-Material deutlich verfeinert wird. Bei den Grobfractionen größer als 8 mm beginnt die Verfeinerung erst bei längeren Mischzeiten. Die Fraktion 4-8 mm verfeinert sich bereits zu Beginn des Mischprozesses kontinuierlich mit der Zeit. Die feinere Fraktion 2-4 mm vergrößert sich mit zunehmender Mischdauer offenbar mit dem neu entstandenen Anteil aus den gröberen Fraktionen >4 mm. Im Ergebnis des Verfeinerungsprozesses wird jedoch der Sandanteil kleiner als 2 mm mit zunehmender Mischdauer erheblich erhöht.

Dieses Ergebnis bezieht sich ausschließlich auf den Ziegelsplitt als RC-Zuschlag. Aufschlussversuche mit Betonbruch-RC-Material als Zuschlag wurden nicht vorgenommen, weil kein interpretierbares Ergebnis erwartet werden kann. Die Altmatrix der Zuschlagkörner

würde ebenfalls ausgelöst. Die dadurch entstehende Sandfraktion kann nicht mehr vom Ausgangssand unterschieden werden.

3.2. Mikroskopische Untersuchungen

3.2.1. Kryo-mikroskopische Untersuchungen am Frischbeton

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens war es, die technologisch empirisch durchzuführenden Versuchsreihen mikroskopisch zu begleiten und zu lenken.

Zusätzlich zu den Untersuchungen mit Hilfe der Licht- und Rasterelektronenmikroskopie wurden durch den Einsatz der Kryo-Präparation Voruntersuchungen am Frischbeton zu den Wechselwirkungen im Grenzbereich zwischen Matrix und Zuschlag durchgeführt in der frühen Phase der Abbindung.

Wasser oder andere Flüssigkeiten sind, aufgrund des geringen Dampfdruckes nicht vakuumbeständig. Die Untersuchung feuchter Proben ist daher in einem herkömmlichen Rasterelektronenmikroskop (REM) nicht möglich.

Heute ist die Untersuchung feuchter Proben durch die Entwicklung der Kryo-Präparation in der Elektronenmikroskopie problemlos möglich und eröffnet somit völlig neue Möglichkeiten, z.B. bei der Visualisierung von Vorgängen der Wechselwirkung zwischen Zementmatrix und porösem Recycling- Zuschlag oder der Feuchtigkeitsverteilung im Recycling-Zuschlag selbst. Abbindevorgänge und Hydratationsprozesse innerhalb der ersten Stunden sind ebenfalls somit darstellbar.

Bei der Kryo-Präparation wird in einem Vakuumrezipienten ca. 100ml flüssiger Stickstoff durch das Entziehen der Verdampfungswärme von -196°C auf ca. -210°C abgekühlt. Dabei bildet sich fester Stickstoff, der sogenannte Slush-Stickstoff (Slush- N_2). Nach Belüften des Präparationsrezipienten wird in dieses Gemisch aus flüssigem und festen Stickstoff das Probenmaterial eingetaucht und eingefroren. Durch die Benutzung von Slush- N_2 wird das Auftreten des Leidenfrost'schen Phänomens, d. h. die Bildung einer wärmeisolierenden Gas-haut um das Präparat, weitgehend unterdrückt.

Die Einfriergeschwindigkeit der Porenfeuchtigkeit ist von entscheidender Bedeutung für die spätere Ergebnisinterpretation. Eine niedrige Abkühlrate begünstigt die Bildung von Eiskristallen, die zu Frostsprengungen oder anderen Artefakten führen würden. Bei einer hohen Abkühlrate, wie sie durch den direkten Kontakt mit dem Slush- N_2 erzeugt wird, erstarrt das

Porenwasser weitgehend in einem amorphen, glasähnlichen Zustand. Durch die Verhinderung der Eiskristallbildung ist somit eine praktisch artefaktfreie Fixierung der Feuchtigkeit gegeben.

Die so fixierten Proben wurden anschließend unter Weiterkühlung im Rasterelektronenmikroskop bei ca. -130 °C untersucht.

Nach den Ergebnissen der technologischen Prüfungen wurde besonderes Augenmerk auf die Ziegelbruchstücke gelegt. Zunächst wurde die Variante mit 10 min Vornässung und 2 min Mischzeit 30 min nach Anmachen in der obigen Weise kryo-präpariert und im Rasterelektronenmikroskop untersucht.

Abb. 30 zeigt die Matrix des frischen Betons in einer Übersicht bei 100facher Vergrößerung. Die Einzelkomponenten liegen noch wie eine lockere Schüttung nebeneinander. In höherer Vergrößerung (Abb. 31) sind ebenfalls noch keine Reaktionsprodukte erkennbar.

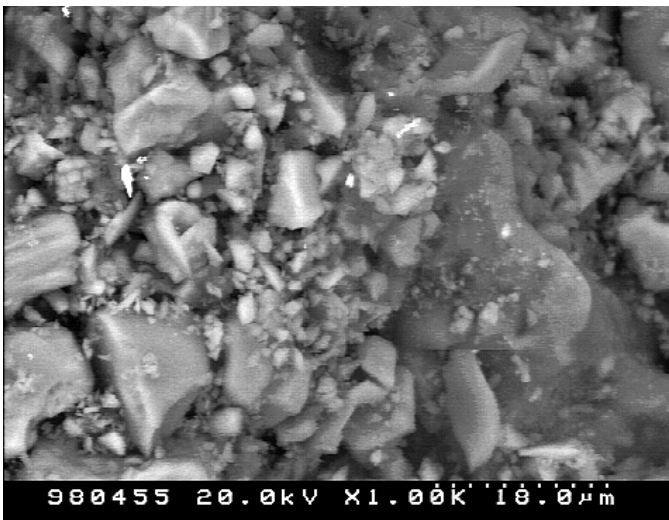


Abb. 30: Kryo-REM-Aufnahme (RE)
CEM III, 2 min Vornässung, 30 min nach
Ansatz, Matrix des Frischbetons
Vergr.: 1000x

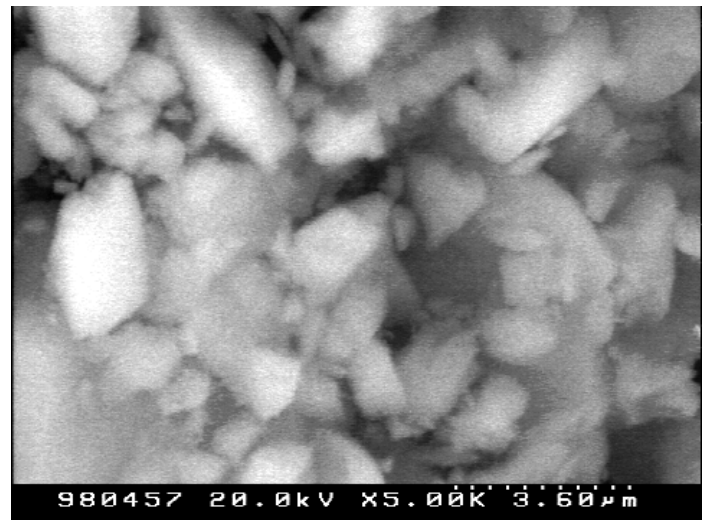


Abb. 31: Kryo-REM-Aufnahme (RE)
Ausschnitt aus Abb. 30, es sind noch keine
chem. Reaktionsprodukte erkennbar.
Vergr.: 5000x

In Abb. 32 ist der Übergang von einem RC-Ziegelbruchteilchen zur Frischbetonmatrix dargestellt. Im linken Bildteil erkennt man den porösen Ziegel, der noch mit einer scharfen Grenze zur Frischmatrix getrennt ist. Bei höherer Vergrößerung der Grenzfläche (Abb. 33) sind auch hier noch keine chemischen Reaktionsprodukte erkennbar.

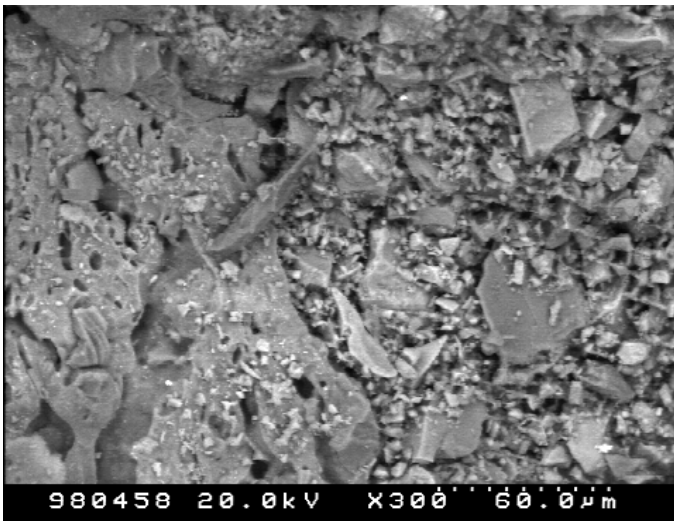


Abb. 32: Kryo-REM-Aufnahme (RE)
Übergang Ziegel/Frischmatrix: links ist der poröse Ziegel zu erkennen, rechts die Frischbetonmatrix
Vergr.: 300x

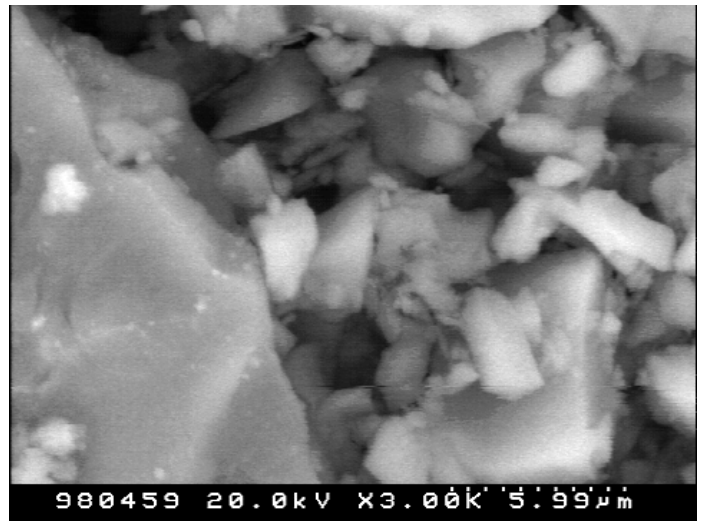


Abb. 33: Kryo-REM-Aufnahme (RE)
Übergang Ziegel/Frischmatrix, Ausschnitt aus Abb. 32, noch keine Reaktionsprodukte
Vergr.: 3000x

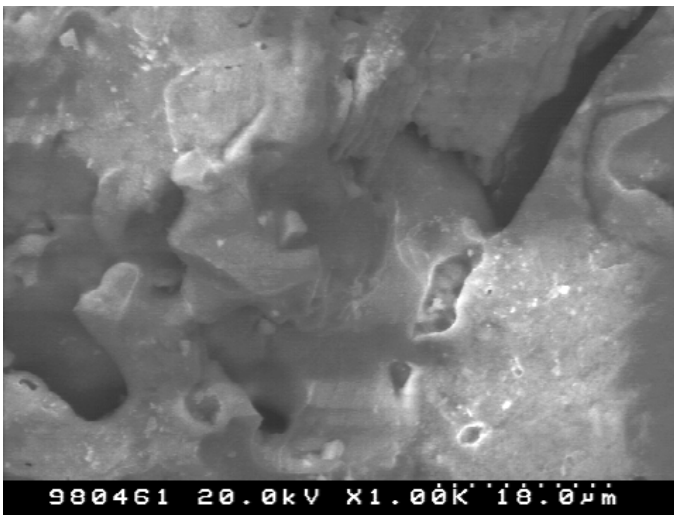


Abb. 34: Kryo-REM-Aufnahme (RE)
flüssiges Wasser im Porenraum des Ziegels (dunkle Masse)
Vergr.: 1000x

Im Ziegelmaterial selbst ist jedoch das während der Vornässung aufgenommene Wasser zu finden, was innerhalb der ersten 30 min noch nicht an die Betonmatrix abgegeben wurde (Abb. 34). Das steht im Einklang mit den technologischen Ergebnissen aus Kap. 3.2., wonach eine kurze Mischzeit bei der Verwendung von Ziegelbruch zu einer überraschend hohen Druckfestigkeit führt. Offenbar gibt der Ziegel bevorzugt bei mechanischer Beanspruchung bei immer neuem Kontakt mit trockenen Matrixbereichen seine Feuchtigkeit ab, während sich bei statischem Verbleib in der

Mischung relativ schnell ein Gleichgewichtszustand einstellt.

Als nächstes wurde ein Vergleich der unterschiedlichen Varianten der Serie mit den vier verschiedenen RC-Zuschlägen durchgeführt.

Die Kryo-Fixierung erfolgte diesmal 2,5 Stunden nach Anmachen der RC-Beton-Mischung, die Vornässung betrug wiederum 10 min, die Mischzeit 2 min, der Zementgehalt 340 kg/m^3 .

Zunächst sei wiederum die Variante mit Ziegelbruch dargestellt.

Abb. 35 zeigt den Übergang eines Ziegelbruchstücks zur Frischbetonmatrix. Nach 2,5 Stunden zeigt sich bereits eine leichte Verdichtung des Gefüges. In höherer Vergrößerung (Abb. 36) erkennt man bereits erste Portlanditkristalle, wobei der Übergang vom Ziegel zur Matrix allerdings noch als scharfe Grenze zu erkennen ist. In Abb. 37 und 38 ist dieser Übergang noch einmal näher dargestellt. An der Oberfläche des (in diesem Fall relativ dichten) Ziegels haben sich erste Hydratprodukte gebildet (Abb. 38).

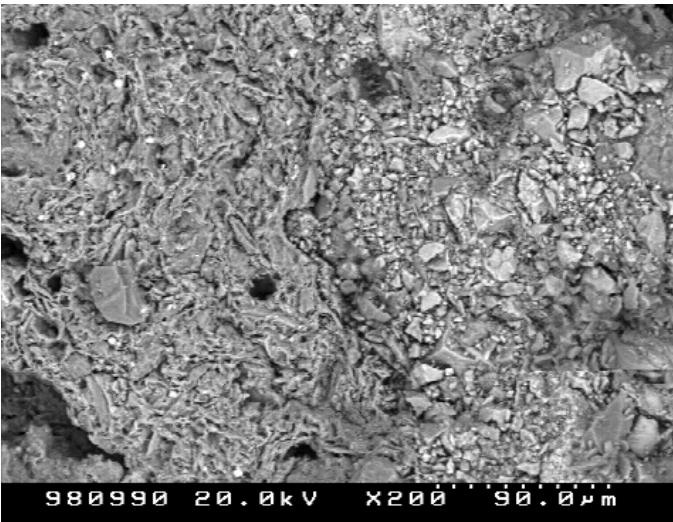


Abb. 35: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Ziegelstück (links) zur Frischmatrix (rechts)
Vergr.: 200x

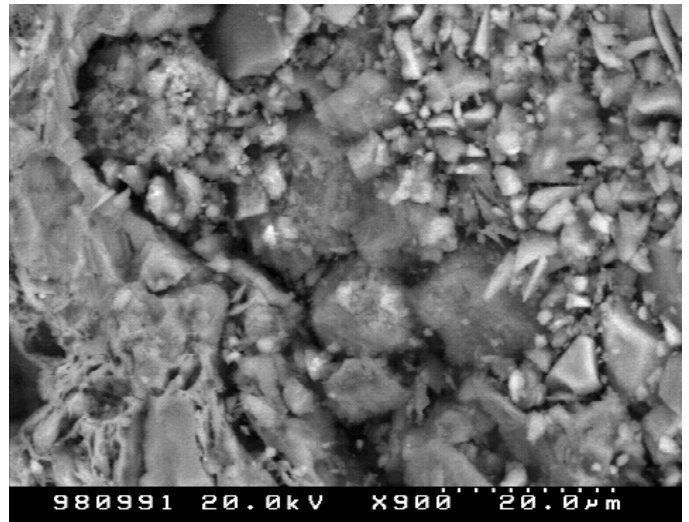


Abb. 36: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Ausschnitt aus Abb. 35, im Übergangsbereich erhöhte Porosität mit verbliebener Restfeuchte, in der Frischmatrix sind bereits erste Portlandite als spitze Kristalle zu erkennen
Vergr.: 900x

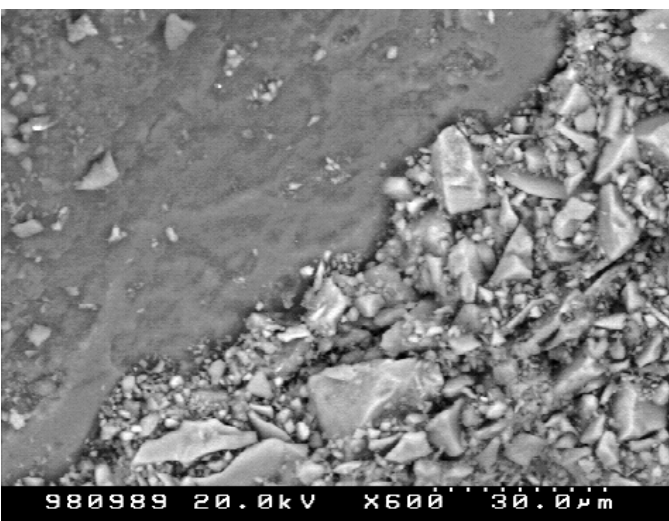


Abb. 37: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Ziegelstück (links oben) zur Frischmatrix (rechts unten)
Vergr.: 600x



Abb. 8 Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Ausschnitt aus Abb. 37, im Übergangsbereich sind erste Hydratationsprodukte entstanden
Vergr.: 6000x

Beim Betonbruch als RC-Material zeigt sich nach 2,5 Stunden ein ähnliches Bild. In den Abbn. 39-41 ist der Übergang zwischen einem Altbeton-Zuschlagsteilchen und der Frischmatrix in aufsteigender Vergrößerung dargestellt. Im Übergangsbereich scheint sich das System hinsichtlich des Wasserhaushalts ähnlich zu verhalten wie bei der Verwendung von Ziegelbruch. In Abb. 39 ist deutlich zu erkennen, dass offenbar im Übergangsbereich eine Anreicherung an Feuchtigkeit entsteht (dunkler Saum im Frischbeton). In höherer Vergrößerung (Abb. 40) zeigt sich, dass eine relativ dichte wassergesättigte Neumatrix vorliegt. Der Übergang zum trockenen Altbeton-Korn ist nur noch schwer zu erkennen. In Abb. 41 ist in noch höherer Vergrößerung der direkte Übergang dargestellt. Auch hier erscheinen erste

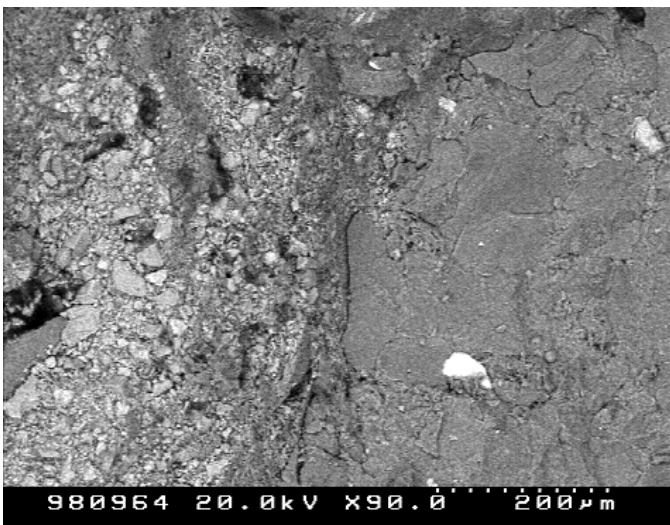


Abb. 39: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h
Übergang Betonbruch (rechts) zur
Frischmatrix (links)
Vergr.: 90x

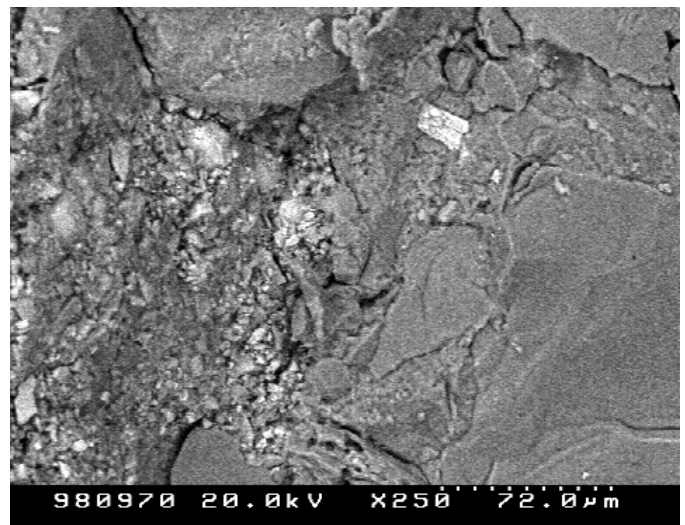


Abb. 40: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h
Ausschnitt aus Abb. 39, Übergang
Betonbruch (rechts) zur Frischmatrix (links)
Vergr.: 90x

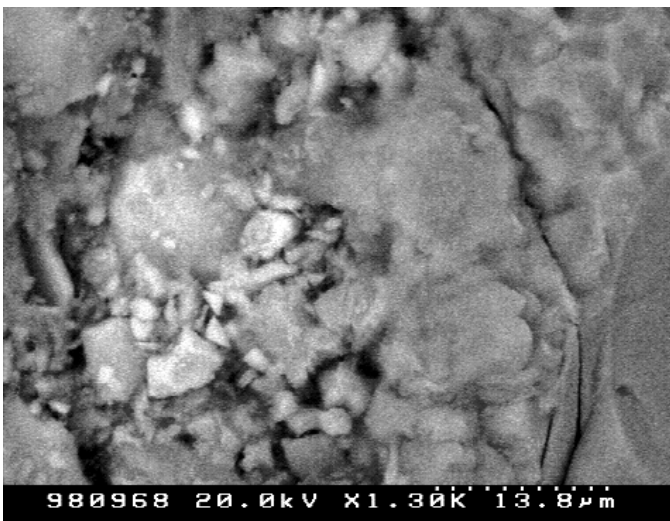


Abb. 41: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h
Ausschnitt aus Abb. 40, In der
Rückstreuelektronenabbildung erkennt man
die bereits entstandenen Hydrat-Kristalle.
Vergr.: 1300x

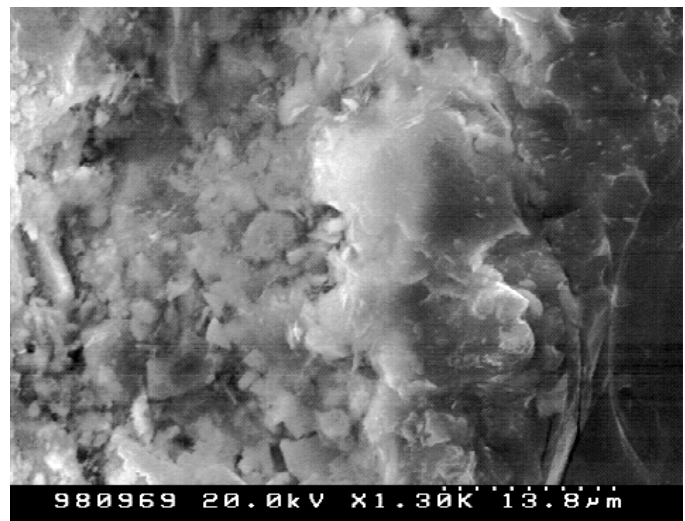


Abb. 42: Kryo-REM-Aufnahme (SE) nach 2,5 h
im Sekundärelektronenbild erkennt der
feine Hydratsaum als feste Masse (rechts
Altbeton, links frische Matrix).
Vergr.: 1300x

Hydratationsprodukte in der Frischmatrix. Die Abb. 42 zeigt die gleiche Probenstelle aus Abb. 41, allerdings mit Sekundärelektronen abgebildet. In dieser Darstellungsart überwiegt die Topographie der Probenstelle, wodurch die Porenlösung als kompakte Masse erscheint. Im Vergleich mit der Abb. 41 erhält man so eine gute Vorstellung über die tatsächlichen Feuchteverhältnisse an dieser Stelle.

Der Mauerwerksbruch (Kalksandsteinbruch) unterscheidet sich im mikroskopischen Bild signifikant von den bisher beschriebenen RC-Zuschlägen. In Abb. 43 ist wieder der Übergangsbereich vom Frischbeton (oben) zum Zuschlag dargestellt, in dem grundsätzlich ein deutlicher Risspalt auftritt. Bei höherer Vergrößerung (Abb. 44) erkennt man feinfaserige Neubildungen (vermutlich Ettringit), die aus der im Spalt ehemals befindlichen Lösung entstanden. In Abb. 45 ist eine andere Stelle gezeigt, die diese in die Neumatrix hineinwachsenden Feinkristallite nochmal deutlich zeigen. In Abb. 46 ist an einer anderen Stelle die Feuchtelösung im Spaltriss gezeigt, in der die Feinanteile des Frischbetons sozusagen noch schwimmen.

Unter diesem Gesichtspunkt wird erklärbar, warum der Mauerwerksbruch gegenüber dem Betonbruch als RC-Material in den bisherigen Versuchen keinen vergleichbaren Erfolg brachte. Offenbar nimmt er auf den Wasserhaushalt des Betons weniger Einfluß und liegt lediglich als festigkeitsarmer Zuschlag in der Neumatrix vor.

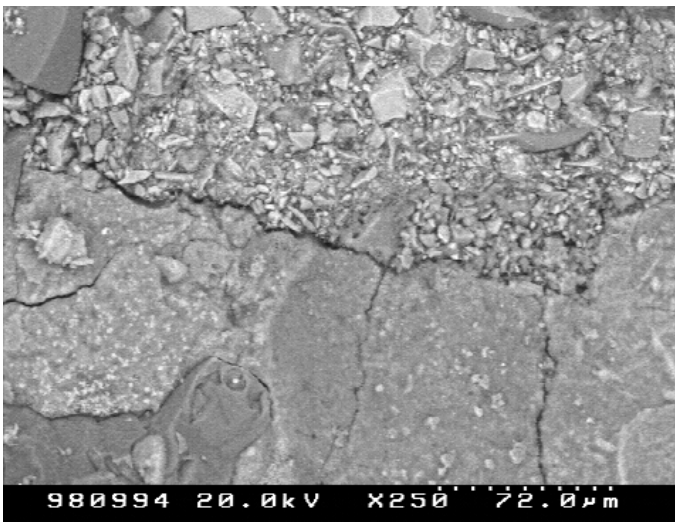


Abb. 43: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Mauerwerksbruch (unten) zur Frischmatrix (oben).
Vergr.: 250x

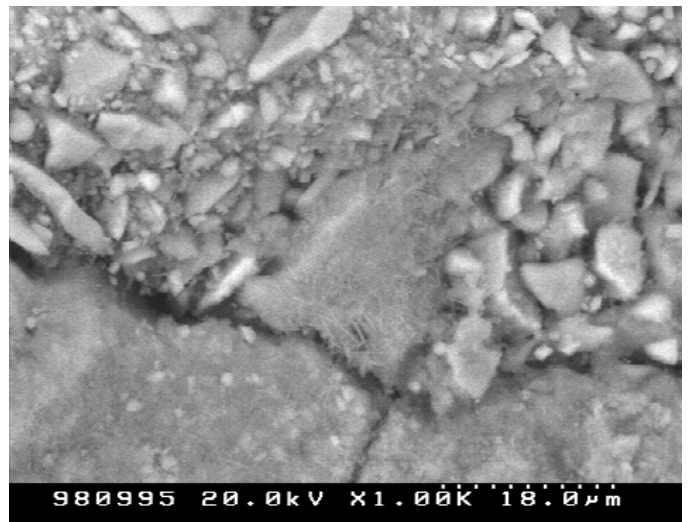


Abb. 44: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Ausschnitt aus Abb. 43, aus dem Lösungsreichen Spaltriss wachsen feine Kristallite in die Neumatrix (Ettringit ?)
Vergr.: 1000x

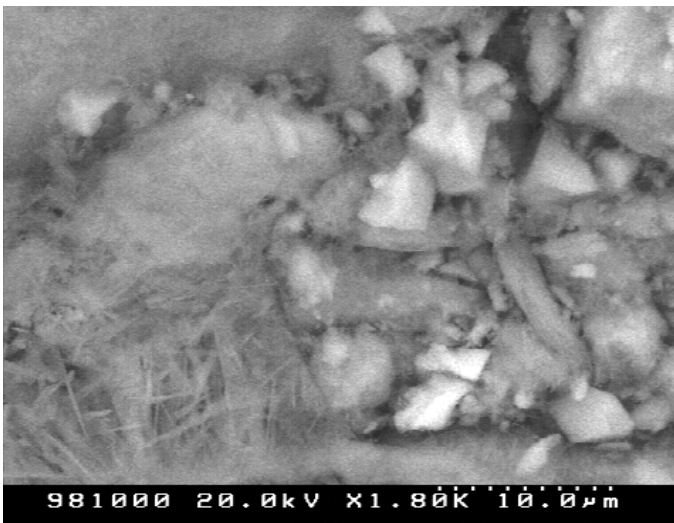


Abb. 45: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Mauerwerksbruch zur Frischmatrix (oben) mit ebenfalls feinkristallinen Neubildungen
Vergr.: 1800x

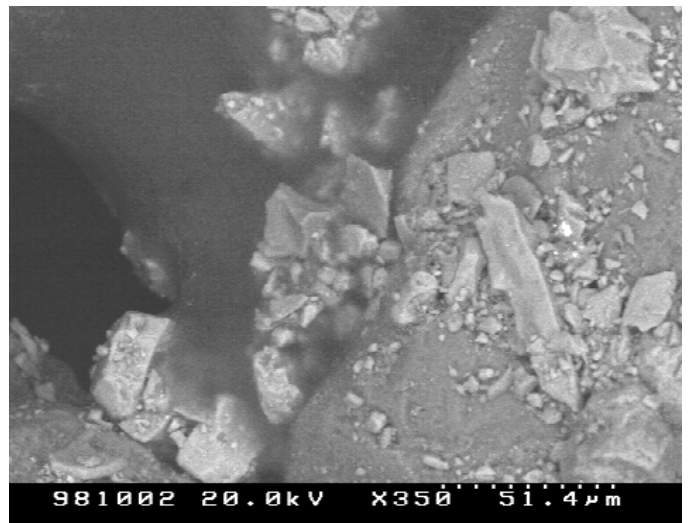


Abb. 46: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h, an anderen Stellen ist in den Spaltrissen noch die Porenlösung zu erkennen, in der die Feianteile der Matrixmischung "schwimmen"
Vergr.: 350x

Auch der Porenbeton wurde kryo-mikroskopisch untersucht und ist in den Abbn. 47-50 dargestellt. Hier zeigte sich ebenfalls, dass grundsätzlich nach 2,5 Stunden ein lösungsgefüllter Spaltriss zwischen den RC-Zuschlägen aus Gasbeton und der Frischmatrix vorliegt (Abbn. 47-48). Man bekommt den Eindruck, dass der Verbund lediglich durch mechanische Verklammerung der Frischmatrix mit der zerklüfteten Porenbetonoberfläche (vgl. Abb. 5) zustande kommt. In den Abbn. 49 und 50 ist der Übergang in höherer Vergrößerung gezeigt,



Abb. 47: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Porenbeton (unten) zur Frischmatrix (oben)
Vergr.: 130x

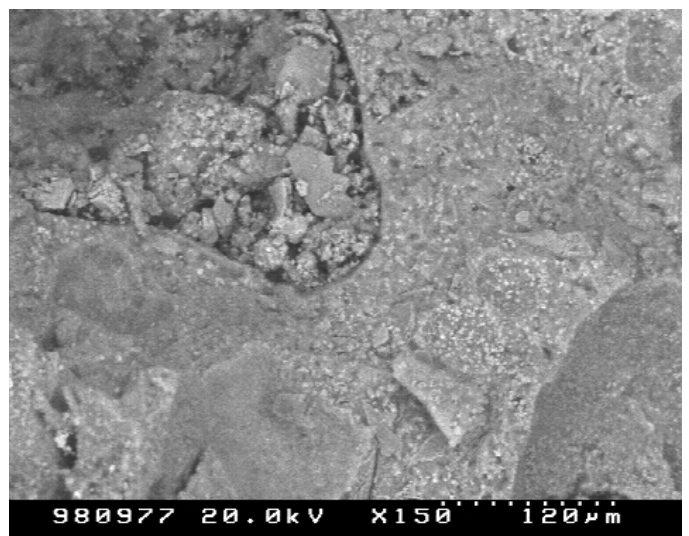


Abb. 48: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Porenbeton (unten) zur Frischmatrix (oben links), andere Stelle
Vergr.: 150x

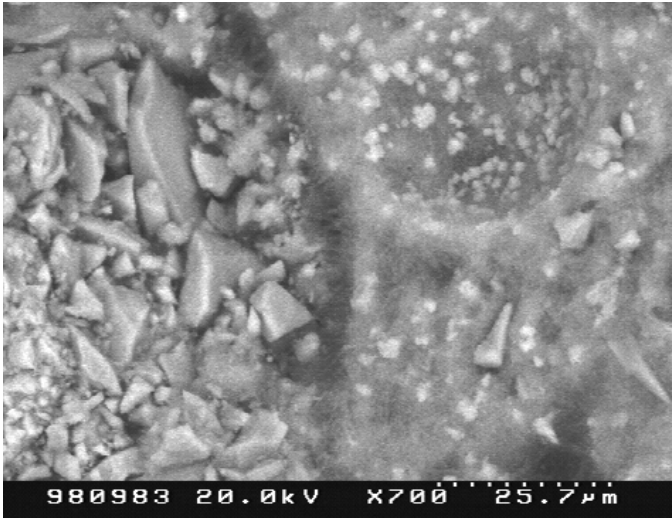


Abb. 49: Kryo-REM-Aufnahme (RE) nach 2,5 h Übergang Porenbeton (rechts) zur Frischmatrix links), im lösungsgefüllten Spalttriss ist ein Flaum von neu gebildeten Kristalliten zu erkennen.
Vergr.: 700x

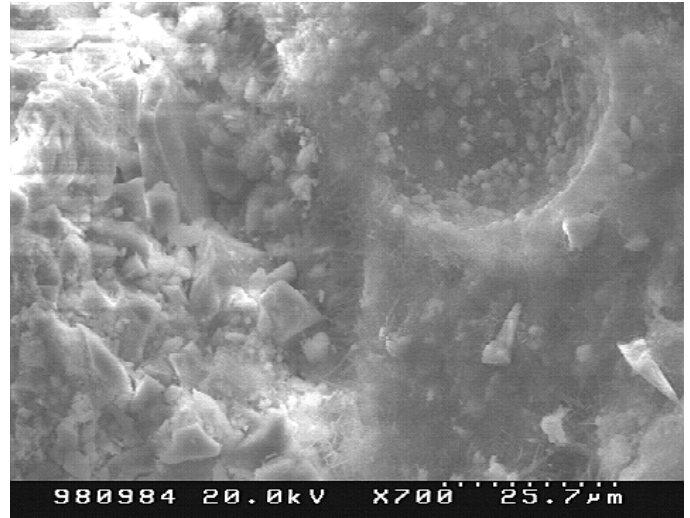


Abb. 50: Kryo-REM-Aufnahme (SE) nach 2,5 h Übergang Porenbeton (rechts) zur Frischmatrix links), im lösungsgefüllten Spalttriss ist ein Flaum von neu gebildeten Kristalliten zu erkennen.
Gleicher Bildausschnitt wie in Abb. 49, in dieser Darstellung wird deutlich, wie stark der Porenbeton (rechts) wassergefüllt ist.
Vergr.: 700x

wieder als Rückstreu- und Sekundärelektronenabbildung gegenübergestellt. Insbesondere in Abb. 50 wird deutlich, dass der Porenbeton mit Wasser gefüllt ist, was ja bereits aus der Bestimmung der Wasseraufnahme (ca. 73 %, Tabelle 1) zu vermuten war. In den ersten 2,5 Stunden seit Ansetzen ist ein regelrechter Kristallit-Flaum in den Spalt gewachsen. Ein reaktionschemischer Verbund mit der Frischbetonmatrix ist (noch) nicht zu erkennen.

3.2.2. Gefügebeurteilung der Neumatrix an Festbeton

Neben den Kryo-Untersuchungen an Frischbetonproben wurden an den Festbetonsteinen Dünnschliff-Untersuchungen vorgenommen.

Bei der Gefügebeurteilung der Neumatrix zeigt sich bei allen Proben, dass die Einstellung des Wassergehalts während der Abbindung offenbar ein großes Problem darstellt. In dieser ersten Serie mit reinen RC-Zuschlägen war grundsätzlich das Wasserangebot zu hoch.

Das beste mikroskopische Bild zeigt die Probe mit Betonbruch als Zuschlag. Der Zuschlag selbst ist (das ergaben bereits die Voruntersuchungen) von außerordentlich hoher Qualität, was sich durch den hohen Anteil an freien Naturzuschlägen darstellt. Dieser Zuschlagsanteil verhält sich natürlich wie im Normalbeton und kann auch im mikroskopischen Bild nicht davon unterschieden werden.

Ganz anders verhält es sich mit der Matrixfraktion des RC-Materials. Abb. 51 zeigt den Übergang von der neuen Bindemittelmatrix zu einem Beton-RC-Zuschlag. Die bräunliche

Verfärbung des RC-Zuschlages im polarisierten Licht zeigt die Karbonatisierung an. Ansonsten hat sich ein fester Verbund zwischen Alt- und Neumatrix eingestellt. Das entspricht dem Ergebnis der Feststoffprüfungen in Kapitel 3.1.1, wo ja bereits hohe Festigkeiten bei Verwendung reiner Betonbruch-RC-Zuschläge erreicht wurden.

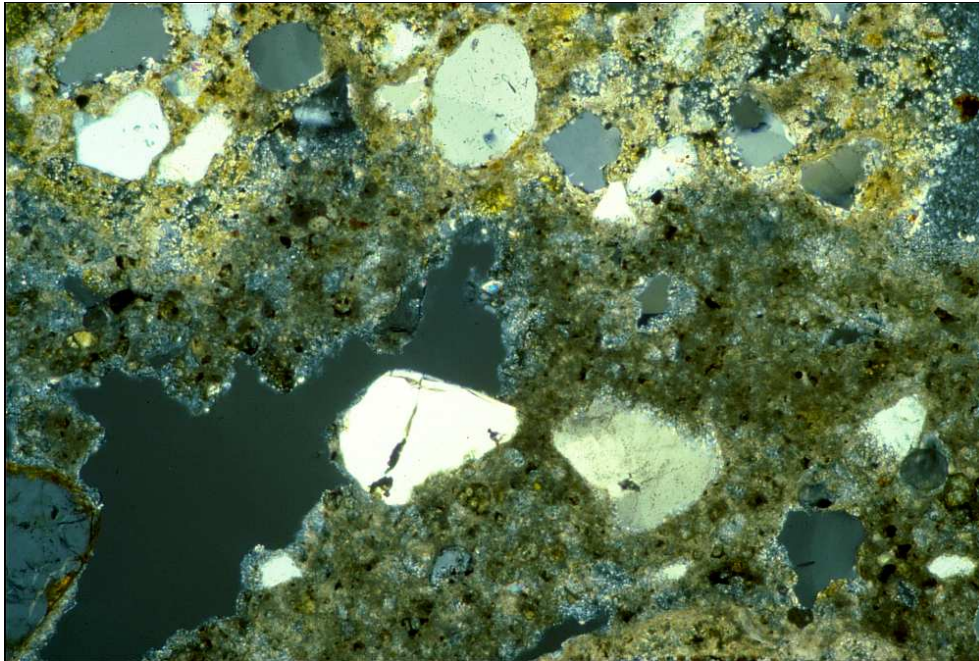


Abb. 51: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
Übergang von neu gebildeter Matrix (unten) zu altem Beton-RC-
Zuschlagskorn (oben), die bräunliche Färbung zeigt die
Karbonatisierung des RC-Teilchens an, der Verbund zwischen Alt-
und Neumatrix ist intakt.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

Die Zuschläge Kalksandsteinbruch und insbesondere Porenbetonbruch zeigen eine schlechte Anbindung der Neumatrix an die Altzuschläge. Das wird auch durch die schlechten mechanischen Ergebnisse unter Punkt 1 bestätigt.

Abb. 52 zeigt ein Mauerwerkbruch-RC-Korn eingebettet in neuer Matrix. Man findet Porenanreicherungen um das Korn herum, wobei sich offenbar direkt um das RC-Korn ein feiner Zementsaum angeheftet hat. Das läßt darauf schließen, dass das RC-Korn sein Wasser sehr schnell abgegeben hat, wodurch sich diese Zementschlämme gebildet hat. Allerdings hat überschüssiges Wasser dabei zu der ungünstigen Porenbildung beigetragen.

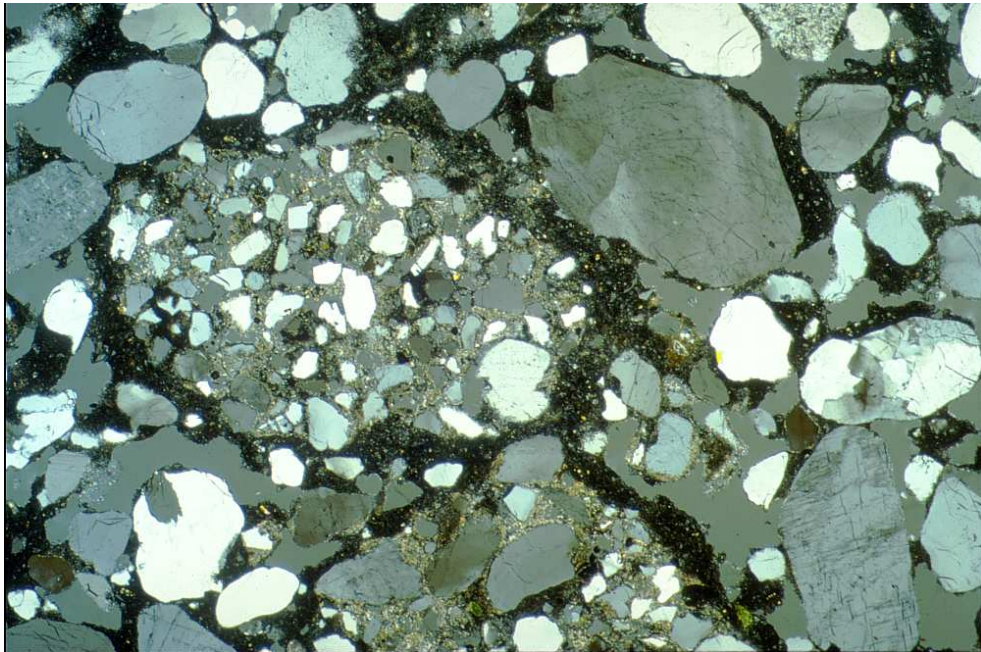


Abb. 52: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff Mauerwerksbruch-RC-Korn eingebettet in neuer Matrix, um das Korn herum hat sich eine feine Zementschlämme abgesetzt, auffallend ist die sich daran anschließende die Porenanreicherung um das Korn.
[PolMi +, Bildbreite: 5,2 mm]

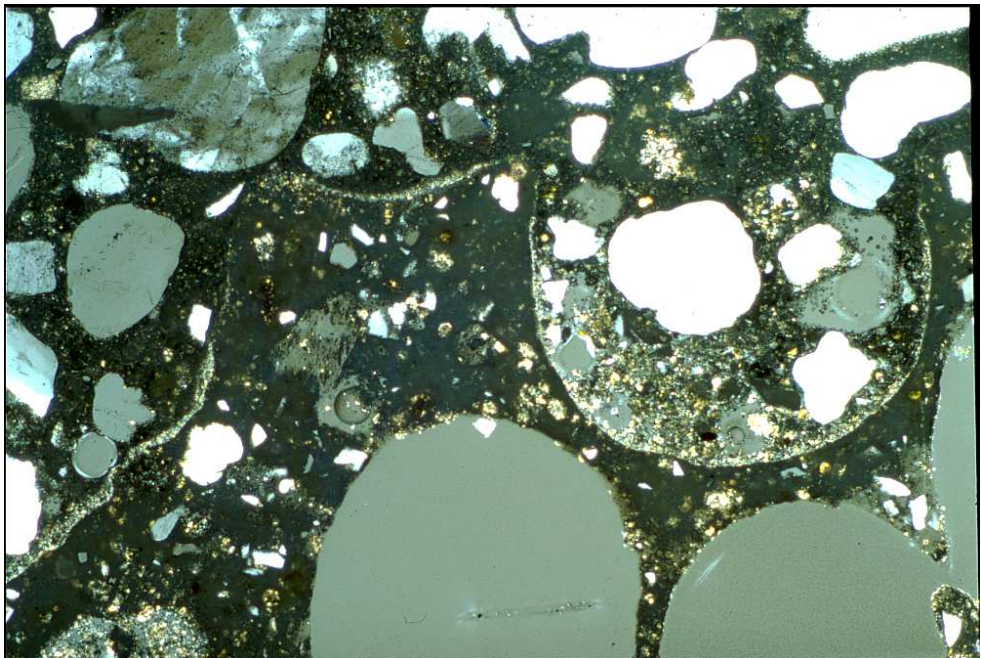


Abb. 53: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff Übergang vom Porenbeton-RC-Korn (unten) zur neuen Betonmatrix, an der Grenze hat sich eine Kalkhaut gebildet.
[PolMi +, Bildbreite: 2,6 mm]

In Abb. 53 ist die Gefügesituation im Übergangsbereich um ein Porenbeton-RC-Teilchen zur Neumatrix dargestellt. Wie zu erwarten stellt sich eine mechanische Verklammerung der Neumatrix in den Oberflächenporen des Porenbetons ein. Am direkten Übergang bildet sich eine Kalkhaut, die eine feste Verbindung vermuten läßt. Auch in diesem Fall ist ein erhöhter Porenraum beobachtet worden. Das in Kapitel 3.1.1 beschriebene komplette Versagen mit reinem Porenbetonbruch als Zuschlag ist vermutlich auf die geringe Festigkeit des Materials zurückzuführen.

Die Proben mit Ziegelsplitt als Zuschlag zeigen zum Teil eine sehr gute Anbindung der Neumatrix an die Ziegelzuschlagsoberfläche mit einer scheinbar guten mechanischen Verklammerung. Es treten aber Veränderungen des Mikrogefüges der Neumatrix an der Grenzfläche Ziegelzuschlag zur neuen Matrix auf, die nach dem mikroskopischen Bild auf einen erhöhten Wassergehalt (Durchhydratation kleinerer Zementkörner) zurückzuführen sind. In Abb. 54 ist der Übergang von Ziegelbruch-RC-Korn zur Neumatrix dargestellt. Der helle Saum an der Grenzfläche deutet auf eine erhöhte Dichte mit feinen CSH-Kristallbildungen hin. In höherer Vergrößerung (Abb. 57) wird deutlich, dass die feinen Zementkörner in diesem Bereich durchhydratisiert sind, während sie weiter entfernt noch unhydratisiert (vermutlich nur randlich hydratisiert) vorliegen.

Allerdings ist an anderen Stellen auch eine Wassersackbildung um die RC-Zuschläge zu beobachten, was darauf hindeutet, dass der Wasseraustausch von Ziegelzuschlag zur Neumatrix lokal zu unterschiedlichen Effekten führt. Die kryo-mikroskopischen Untersuchungen in Kapitel 3.2.1 haben gezeigt, daß die Ziegelsplittkörner eine große Menge freien Wassers speichern können. Dieses Wasser kann zu früh während der Abbindungsphase an die frische Bindemittelmatrix abgegeben werden. Ideal wäre eine "innere Nachbehandlung" zu einem späteren Zeitpunkt, die dann zu Gefügebildungen wie in Abb. 54 und 55 führt.

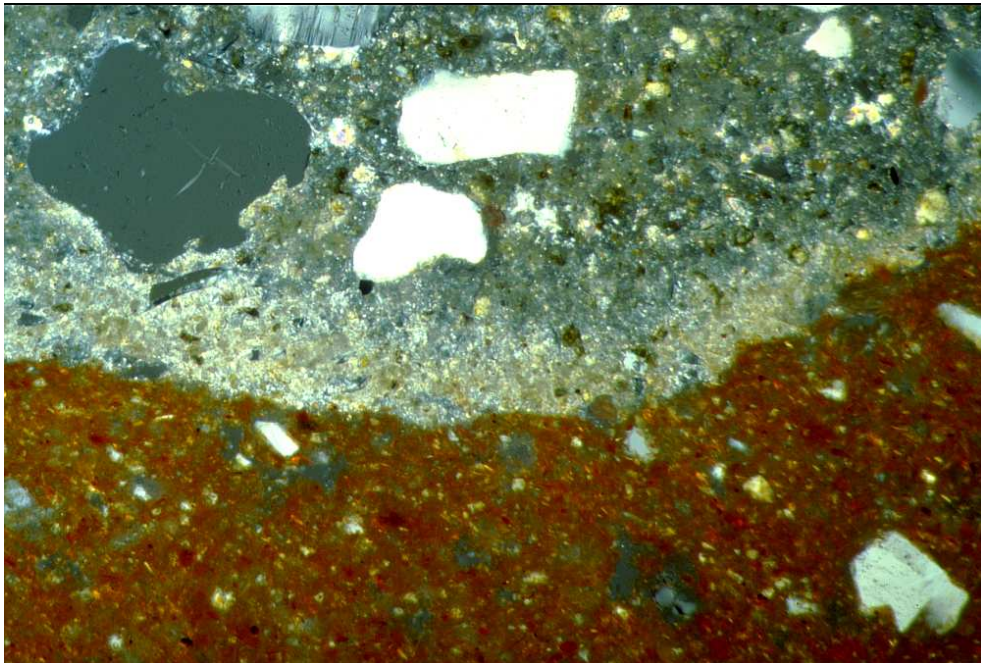


Abb. 54: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
Übergang eines Ziegelbruch-RC-Korn (unten) zur neuen
Betonmatrix, im Übergangsbereich hat sich eine hell erscheinende
dichte Zone gebildet.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

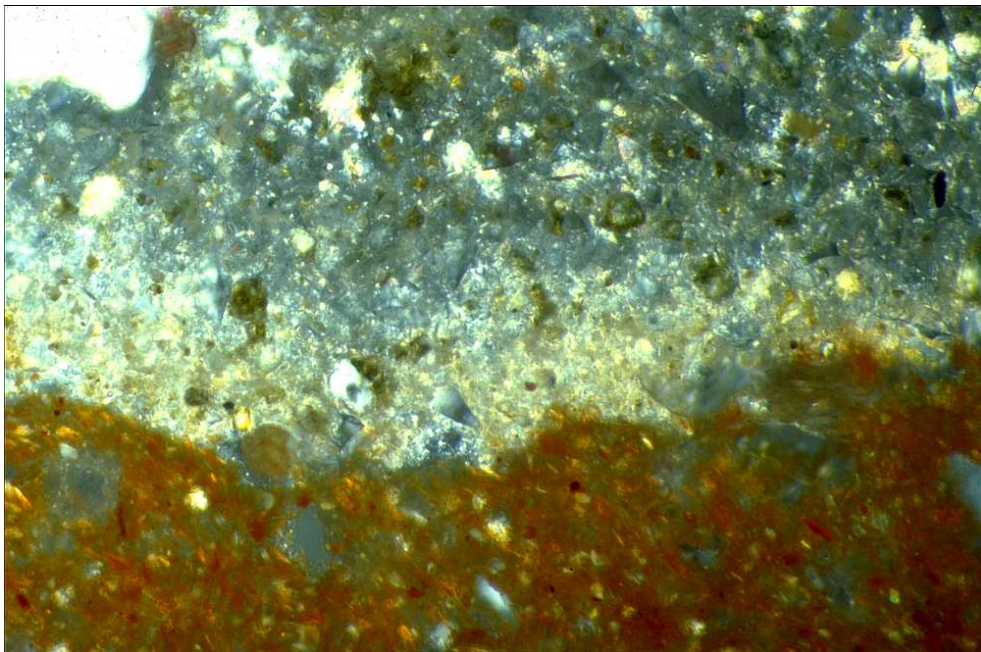


Abb. 55: Ausschnitt aus Abb. 54
in höherer Vergrößerung wird erkennbar, dass in der hellen Zone
kaum noch unhydratisierte Zementkörner vorliegen.
[PolMi +, Bildbreite: 0,68 mm]

3.2.3. Einfluß der Vornässung und Mischzeiten bei unterschiedlichem Ziegelmaterial

Die Erkenntnis aus den beiden vorherigen Kapiteln führte letztendlich zu der Entscheidung, für den Ziegelsplitt den Einfluss der Vornässung und der Mischzeiten auch mikroskopisch zu beschreiben.

Bereits aus Abb. 7 geht hervor, dass der verwendete Ziegelsplitt aus unterschiedlichen Ziegel-Varietäten besteht. Es liegen rote, relativ dicht erscheinende Varianten bis zu gelben, sehr offenporig zu beschreibende Körner vor. Man kann rein mikroskopisch auf Grund der Farbe und der Gefügezusammensetzung drei unterschiedliche Varietäten unterscheiden, die in Abb. 56-58 gezeigt sind. Die dichte dunkelrote Variation (Abb. 56) hat einen im Vergleich zu den anderen Ziegelvarianten hohen Anteil relativ grober Quarzkörner. Die wegen ihrer geringeren Brenntemperatur und ihrem höheren Tongehalt heller rot erscheinenden Ziegel (Abb. 57) dagegen enthalten Quarze mit deutlich kleineren Durchmessern, wobei auch der Porenraum als offener beschrieben werden kann. Die hellrote bis gelbe Variante (Abb. 58) hat demgegenüber einen deutlich geringeren Quarzanteil, wobei auch gröbere Poren auftreten. Die helleren Farben deuten auf höheren Tongehalt und/oder geringe Brenntemperaturen hin, die wiederum geringe Festigkeiten und Rohdichten verbunden mit großem Porenraum nach sich ziehen.

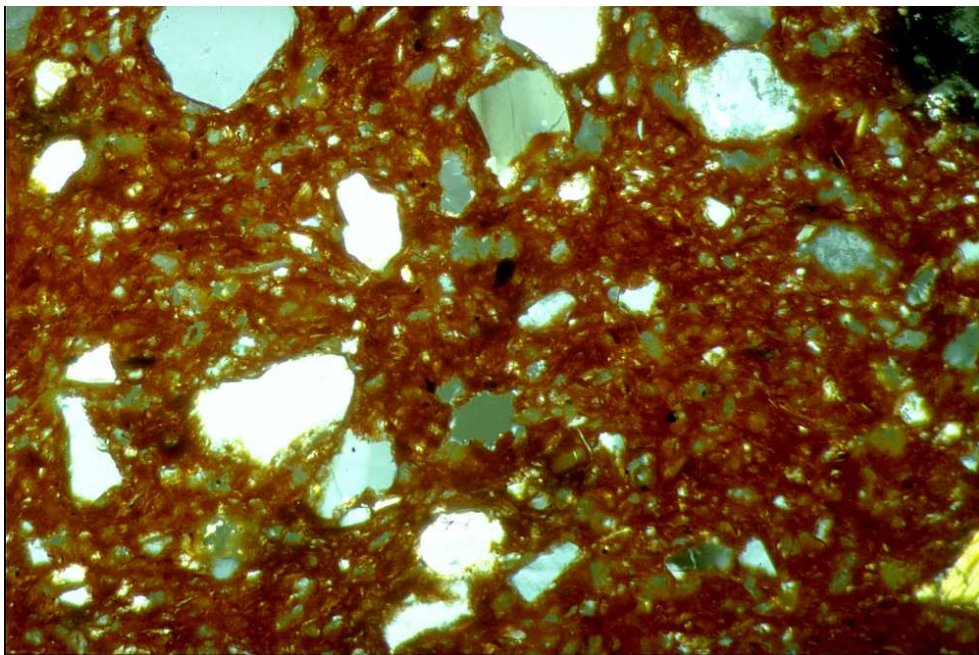


Abb. 56: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff dunkelrotes Ziegelsplitt-RC-Korn mit relativ großen Quarzkörnern (vgl. Abb. 57), das Gefüge dieser Variation erscheint sehr dicht. [PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

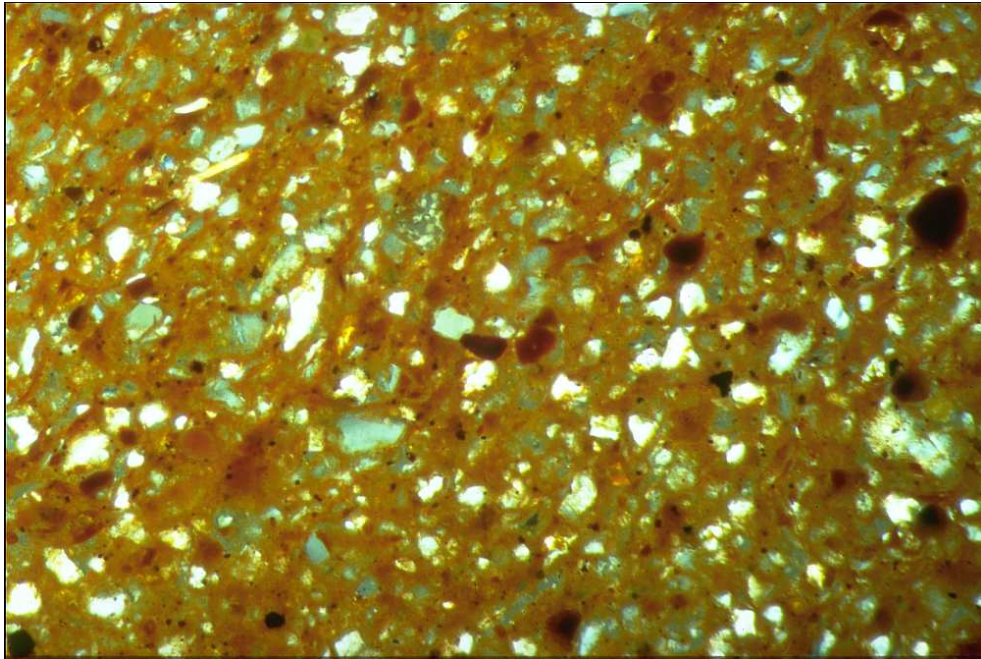


Abb. 57: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
Die rote Variante enthält feinere Quarzkörner, erscheint aber insgesamt nicht so dicht wie die Variation in Abb. 56
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

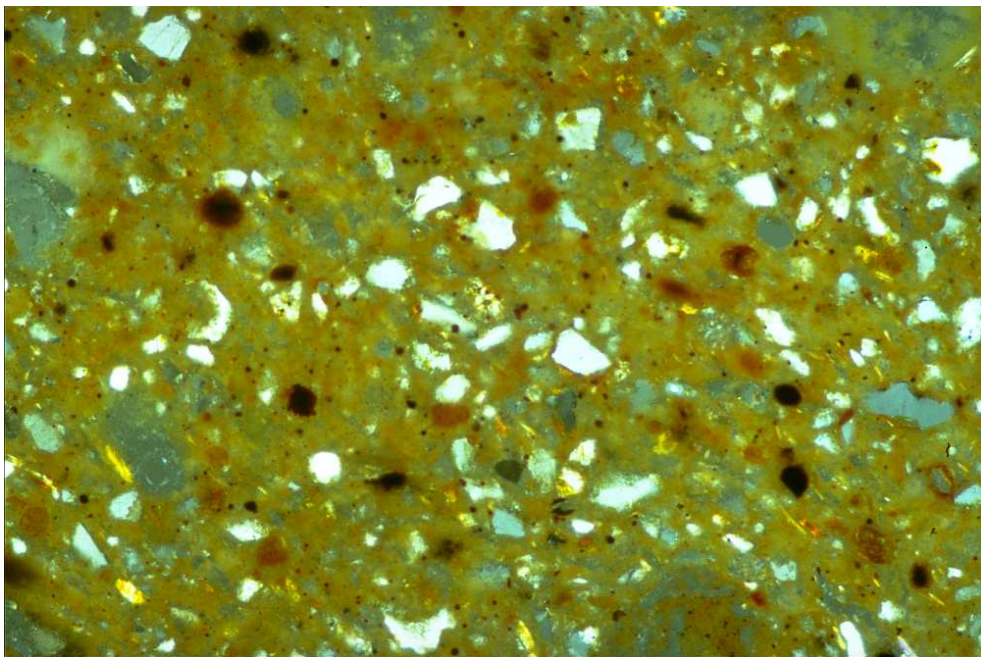


Abb. 58: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
Die hellrote bis gelbe Variante hat einen geringeren Quarzanteil und weist deutlich gröbere Poren auf. Auf Grund der geringeren Brenntemperatur sind noch tonige Anteile vorhanden.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

Systematische Untersuchungen zum Saugvermögen dieser einzelnen Variationen wurden nicht durchgeführt, da auch bei der praktischen Anwendung des Ziegelsplitt-RC-Materials auf die Zusammensetzung kein Einfluss genommen werden kann.

Zunächst können mikroskopisch die in Kap. 3.1.2 beschriebenen Ergebnisse nachvollzogen werden mit dem Gesamteindruck, dass bei allen Mischzeiten (2, 5 7 und 10 Minuten) ein nicht zu vernachlässigender Anteil an abgeriebenen Teilchen von den großen Zuschlagskörnern im Matrixgefüge vorhanden ist. Auf eine quantitative Bildauswertung dieser Verfeinerung wurde verzichtet, da die Ergebnisse aus Kap. 3.1.2 eindeutig sind.

Die Unterschiede im feuchtetechnischen Verhalten bei unterschiedlichen Mischzeiten konnten aber mikroskopisch anhand der Gefügeuntersuchungen an Dünnschliffen beschrieben werden. Im Folgenden werden die Ergebnisse anhand der Wasseraufnahmen von 2 min dargestellt. Bei der Beurteilung der Proben wurden vergleichbare Ziegelsplitt-Zuschlagskörner der unterschiedlichen Variationen herangezogen, um die Matrixentwicklung am Übergang zur Zementmatrix darzustellen.

Variation 1: dunkelroter Ziegel (vgl. Abb. 56)

Bei einer Mischzeit von 2 min und einer Wasseraufnahme von 2 min zeigt sich, dass um das Ziegelkorn keine richtige Anbindung an die Matrix stattgefunden hat. Es sind größere Poren um die Zuschlagskörner entstanden. An den Stellen, an denen sich keine Poren gebildet haben, ist ein heller dichter Saum in einer Dicke von max. 50 µm erkennbar.

Der Porenanteil um die Ziegelkörner wird mit zunehmender Mischzeit geringer und das Saumgefüge bildet sich wesentlich besser aus. Nach 7 min Mischzeit hat dieser Bereich eine Dicke von 200 – 400 µm erreicht. Am besten sieht das Matrixgefüge um die Ziegelkörner nach 10 min Mischzeit aus. Das in den Körnern gespeicherte Wasser stand durch die langen Mischzeiten offenbar länger zur Matrixbildung zur Verfügung.

Variation 2: roter Ziegel (vgl. Abb. 57)

Beim relativ dichten roten Ziegelsplitt, der sich durch einen feinen Quarzkornanteil auszeichnet, zeigt sich im wesentlichen das gleiche Ergebnis wie bei der Variation 1 des dunkelroten Ziegelkorns. Allerdings ist die Ausbildung von groben Poren bei kleinen Mischzeiten nicht so ausgeprägt. Aber auch hier ist der helle 50 µm dicke Saum entstanden.

Bei 5 min Mischzeit bereits hat sich dieser Saum wesentlich verbreitert und ist nicht mehr als solcher zu erkennen, sondern zeigt sich durch einen relativ dichten Gefügebereich um das Zuschlagskorn. Daraus ist zu schließen, dass aufgrund der offenporigen Struktur dieser Variation mehr Wasser in den Ziegelkörnern gespeichert wird, was bei längeren Mischzeiten für die Matrixbildung zur Verfügung steht.

Variation 3: hellrot bis gelber Ziegel (vgl. Abb. 58)

Bei den hellroten bis gelben Ziegelsplittteilchen ist das Ergebnis nach 2 min Mischzeit ähnlich den Variationen 1 und 2. Allerdings kann z.T. ein dickerer Saum beobachtet werden. Nach 7 und 10 Minuten Mischzeit hat sich um die gelben Teilchen ein Bereich mit feiner Matrixstruktur ausgebildet.

Die Untersuchung der Matrixentwicklung bei einer Vornässung von 10 Minuten ergab, dass hierbei die Ausbildung von groben Poren um die Ziegelteilchen herum auch noch bei längeren Mischzeiten (7 und 10 min) erkennbar ist. Das gilt insbesondere für die gelben Ziegelteilchen, die offenbar die größte Speicherkapazität an Wasser aufweisen. Bei der dunkelroten Variation macht sich dieser Effekt wegen der geringen Wasseraufnahmefähigkeit nicht so gravierend bemerkbar.

In den Abb. 59 ist in einer mikroskopischen Bildtafel die Serie mit 2 Minuten Wasseraufnahme und unterschiedlichen Mischzeiten (2, 5, 7, 10 min) an den dunkelroten und hellroten Ziegelvariationen dargestellt.

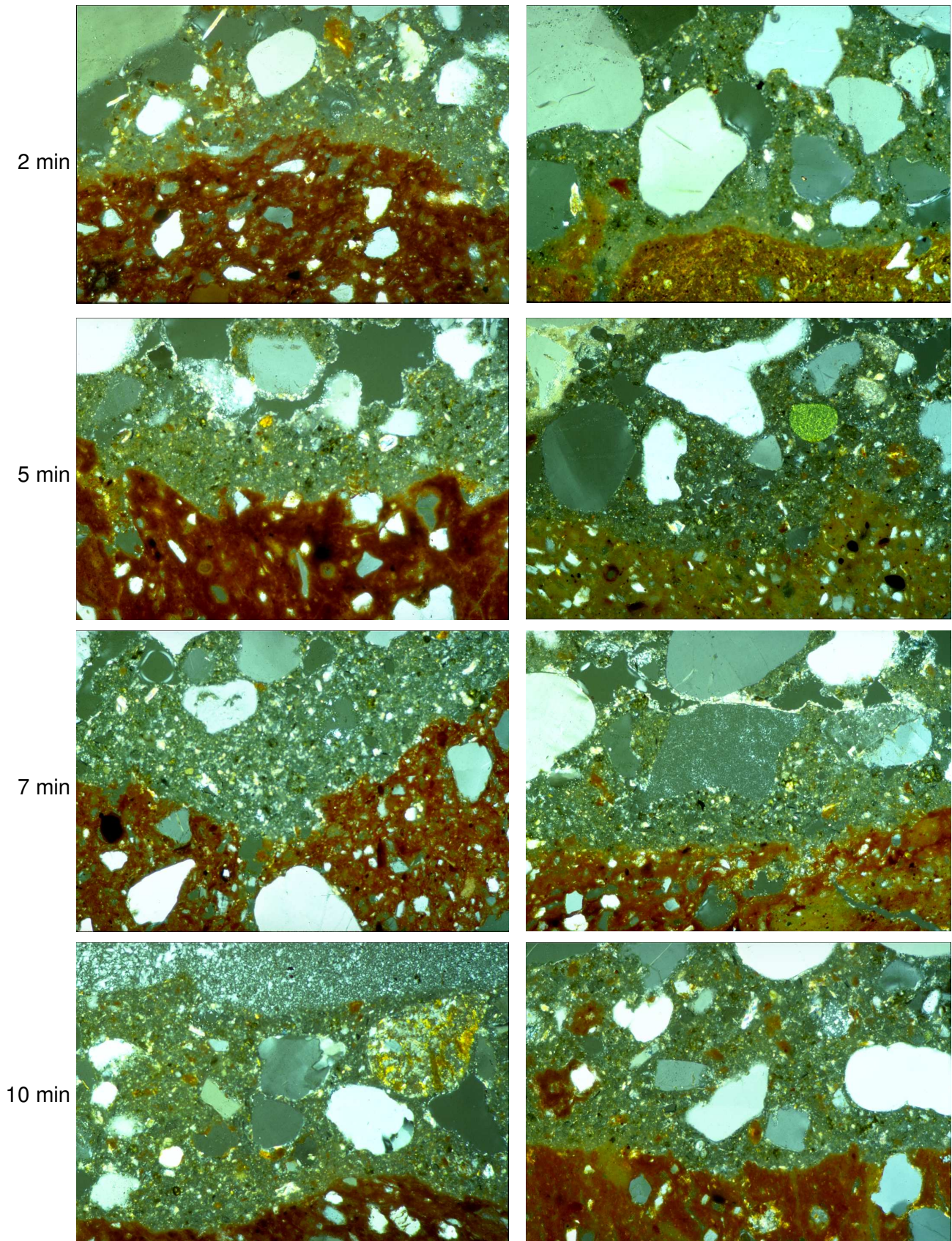


Abb. 59: Querschliffe im Polarisationsmikroskop, bei 2 Minuten Wasseraufnahme und unterschiedlichen Mischzeiten (2, 5, 7, 10 min)
links: dunkelrote Ziegelkörner, rechts: hellrote Ziegelvariationen.
Bildbreiten: 0,67 mm

3.2.4. Effekt der CO₂-Nachbehandlung

Der Projektpartner Fa. Manzke wendet in der normalen Produktion eine 24-stündige Nachbehandlung der Betonsteine in einer CO₂-angereicherter Atmosphäre an. Dadurch wird die Gefahr der Ausblühungen nach der Aushärtung reduziert.

Um diesen Effekt auch mikroskopisch erfassen zu können, wurden einige Proben der ersten Serie ebenfalls dieser Nachbehandlung unterzogen. Insbesondere wurde im Vorfeld vermutet, dass das erhöhte Angebot an CO₂ während der Abbindephase zu einer beschleunigten Karbonatisierung führen könnte. Dies konnte in den mikroskopischen Untersuchungen nicht bestätigt werden.

Vielmehr wird die Innenoberfläche der Poren durch eine 3 - 4 µm dicke Kalzitschicht belegt (offenbar reine Ausfällung aus dem Porenwasser), wodurch sozusagen eine vorzeitige Ausblühung des überschüssigen Calciumhydroxids im Bindemittel an den Porenwänden provoziert wird. Abb. 60 zeigt diesen Effekt am Beispiel einer Probe mit Ziegelsplitt als RC-Zuschlag. Auf den Innenwänden der Poren hat sich eine deutlich sichtbare Kalziumkarbonat-Schicht gebildet.

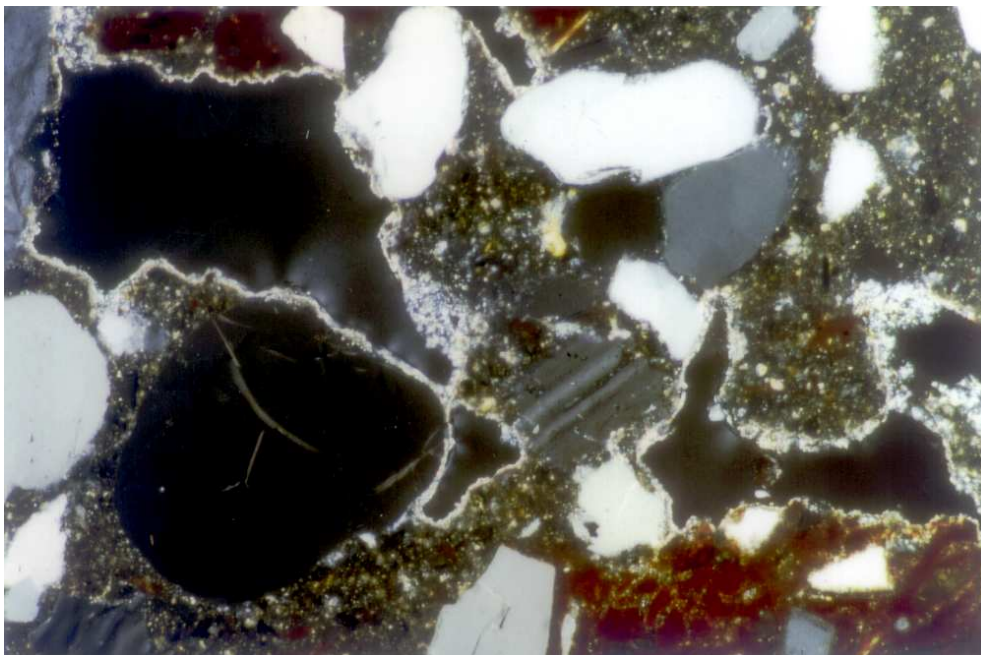


Abb. 60: Querschliff im Polarisationsmikroskop
Ziegelsplitt-RC-Zuschlag mit CO₂-Nachbehandlung,
an den Innenwänden der offenen Poren ist eine Kalzit-Schicht
erkennbar.
Bildbreite: 1,3 mm

Auch die Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop zeigt das gleiche Ergebnis in eindrucksvoller Weise. Abb. 61 zeigt an einer Querschliffprobe die Innenauskleidung einer Pore als helle aufgewachsene Schicht mit ca. 5 µm Stärke. Es ist zu erkennen, dass die Schicht

aus groben Kristallen zusammengewachsen ist, die mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenmikroanalyse als CaCO_3 -Kristalle identifiziert werden konnten.



Abb. 61: Im Rasterelektronenmikroskop ist zu erkennen, dass die Kalziumcarbonatschicht aus groben Kristallen zusammengewachsen ist und eine relativ dichte Kruste auf der Innenwand der Pore bildet. [REM-RE]

Unter Umständen wird durch diese z. T. sehr dicht erscheinende Kalzitschicht sogar die nachfolgende „natürliche Karbonatisierung“ behindert oder verzögert. Außerdem könnte eine nachträgliche Hydratation (Nachbehandlung) ebenfalls behindert werden, was sich aber letztendlich für die Endfestigkeit nicht negativ auswirken muß.

Die Kalzitkrusten waren besonders deutlich in den Proben mit Kalksandsteinbruch, Betonbruch und Ziegelsplitt zu erkennen. Im Porenbetonzuschlag zeigte sich dieser Effekt nur andeutungsweise. Offenbar ist die Gaszugänglichkeit in den Porenbetonzuschlägen so hoch, daß bereits dort ein großer Teil des CO_2 -Gases absorbiert wird.

Diese Untersuchungen wurden im Rahmen dieses Projektes nicht weiter vertieft, da keine Auswirkungen auf das Projektziel zu erwarten waren.

3.3. Zwischenbilanz für die weiteren Serien

Die bisherigen Versuche mit reinen RC-Zuschlägen aus Porenbetonbruch und Mauerwerksbruch sind in ihren Festigkeiten so niedrig ausgefallen, dass für die nächsten Serien eine Weiterverfolgung dieses Materials nicht vorgesehen wurde.

Bei den Versuchen mit Ziegelsplitt und Betonbruch waren die Ergebnisse weitaus vielversprechender, wobei bei der Verwendung dieser Materialien als Reinzyklate bereits Festigkeiten erzielt wurden, die das Projektziel annähernd erreichten. Besonders bei der Verwendung von Ziegelbruch scheint noch einiges an Potential bei der Entwicklung der Rezeptur zu stecken. Allerdings ist davon auszugehen, dass die technologischen Randbedingungen genauestens vorgegeben und eingehalten werden müssen, um die gewünschten Eigenschaften des Ziegelsplitts ausreizen zu können.

Insbesondere haben die mikroskopischen Gefügeuntersuchungen in Verbindung mit den technologischen Prüfungen ergeben, dass den Parametern 'Vornässung' und 'Mischdauer' eine besondere Bedeutung bei der Herstellung zukommt. Aufgrund der Ergebnisse muß davon ausgegangen werden, dass eine Vornässung des Ziegelsplitts von 2 min nicht ausreicht, daher sollte zunächst mit 10 min Wasseraufnahme weitergearbeitet werden. Die Mischdauer allerdings muß mindestens 5 min betragen, damit das in den Ziegelkörnern enthaltene Wasser ausreichend verteilt werden kann und zur Matrixbildung zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang wurde in das Versuchsprogramm die Frage aufgenommen, ob die bisher praktizierte Handeinfüllung im Labormaßstab mit der Maschineneinfüllung gleichzusetzen ist.

Die Verfeinerung der Sieblinie durch die Verlängerung der Mischzeiten und der Verwendung von weichem Ziegelsplitt sind zwar nachgewiesen worden, aber ein negativer Effekt tritt hinter der Bedeutung der Vornässung und Mischzeit zurück. Da im nächsten Schritt des Projektes die gezielte Mischung der Recycling-Materialien vorgesehen war, war auch deshalb mit einer geringeren Bedeutung der Sieblinienverfeinerung zu rechnen.

Außerdem wurde den Produktionsvorgaben des Projektpartners Fa. Manzke folgend beschlossen, auf den Cement CEM III A 42,5 umzusteigen. Dann ist jedoch zu erwarten, dass wegen des Anteils an Hüttensand die Festigkeitsprüfung nach 56 Tagen bei der Bewertung der Serie berücksichtigt werden muß.

4. Serie II: Versuche mit gemischten Recyclingzuschlägen

Aufgrund der in Kapitel 3 erzielten Ergebnisse wurde beschlossen, im Folgenden nur noch die RC-Zuschläge aus Ziegelsplitt und Betonbruch zu berücksichtigen. Um vergleichbare und interpretierbare Bedingungen zu erzielen, wurde darüber hinaus beschlossen, zunächst bei einem Zementgehalt von 340 kg/m^3 zu bleiben und die RC-Zuschlagsmischungen durch 10 minütige Wasseraufnahme in der in Kap. 3 beschriebenen Weise vorzunässen.

4.1. Technologische Kennwerte

4.1.1. Variation Betonbruch/Ziegelbruch

In dieser Serie wurden unterschiedliche prozentuale Zusammensetzungen des RC-Materials aus Ziegelsplitt und Betonbruchs verwendet:

- 10 % Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch
- 30 % Ziegelsplitt / 70 % Betonbruch
- 50 % Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessungen nach 28 und 56 Tagen ist in Tabelle 3 dargestellt. Aus der grafischen Darstellung der Ergebnisse in Abb. 62 geht hervor, dass die RC-Zuschlagszusammensetzung mit 10 % Ziegel und 90 % Betonbruch das beste Ergebnis lieferte, was allerdings auch nicht überrascht, das der Betonbruch bei der Verwendung als RC-Reinzyklat bereits gute Ergebnisse lieferte. Bei Erhöhung des Ziegelgehaltes im RC-Material fällt die Druckfestigkeit ab. Allerdings ist überraschend, dass mit weiter zunehmendem Ziegelgehalt keine weitere Verschlechterung mehr eintritt. Im Gegenteil scheint die Druckfestigkeit wieder leicht anzusteigen, was sich nochmals verstärkt, wenn man die Druckfestigkeit nach 56 Tagen berücksichtigt. Die mit der Verwendung des CEM III 42,5 zu erklärende Festigkeitssteigerung ist sogar prozentual in den Mischungen mit 50 % Ziegelsplitt und 50 % Betonbruch am höchsten. Diese grundsätzlichen Ergebnisse sind unabhängig von der gewählten Mischzeit (2 min und 5 min), allerdings ist der Effrekt der Nachfestigung bei kürzeren Mischzeiten am größten. Vermutlich hängt das mit der relativ großen Vornässung von 10 Minuten zusammen, die bei hohem Anteil an Ziegelsplitt im RC-Material bei kürzerer Mischzeit einen geringeren negativen Einfluß auf die Matrixbildung hat. Bei längeren Mischzeiten wird mehr im Ziegel gespeichertes Wasser dem Frischbetonsystem zur Verfügung gestellt, was sich u.U. negativ auf die Endfestigkeit auswirkt.

RC-Materialzusammensetzung	10%Z / 90%B	30%Z / 70%B	50%Z / 50%B
----------------------------	-------------	-------------	-------------

Mischzeit 2 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,23	2,10	2,13
Druckfestigkeit (28 Tage)	49	38	39
Druckfestigkeit (56 Tage)	56	42	49
Zuwachs 28d/56d [%]	14,3%	10,5%	25,6%

Mischzeit 5 min

Festbeton-Rohdichte ρ_d [km/dm ³]	2,26	2,21	2,15
Druckfestigkeit (28 Tage)	50	40	40
Druckfestigkeit (56 Tage)	54	46	47
Zuwachs 28d/56d [%]	8,0%	15,0%	17,5%

Tabelle 3: Druckfestigkeiten der RC-Mischungen bei verschiedenen Zusammensetzungen aus Ziegelsplitt und Betonbruch.

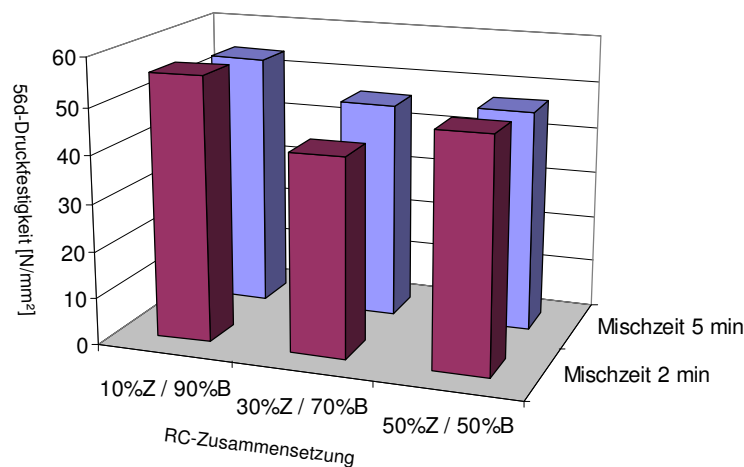
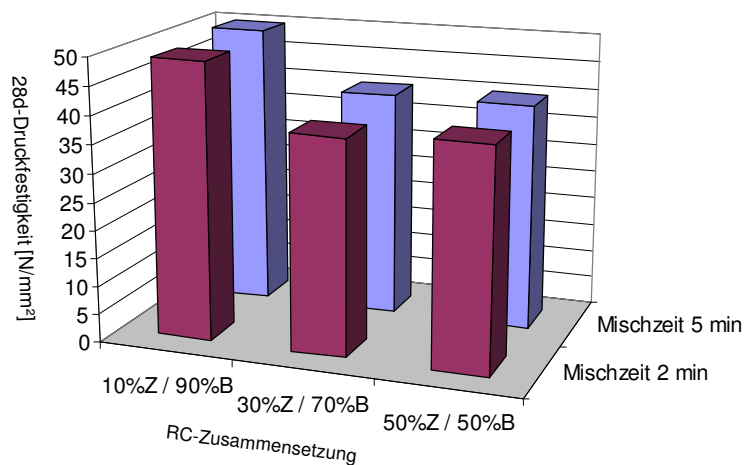


Abb. 62: Druckfestigkeiten der untersuchten Mischungen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen an Ziegelsplitt und Betonbruch nach 28 (oben) und 56 (unten) Tagen

4.1.2. Kontrolle Handeinfüllung/Maschineneinfüllung

Im Verlaufe des Projektes wurde die Probenherstellung im Labormaßstab vorgenommen und dann von Hand in die großtechnische Anlage beim Projektpartner Fa. Manzke eingefüllt. Der Ansatz des Projektes war, die Ergebnisse nicht nur im Labormaßstab zu erzielen, sondern schon direkt in den Praxisbetrieb zu übertragen. Alle hergestellten Proben wurden ausschließlich in der Großanlage hergestellt, da nur hier die produktionseigenen Bedingungen, insbesondere die Verdichtung, immer konstant garantiert wird, was im Labormaßstab schwer zu bewerkstelligen gewesen wäre. Der einzige Unterschied zur reinen Anlagenherstellung war die Tatsache, dass die im Labor fertiggestellte Mischung per Hand in die Anlage eingefüllt wurde, um den laufenden Betrieb nicht unnötig zu stören.

Um zu überprüfen, dass bei dieser Handeinfüllung keine Einflüsse in den Herstellungsprozess einfließen, die die Eigenschaften der Proben negativ beeinflussen, wurde in einem Normalversuch (mit einer verwendeten Standard-Fabrikmischung) eine Maschineneinfüllung mit einer Handeinfüllung verglichen.

Hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Betonrohddichten und Druckfestigkeiten. Daher kann ein systematischer Fehler hinsichtlich der Befüllungsvarianten ausgeschlossen werden.

4.2. Mikroskopische Untersuchungen

Die in dieser Serie untersuchten Proben wurden hinsichtlich ihrer Gefügeeigenschaften ebenfalls im Polarisationsmikroskop untersucht. Dazu wurde von jeder Probe ein Dünnschliff angefertigt und mikroskopisch analysiert.

Bei den Proben mit 10 % Ziegelsplitt und 90 % Betonbruch im RC-Zuschlag konnten die in Kap. 4.1 erzielten Ergebnisse auch mikroskopisch nachvollzogen werden. In Abb. 63 ist der Übergang von einem Ziegelsplitt-Teilchen zur neuen Betonmatrix dargestellt. Es zeigt sich eine homogene Matrixentwicklung ohne die Ausbildung eines Saumes im Übergangsbereich. Auch beim Übergang eines Altbeton-Zuschlages zur Neumatrix (Abb. 64) ergibt sich das gleiche Bild. Es sind keine Inhomogenitäten im Bereich der Altzuschläge zu erkennen. Vermutlich ist die Neumatrix in der Lage, das evtl. unkontrolliert zur Verfügung gestellte Wasser, was in den wenigen Ziegelteilchen gespeichert ist, zu verkraften. Andererseits hat die intensive Vornässung auch ein Verdursten der Neumatrix an den saugfähigen Ziegelsplittkörnern verhindert.

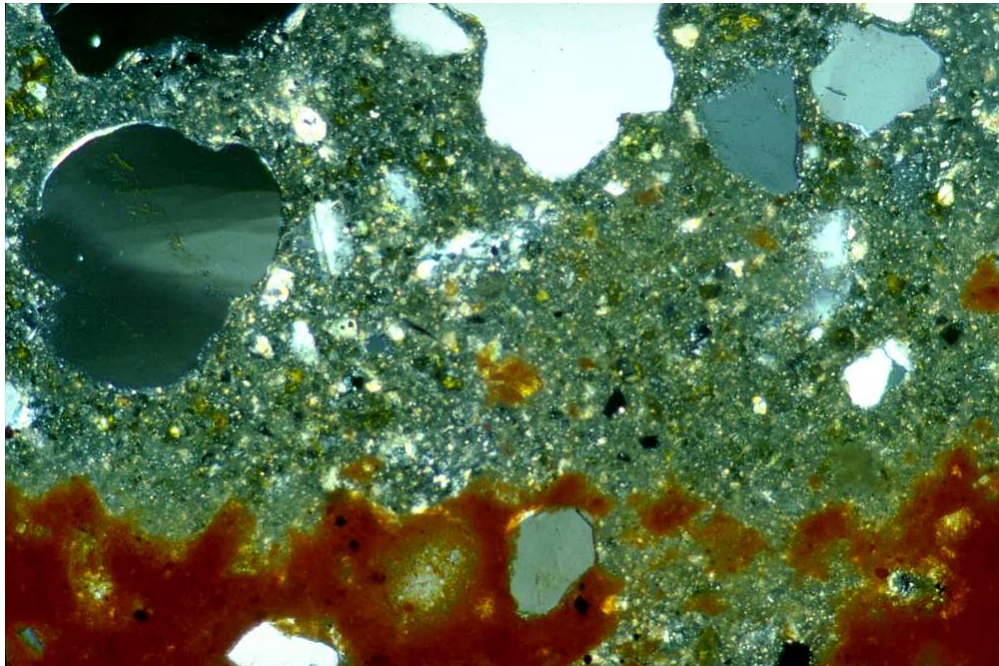


Abb. 63: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
2 min Mischzeit, 10 % Ziegelsplitt, 90 % Betonbruch
Die Matrix des Neubetons zeigt eine homogenen Struktur im
Bereich der Ziegelsplitt-Zuschläge
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

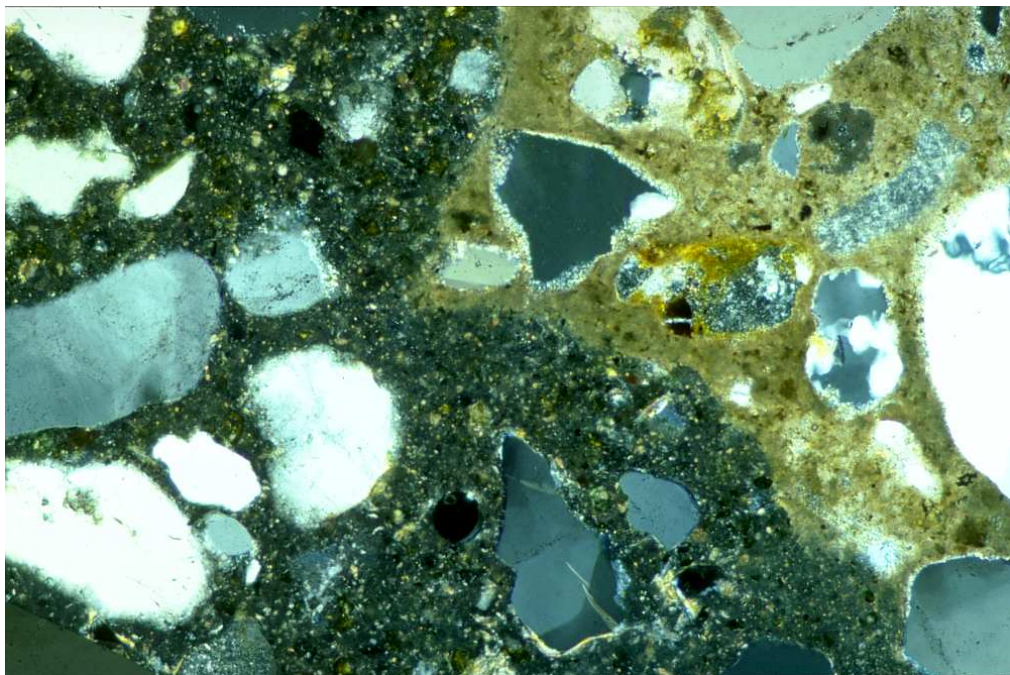


Abb. 64: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
2 min Mischzeit, 10 % Ziegelsplitt, 90 % Betonbruch
Auch am Übergang zu einem Altbeton-Teilchen (oben rechts) stellt
sich eine homogene Gefügestruktur der Neumatrix ein.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

Besonderes Augenmerk wurde bei den mikroskopischen Untersuchungen auf die Proben mit 50 % Ziegelsplitt und 50 % Betonbruch gelegt, die relativ hohe Festigkeiten zeigten. Dabei war natürlich die Gefügeentwicklung an den Ziegelsplittteilchen von besonderem Interesse, weil dort der wesentliche Unterschied zu den anderen Probenvariationen vermutet wurde.

Tatsächlich zeigte sich die Matrixentwicklung im Neubeton um die Ziegelkörner positiv. Abb. 65 stellt diesen Übergang an einem Beispiel dar. Es bildete sich eine ähnlich homogene Matrix wie in Abb. 63, allerdings ist ein breiterer Saum zu erkennen, der im Gegensatz zu Abb. 63 milchig-wolkig zu beschreiben ist. Das ist ein Hinweis darauf, dass sich eine feine Kristallstruktur gebildet hat, die durch die lichtmikroskopische Abbildung nicht mehr aufgelöst werden kann. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich hierbei um feine Calciumsilikathydrate handelt, die offenbar aufgrund des längeren Einwirkens freien Wassers, was von den Ziegelteilchen zur Verfügung gestellt werden konnte, gebildet wurden. Hier liegen also Hinweise vor, die auf eine "innere Nachbehandlung" hindeuten.

Allerdings ist in Abb. 65 auch zu erkennen, dass offenbar Poren in diesen Übergangsbereichen entstanden sind, die sich aus überschüssigem Wasser bildeten.

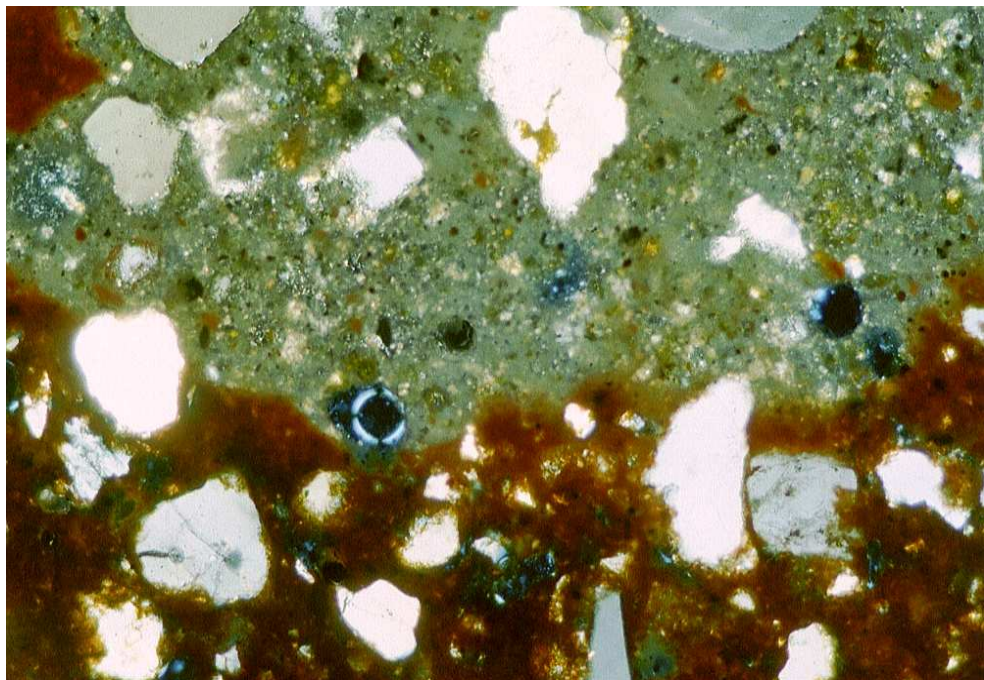


Abb. 65: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff
2 min Mischzeit, 50 % Ziegelsplitt, 50 % Betonbruch
In der Neumatrix an einem Ziegelteilchen zeigt sich eine feinkristalline Struktur (milchig-wolkig), allerdings entstehen auch Grobporen an den Oberflächen des Ziegels.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

4.3. Zwischenbilanz für die weiteren Serien

Die besten Ergebnisse dieser Serie zeigten die Proben, die eine RC-Zuschlag-Zusammensetzung von 10 % Ziegelsplitt und 90 % Betonbruch hatten. Angesichts des hohen Zementgehaltes von 340 kg/m³ ist aber die erreichte Druckfestigkeit dieser Proben von ca. 50 N/mm² als nicht ausreichend anzusehen. In den mikroskopischen Bildern ist zwar eine gute Matrixbildung zu erkennen, dennoch scheint eine weitere Verbesserung noch möglich, wie die überraschende Eigenschaftsentwicklung der Proben mit 50 % Ziegelsplitt und 50 % Betonbruch zeigten.

Die Mischzeiten von 2 bzw. 5 min scheinen grundsätzlich anwendbar zu sein, allerdings wurde in den mikroskopischen Untersuchungen immer noch deutlich, dass die Vornässung bei hohem Ziegelsplittanteil offenbar zu hoch ist.

In dieser Serie wurde wegen der Verwendung des CEM III A 42,5 mit dem darin enthaltenen Hüttensandanteil auch die Nachverfestigung nach 56 Tagen diskutiert. Es wurde deutlich, dass sich eine Erhöhung der Endfestigkeit um bis zu 25 % nach 56 Tagen gegenüber der 28-Tage-Festigkeit einstellt. Grundsätzlich könnte auch eine Verwendung von Hüttensand als Sandersatz in Erwägung gezogen werden, um diesen Prozess der Nachverfestigung noch zu unterstützen. Aus Österreich gibt es dazu bereits Veröffentlichungen, wonach Hüttensand mit Erfolg zur Produktion von Betonpflastersteinen eingesetzt wurde. Auch ein Verwendung von Kalkmehl wurde erwogen, zumal dieses Material in der Normalproduktion zum Einsatz kommt.

Für die nächsten Versuche wurde diskutiert, die Wirtschaftlichkeit der Recyclingrezepturen dadurch zu verbessern, indem man den Zementgehalt, der bisher mit ca. 340 kg sehr hoch angesetzt war, zu verringern. Aus diesem Grunde wurde für die nächsten Versuche ein Zusatz von Flugasche ins Auge gefaßt. Möglicherweise kann dadurch auch der Wasser/Zement-Wert reduziert und die Verdichtbarkeit der Mischung verbessert werden.

Als weitere Variante wurde erwogen, den Mischungen zu einem späteren Untersuchungs-gang Microsilica beizugeben, weil damit ebenfalls eine Steigerung der Druckfestigkeit erreicht werden könnte.

Neben der RC-Granulat-Zusammensetzung von 10 % Zielsplitt und 90 % Betonbruch wurde wegen der überraschenden Ergebnisse auch die Variante mit 50 % Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch weiter verfolgt. Die Mischzeit wurde auf 5 min festgelegt, die Vornässung sollte 2 und 5 min betragen.

5. Serie III: Gezielte Zusätze

Die letzte Serie zur Ermittlung einer marktreifen "Sieger"-Rezeptur war zunächst darauf ausgelegt, zu kleineren Gehalten an Zement zu kommen. Dabei bot sich der Ersatz eines Teils des Zementes durch Steinkohleflugasche an. Aber auch die Verwendung von Kalksteinmehl und Hüttenmehl als Füller wurde erprobt.

Mit dem Hintergedanken, die Nachverfestigung durch die Verwendung von CEM III 42,5 zu unterstützen, wurde erprobt, den Natursand ganz oder teilweise durch Hüttsand zu ersetzen.

Schließlich wurde noch die Verwendung von Microsilica ins Versuchsprogramm aufgenommen, um die Möglichkeit der Verbesserung der Endfestigkeit mit diesem Zusatzmittel zu erproben.

5.1. Technologische Kennwerte

5.1.1. Zusatz von Flugasche

Mit dem Hintergrund der Reduzierung des Zementanteils wurde zunächst 40 kg des verwendeten Zementes von ursprünglich 34 kg/m³ durch Steinkohleflugasche ersetzt und in einem weiteren Schritt diese Menge auf 60 kg erhöht. dabei wurden die Ergebnisse der vorherigen Serie in sofern berücksichtigt, dass bei diesen Proben die RC-Zuschlagsmischungen von 10 % Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch und 50 % Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch verwendet. Wegen der Annahme, dass bei der Verwendung von Flugasche der Wasseranspruch des Bindemittels geringer sein wird, wurde neben der in der vorherigen Serie favorisierten Wasseraufnahme von 5 min auch noch die 2 minütige Vornässung angewandt.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen sind in Tabelle 5 und in grafischer Form in Abb. 65 dargestellt. Es zeigt sich sowohl bei einem Zement/Zusatz-Verhältnis von 300/40 wie auch bei 280/60, dass das RC-Zuschlagsmischungsverhältnis von 10 % Ziegelsplitt und 90 % Betonbruch die besten Ergebnisse liefert. Der Effekt der SFA ist sogar bei dem höheren Anteil von 60 kg noch stärker, wobei bereits nach 28 Tagen nahe 60 N/mm² erreicht werden. Interessant ist hier, dass bei einem höheren Ziegelanteil in der RC-Zuschlagsmischung (50/50) ein Verringerung der Vornässung bezüglich der Druckfestigkeiten gravierende Folgen hat. Bei einem höheren Zementanteil scheint das nicht der Fall zu sein. Vermutlich hängt dies mit der zu hohen in den Ziegeln aufgesaugten Wassermenge zusammen, die die zusätzliche Flugaschemenge nicht verbrauchen kann.

Wasseraufnahme	
2 min	5 min

Zement/SFA 280/60

10% Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch	59	57
50% Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch	33	54

Zement/SFA 300/40

10% Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch	46	50
50% Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch	36	34

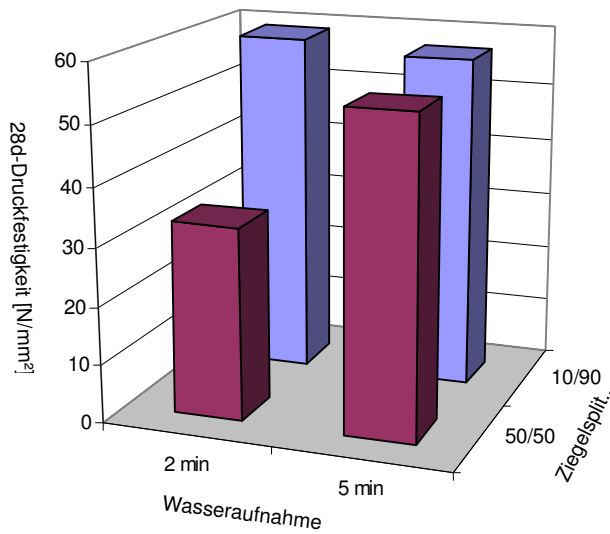


Tabelle 5: Druckfestigkeiten in N/mm² unter Verwendung verschiedener Mengen Flugasche, Mischzeit 5 min.

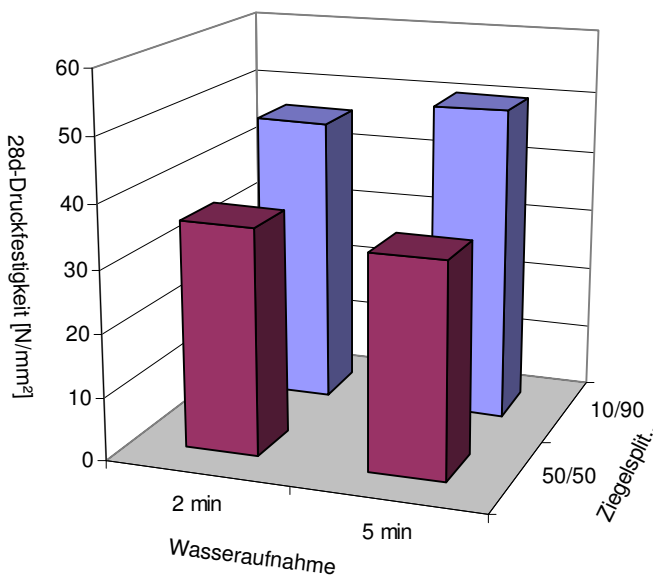


Abb. 65
Grafische Darstellung der Druckfestigkeiten in Abhängigkeit von der Wasseraufnahme und dem RC-Zuschlagsverhältnis Ziegelsplitt / Betonbruch.
oben: Zement/SFA 280/60 kg/m³
unten: Zement/SFA 300/40 kg/m³

5.1.2. Zusatz von Kalkstein- und Hüttenmehl

Zusätzlich zur Steinkohleflugasche wurden als Ersatzstoffe Kalksteinmehl und Hüttenmehl in die Versuchsserie mit aufgenommen.

In der normalen Produktion ist die Verwendung von Kalksteinmehl (Kreidemehl) zur Zeit nicht ungewöhnlich und hat zu Druckfestigkeiten von $> 60 \text{ N/mm}^2$ geführt.

Bei der Verwendung von Hüttenmehl ging wieder die Überlegung davon aus, dass damit eine stärkere Nachverfestigung erreicht werden könnte.

Bei den Versuchen wurde eine Vornässung von 5 min und eine Mischzeit von 5 min eingehalten. Außerdem wurde der Zementgehalt gemäß den Ergebnissen in Kap. 5.1.2 auf 280 kg/m^3 festgelegt, wobei von den jeweiligen Füllstoffen 60 kg zugegeben wurde. Die Versuche wurden jeweils mit den RC-Zuschlagsmischungen 10 % Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch und 50 % Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch gefahren.

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsmessungen sind in Tabelle 5 und in der grafischen Aufarbeitung in Abb. 66 dargestellt. Der Vollständigkeit halber sind die entsprechenden Ergebnisse der Steinkohleflugasche als Füller mit aufgeführt.

Bei der RC-Zuschlagszusammensetzung von 50 % Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch zeigt sich ein relativ einheitliches Bild der Druckfestigkeiten auf niedrigem Niveau um 40 N/mm^2 . Offenbar ist der hohe Ziegelgehalt in der Mischung das begrenzende Element bei dieser Zusammensetzung. Bei niedrigerem Ziegelsplittgehalt von 10 % im RC-Zuschlag hat die Steinkohleflugasche dagegen klare Vorteile. Es wird wieder wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben eine 28-Tage-Druckfestigkeit von annähernd 60 N/mm^2 erreicht. Bei der Verwendung von Kreidemehl ist offenbar stärker zu berücksichtigen, dass dieses Material einen hohen Wasseranspruch hat, der durch das Ziegelmaterial nicht geliefert werden kann. Dazu wäre eine längere Vornässung erforderlich, die aber in den vorangegangenen Serien als nachteilig für die Matrixbildung im Grenzbereich Ziegelsplitt/Zementmatrix angesehen wurde. Mit Hüttenmehl wird es sich ähnlich verhalten, wobei hier von einer hohen Porosität der Einzelteilchen ausgegangen werden muß. Wegen der Eindeutigkeit dieser technologische Ergebnisse wurde auf eine mikroskopische Untersuchung verzichtet.

	Zusatz 60 kg		
	Kalksteinmehl	Flugasche	Hüttenmehl
10% Ziegelsplitt / 90 % Betonbruch	41	58	45
50% Ziegelsplitt / 50 % Betonbruch	44	39	36

Tabelle 6: Ergebnisse der 28-Tage-Druckfestigkeitsuntersuchungen in N/mm² bei Variation der Füllstoffe, Wasseraufnahme 5 min, Mischzeit 5 min, Zementgehalt 280 kg/m³.

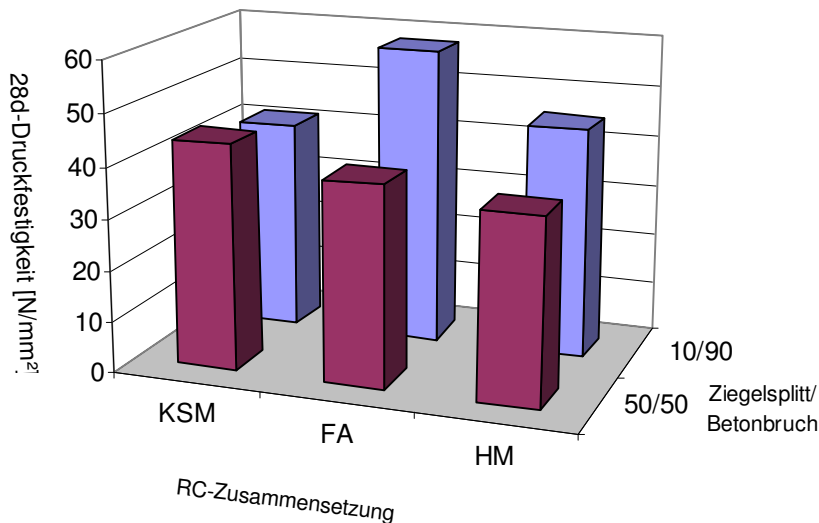


Abb. 66: Grafische Darstellung der Ergebnisse aus Tab. 6

5.1.3. Austausch Natursand durch Hütten sand

Mit dem Ziel, den Natursand ganz oder teilweise zu ersetzen, wurde sein Ersatz durch Hütten sand diskutiert. Möglicherweise könnte dadurch der Prozess der Nachverfestigung, der ja durch den bereits im verwendeten Zement CEM III 42,5 enthaltenen Anteil an Hütten sand hervorgerufen wird, weiter unterstützt werden.

Bei den diesbezüglichen Versuchen, in denen der Natursand ganz oder zur Hälfte durch Hütten sand 0/4a ersetzt wurde, und die auch eine Variation des Ziegelgehaltes im RC-Granulat bzw. der Vornässung beinhalteten, wurden allerdings nur Festigkeiten von max. 29 N/mm² erreicht.

Der Hütten sand stellte sich hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften der Betonsteinproduktion problematisch dar. Die größeren Agglomerate dieses Materials sind mit der Konsistenz in der Pflastersteinproduktion nicht zu vereinen. Hinzu kommt, dass die Hütten sandkörner eine sehr hohe Porosität aufweisen und außerdem wegen ihrer geringen Eigenfestigkeit stark abriebgefährdet sind. Die damit einhergehende Konsistenzverschlechterung führte zum

Abbruch dieser Teilsérie, die Verwendung von Hüttensand als Natursandersatz wurde nicht weiter verfolgt.

5.1.4. Zusatz von Silicastaub

Als möglicherweise festigkeitssteigernd wurde bei den Projektpartnern die Verwendung von Silicastaub als Zusatz angesehen. Aus diesem Grunde wurden entsprechende Versuche durchgeführt, wieder unter Variation der RC-Zuschlagzusammensetzung 10/90 und 50/50 Ziegelsplitt/Betonbruch und Flugasche bzw. Kreidemehl als Füller. Die Parameter Vornässung und Mischzeit wurden allerdings aus den bisherigen Erfahrungen mit jeweils 5 min festgelegt. Dabei wurde das Suspensionswasser mit 5 % Silicasuspension, was einem Feststoffgehalt von 2,5 % entspricht, bei der Gesamtwasserzugabe berücksichtigt.

Bei diesen Versuchen konnte erstaunlicherweise keine Verbesserung der Festigkeiten mehr erreicht werden, sondern im Gegenteil führte die Verwendung von Silicastaub sogar bei den Rezepturen mit Flugasche als Füller zu schlechteren Ergebnissen.

Auch die Tatsache, dass die Mischreihenfolge verändert wurde, indem der Silicastaub nicht wie vorgegeben lediglich mit 1 l Wasser vor der eigentlichen Anmachwasserzugabe der Trockenmischung zugegeben wurde, sondern in Gänze mit dem Anmachwasser führte zu keinem Erfolg.

5.2. Zwischenbilanz für die optimierte Rezeptur

In dieser letzten Serienuntersuchung sollten verschiedene Füller und Zusatzstoffe erprobt werden, um die technologischen Möglichkeiten solcher Rezepturverfeinerungen auszuloten. Dabei hat sich eindeutig herausgestellt, dass nur die Verwendung von Flugasche als Zementersatz erfolgreich ist. Das liegt grundsätzlich wohl daran, dass die Flugasche keinen zusätzlichen Wasseranspruch erhebt, wie z.B. Kreidemehl oder auch Hüttenmehl.

Das grundsätzliche Problem bei erdfeuchten Konsistenzen ist die schlechte Mischbarkeit von Zusatzsubstanzen. Das zeigte sich insbesondere bei der Verwendung von Hüttensand im Austausch zum Natursand, aber auch beim Zusatz von Silicastaub. Der Hüttensand beeinflusst das Konsistenzverhalten wegen seiner Porosität und durch Abrieb so schlecht, dass eine Anwendung in der Betonsteinproduktion nicht mehr möglich war. Auch diesbezüglich hat die Flugasche mit seinen feinen Kugeln offensichtlich Vorteile.

Es ist gelungen, den Zementgehalt auf wirtschaftliche Werte zu reduzieren und gleichzeitig annähernd DIN-gerechte Druckfestigkeiten zu erhalten, wobei mit einer erheblichen Nach-

verfestigung (in der Größenordnung von 25 %) durch Verwendung des hüttensandhaltigen Zementes gerechnet werden kann.

6. Optimierte Rezeptur

Mit den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen konnte nun eine Rezeptur für den Kernbeton optimiert werden, die als Maschinencharge in der Produktionsanlage des Projektpartners Fa. Manzke gefertigt wurde:

Zuschläge:	Sieblinie 0/16 mit 0/2a Natursand 8/16 bestehend aus 10 Gew.-% Ziegelbruch und 90 Gew.-% Betonbruch
Zement:	280 kg/m ³ CEM III A 42,5
Zusatzstoff:	60 kg SFA
w/z-Wert	0,32
Zusatzmittel:	0,3 Gew.-% (bezogen auf Zement) Bequisil 1000
Wasseraufnahme:	5 min
Mischzeit:	5 min

Bei der Wahl der Zuschlagsfraktionen wurden die Ergebnisse aus Kap. 3.1.2 berücksichtigt, wonach eine nicht unerhebliche Verfeinerung der RC-Zuschlags-Sieblinie durch die verlängerten Mischzeiten erfolgt.

6.1. Technologische Kennwerte

Mit der oben angegebenen Rezeptur wurde eine Festbetonrohddichte von 2,35 kg/dm³ ermittelt. Die Prüfung nach 28 Tagen ergab eine Druckfestigkeit von 59 N/mm². Entsprechend der Erfahrungen der Festigkeitssteigerung bei dem verwendeten Zement wurde eine weitere Prüfung nach 56 Tagen vorgenommen, die eine Druckfestigkeit von 72 N/mm² ermittelte.

Damit sind mit diesem RC-Pflasterstein technologische Eigenschaften erreicht, die den Vergleich mit herkömmlichen Beton-Pflastersteinen nicht scheuen müssen. Die anfängliche Vermutung, dass für RC-Produkte in diesem Bereich höhere Toleranzen akzeptiert und durchgesetzt werden müssen, haben sich damit nicht bestätigt.

Obwohl die hohe Festigkeit auch bei diesen RC-Pflastersteinen keine Frost-Tau-Prüfung notwendig erscheinen lässt, wurde sie der Vollständigkeit halber durchgeführt und bestanden.

6.2. Mikroskopische Beschreibung

Die mikroskopische Beschreibung des Gefüges der optimierten Rezeptur rundet das Ergebnis in beeindruckender Weise ab.

Im Zuge der letzten Optimierungsversuche wurden leichte Abwandlungen der sich herauskristallisierenden Parameter vorgenommen. Unter anderem wurde eine Rezeptur gefahren, die sich gegenüber der oben beschriebenen Werte nur durch die Mischdauer von 2 statt 5 Minuten unterschied. Die 28-Tage-Druckfestigkeiten lagen im Endergebnis um ca. 10 % niedriger als bei der optimierten Rezeptur.

Die nachfolgenden mikroskopischen Abb. 67 und 68 verdeutlichen die Unterschiede. In Abb. 67 ist die Bindemittelmatrix am Übergang zu einem Ziegel-RC-Korn gezeigt. Es hat sich eine gute Haftung des neuen Zementsteins an die Ziegeloberfläche entwickelt. Auch zu den Alt-Betonbruch-RC-Körnern ist dieser Befund nachzuvollziehen.

Abb. 68 zeigt das Gefüge der optimierten Rezeptur mit 5 min. Mischzeit an einer vergleichbaren Übergangsstelle zu einem Ziegel-RC-Korn. Auch hier sind keine Fehler in der Haftung zu erkennen. Der Unterschied zu Abb. 67 besteht allerdings darin, dass sich in einem Matrix-Saum um das Ziegelkorn herum ein sehr feines Gefüge eingestellt hat, was sich in der polarisationsmikroskopischen Abbildung als unscharfe Zone darstellt. Dies ist ein Hinweis darauf, dass sich nanofeine Kristalle gebildet haben (vmtl. CSH-Fasern), die eine sehr dichte und feste Schale um das Ziegelkorn bilden. Die längere Mischzeit hat offenbar dazu geführt, dass das im Ziegel gespeicherte Wasser in der frühen Abbindephase länger zur Verfügung stand, und dadurch eine feinere Kristallbildung begünstigt hat. Dadurch wird einerseits die Festigkeitssteigerung erklärbar, andererseits aber auch deutlich, wie sensibel diese Rezeptur auf kleine technologische Veränderungen reagiert.

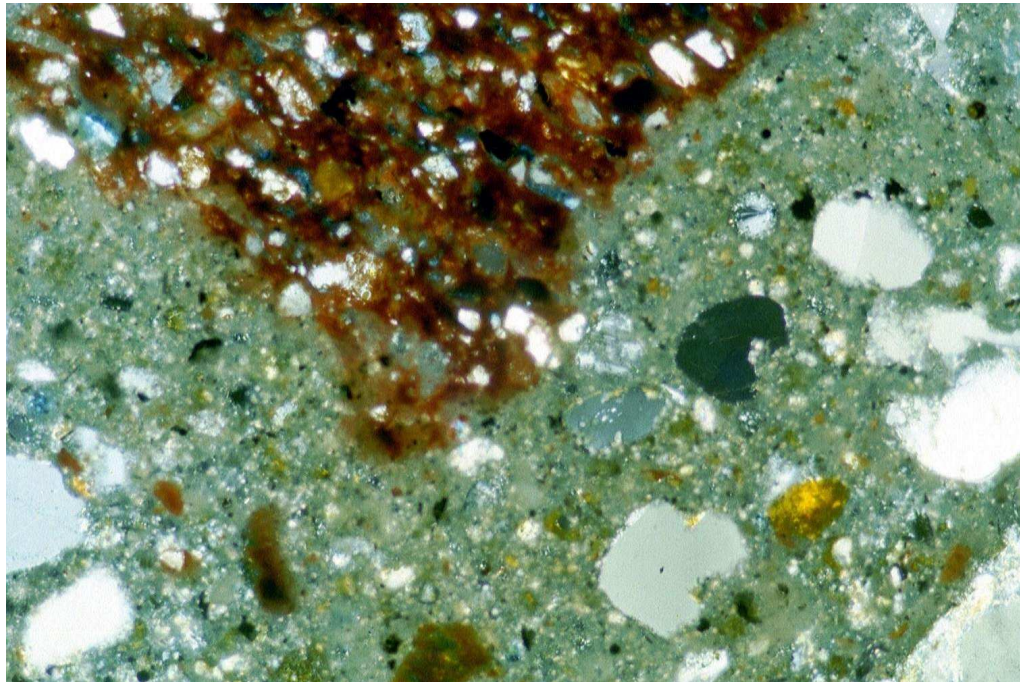


Abb. 67: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff optimierte Rezeptur mit auf 2 min reduzierter Mischzeit. Am Übergang zum RC-Korn hat sich eine Neumatrix mit guter Haftung ausgebildet.
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

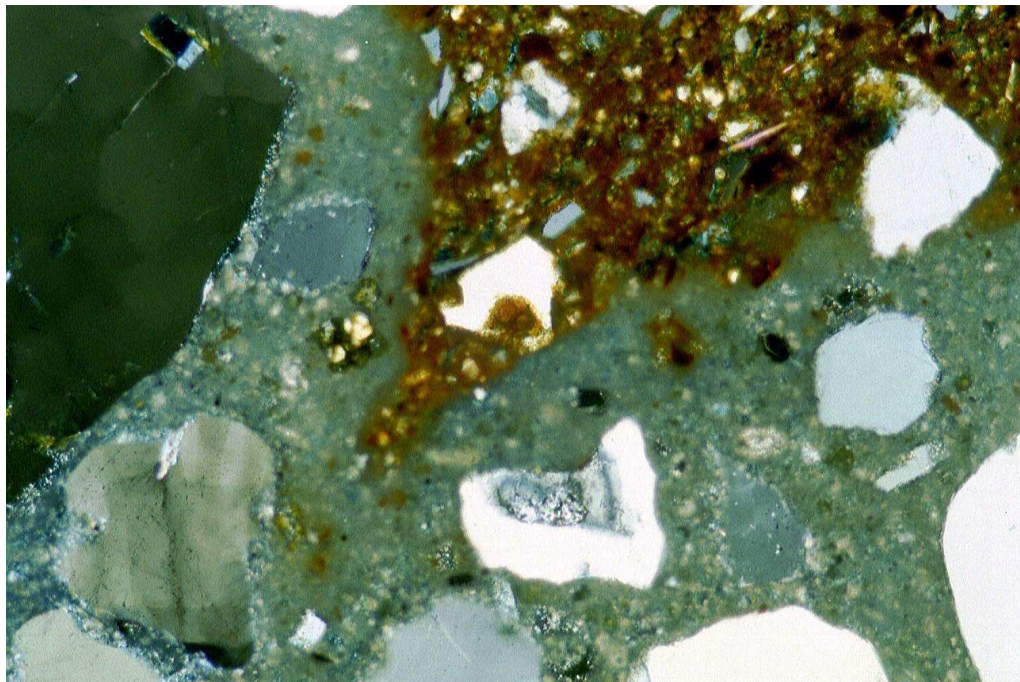


Abb. 64: Polarisationsmikroskopische Aufnahme am Dünnschliff optimierte Rezeptur
In der Neumatrix um das RC-Korn bildete sich ein nanometerfeiner, hier unscharf erscheinender Saum
[PolMi +, Bildbreite: 1,34 mm]

6.3. Probeflächen

Mit der oben beschriebenen Rezeptur wurden erste Produktionschargen mit gleichbleibendem Erfolg angefertigt.

Innerhalb des Projektes war geplant, kleinere Versuchsflächen anzulegen, um die Dauerhaftigkeit dieser RC-Beton-Pflastersteine zu testen. Wegen der unerwartet guten Ergebnisse entstanden in der Schlussphase dann erste Überlegungen, einen größeren Praxisversuch ins Auge zu fassen. Dabei soll auf einer Versuchsfläche (z.B. in einem Wohngebiet oder auf einem Parkplatz mit normalem Pkw- und gelegentlichem Schwerlastverkehr) eine größere Fläche verlegt und daran über einen Zeitraum von zwei Jahren in regelmäßigen Beprobungen materialkundliche Untersuchungen durchgeführt werden. Mit den Ergebnissen soll nachgewiesen werden, dass dieses RC-Betonpflaster, welches seine Eignung im Labor bereits unter Beweis gestellt hat, auch unter normalen Praxisbedingungen mit herkömmlichem Betonpflaster vergleichbar ist.

Erste Sondierungsgespräche sind diesbezüglich bereits erfolgt, allerdings ohne bisherigen verbindlichen Abschluß.

7. Zusammenfassung und Ausblick

Das vorliegende Forschungsprojekt unter dem Titel „Entwicklung eines Verfahrens zur Wiederverwertung von Hochbaurestmassen als Zuschlag in zementgebundenen Systemen der Betonsteinproduktion“ wurde in der Zeit von 01.09.1997 bis 31.12.2000 durchgeführt. Das Vorhaben war als Kooperationsprojekt ausgelegt, Kooperanden waren

1. die Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen,
2. die Firma K & B Manzke GmbH & Co. KG und das Heide-Labor GbR (beide in Volkstorf ansässig) und
3. die Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB), Bremen.

Die Projektleitung war bei der MPA Bremen angesiedelt. Dort fand auch die mikroskopische Begleitung des Vorhabens und die Steuerung des Projektes statt. Bei der Fa. Manzke fanden die Versuche zur Betonsteinherstellung auf der dortigen Produktionsanlage statt; im

Heide-Labor wurden die Ausgangsmaterialien untersucht. Die produzierten Versuchssteine wurden im Heide-Labor auch hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften geprüft. Die Aufgabe der RWB bestand in der Projektbegleitung/-koordination und Beratung der Projektteilnehmer.

Das Projekt hatte die Aufgabe, unter Verwendung von mineralischen Baustoffrecyclingmaterialien einen Betonstein zu entwickeln, der in seinen relevanten Eigenschaften wie Abmessungen, Dichte, Druckfestigkeit und Frostbeständigkeit eine vergleichbare Qualität zu herkömmlichen Betonsteinen aufweist, die unter Verwendung von Naturzuschlägen (Sand/Kies/Splitt) hergestellt werden. Das Projekt war damit anwendungs- und produktentwicklungsorientiert angelegt. Aufgabe des Projektes war es folglich nicht, grundlegende Untersuchungen zur Einbindung von mineralischen Baustoffrecyclingmaterialien als Zuschlag in Beton durchzuführen.

Das Projekt war bereits im Antrag in ein Mehrstufenprogramm unterteilt worden. Diese Programmvorgabe wurde insbesondere zu Beginn des Vorhabens eingehalten; später ergaben sich - bedingt durch den Projektfortschritt und den Erkenntnisgewinn, aber auch durch einfließende Gesichtspunkte wie Optimierung des Entwicklungsziels und der Wirtschaftlichkeit Abweichungen vom Plan (siehe hierzu auch das Kapitel „Abweichungen vom Projektplan“).

Im Hinblick auf eine möglichst praxisnahe Entwicklung war das Projekt so konzipiert, dass die Herstellung der Betonsteine ausschließlich auf der Produktionsanlage der Fa. Manzke erfolgte. Hierdurch wurde der Tatsache Rechnung getragen, dass eine Herstellung von Betonsteinen in einem kombinierten Rüttel- und Verdichtungsverfahren in einem Betonlabor nicht zu simulieren ist; es sei denn, man hätte eine Technikumsanlage zur Betonsteinherstellung im Labor installieren können. Dieser Aufwand schien den Antragstellern zu hoch.

Die Projektleitung und die mikroskopische Begleitung des Vorhabens fand an der Amtlichen Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen statt. Hiermit wurde betontechnisch insofern Neuland betreten, als zur Produktentwicklung nicht mehr allein mechanische Kennwerte herangezogen, sondern die hervorragenden Möglichkeiten der MPA genutzt wurden, um die einzelnen Projektschritte im Licht- und Elektronenmikroskop zu untersuchen, zu interpretieren und für den Projektfortschritt und das Entwicklungsziel positive Hinweise geben zu können.

Die erste Versuchsserie beschäftigte sich mit der Charakterisierung der verschiedenen Ausgangsmaterialien. An mineralischem Bauschutt wurden Splitte der Abbruchmaterialien Ziegel, Beton, Porenbeton und Kalksandstein eingesetzt. Diese Materialien sind bei der Fa. Manzke verfügbar, da das Unternehmen neben der Betonsteinherstellung auch eine Stoffaufbereitung betreibt. Die stationäre RC-Anlage der Fa. Manzke zeichnet sich zudem

dadurch aus, dass dort RC-Zuschläge in großer Reinheit gewonnen werden können. Dieser Umstand war für das Projekt von großem Vorteil. Beim Beton wurde Produktionsbruch aus der Betonsteinfertigung eingesetzt. Diese Tatsache wirkte sich ebenfalls ausgesprochen positiv auf das Entwicklungsziel aus, da mit dem Produktionsbruch der Betonsteinfertigung ein homogenes und sehr hochwertiges Rezyklat zur Verfügung stand.

Erwartungsgemäß konnte nach der ersten Serie festgestellt werden, dass nur mit einem Betonbruch allein bzw. unter Zumischung von Ziegelbruch ein RC-Stein mit hohen Druckfestigkeiten zu produzieren war. Insbesondere die mikroskopische Begleitung des Vorhabens machte allerdings deutlich, dass nicht nur die Ausgangsmaterialien allein für die Eigenschaften des Endproduktes eine wichtige Rolle spielen. Vielmehr war auch der „Wasserhaushalt“ des Gesamtsystems aus RC-Zuschlägen, Zement und Wasser von erheblicher Bedeutung. Dieser Wasserhaushalt wird entscheidend dadurch beeinflusst, welche Zeiträume zur Wasseraufnahme zur Verfügung stehen und damit, welche Mengen an Wasser von den porösen RC-Zuschlägen aufgenommen und in der Abbindephase wieder abgegeben werden können. Gleichzeitig ist die Mischzeit von Bedeutung. Hierbei muss ein Kompromiss gefunden werden, der sich an der Benetzbarkeit der Materialien einerseits und an wirtschaftlichen Überlegungen andererseits orientieren muss. Längere Mischzeiten zeigten zudem, dass es in Folge von Abrieb zu Kornzerkleinerungen beim Mischprozess kommt, die wiederum die Sieblinie der Ausgangsmischung verändern. Die mikroskopischen Untersuchungen konzentrierten sich u.a. auch auf den Grenzbereich (Saum) zwischen Zement und RC-Zuschlag. Ein Mangel an Wasser führt zu einer unvollständigen Hydratation, ein Überangebot im Grenzbereich hat zur Folge, dass sich um die Zuschläge Wassersäume bilden, in denen die Zementhydratphasen nur grob kristallisieren. Ein Idealzustand wird erreicht, wenn sich die Hydratphasen nanometerfein dicht an das RC-Zuschlagkorn anschließen bzw. in dessen poröse Oberfläche einwandern. Die Erzeugung möglichst optimaler Grenzbereiche wiederum war stark von den Vornässbedingungen und der Mischzeit abhängig.

Einschlägige Erfahrungen der Fa. Manzke bei der Produktion herkömmlicher Betonsteine wurden bei der Auswahl des zementären Bindemittels genutzt. Da bei der Fa. Manzke ein Nachhärtungsverfahren eingesetzt wird, bei dem die frisch entschalteten Steine anschließend bei höherer Temperatur und Feuchte einer erhöhten Kohlenstoffdioxid-Konzentration ausgesetzt werden, wurde auf einen Hochofenzement CEM III A 42,5 zurückgegriffen, der sich auch bei herkömmlicher Produktion bewährt hatte.

Bei den Versuchsserien wurde ein spezielles Zusatzmittel auf Kieselsäure-Basis eingesetzt. Dieses verbessert die Homogenisierung der Mischung und die Benetzbarkeit der Zuschläge. Vorversuche zeigten, dass ohne dieses Zusatzmittel Eigenschaftsverschlechterungen zu erwarten waren.

Versuche zur Festigkeitssteigerung durch Zugabe von Hüttensand 0/2 als Sandersatz brachten keinen Erfolg. Die hohe Porosität des Hüttensandes und der starke Abrieb während des Mischvorganges führten zu Konsistenzen, die nicht weiter verarbeitbar waren.

Aus Versuchen, die u.a. auch an der MPA Bremen durchgeführt wurden, war zwar bekannt, dass ein solcher Austausch von Natursand durch Hüttensand Festigkeitssteigerungen nach längeren Zeiträumen über 28 Tage hinaus bewirken kann. Diese Erfahrungen bezogen sich jedoch auf Betone mit Regelkonsistenz, die auf die Herstellung von Betonsteinen ohnehin kaum übertragbar sind. Zu diesem Punkt wären u.U. weitere systematische Untersuchungen notwendig gewesen, die jedoch den Umfang des Projektes überschritten hätten.

Der Einsatz feinteiliger Zusätze wie Silicastaub, Hütten- oder Kreidemehl war ebenfalls nicht erfolgreich. Beim Silicastaub gelang es nicht, die Suspension homogen in der Mischung zu verteilen; Kreide- und Hüttenmehl erhöhten den Wasseranspruch stark und beeinträchtigten die Verarbeitungskonsistenz.

Bereits die Versuche der ersten Serie zeigten, dass eine einfache Erhöhung des Zementgehaltes nicht automatisch zu einer Festigkeitssteigerung führt. Vielmehr müssen das Gesamtsystem und die komplexen Einflüsse des Herstellprozesses betrachtet werden. Hierbei ist z.B. auch der Verdichtungsprozess und die Verdichtungswilligkeit der Mischung von Bedeutung. Es war daher folgerichtig, die Erfahrungen zu nutzen, die bei der Produktion herkömmlicher Betonsteine bei der Fa. Manzke zum Ersatz von Zement durch Steinkohlenflugaschen vorlagen. Auch aus wirtschaftlichen Überlegungen wurde daher gegen Ende der Versuchsserien ein Teil des Zementes durch Steinkohlenflugasche ersetzt.

Als Quintessenz aus den zahlreichen Projektversuchen wurde ein Betonstein generiert, der nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 59 N/mm^2 aufwies. Der Stein bestand im Kernbeton in der Sandfraktion aus Natursand und im Splittbereich aus einem Gemisch von RC-Zuschlägen mit 10% Ziegel- und 90% Betonbruch; den Vorsatz bildete Normalbeton. Das Bindemittel bestand aus 280 kg/qm Zement und 60 kg/qm Steinkohlenflugasche. Die Wasseraufnahme (Vornässzeit) und die Mischdauer betragen je 5 Minuten. Der Stein wies nach 56 Tagen eine Druckfestigkeit von 72 N/mm^2 auf. Die Frost-Tauwechselprüfung in Anlehnung an die Normen DIN 4226 und 52104, Teil B, wurde bestanden.

Ausblick

Das Projekt hat gezeigt, dass es möglich ist, mit RC-Zuschlägen, bestehend aus Ziegelsplitt und hochwertigem Betonsplitt, einen Betonstein zu produzieren, der in seinem Eigenschafts-

bild - und hier insbesondere in seiner Druckfestigkeit - einem herkömmlichen Betonstein aus Naturzuschlägen sehr nahe kommt. Weiterhin konnte die nutzbringende Unterstützung der Produktentwicklung durch die Baustoffmikroskopie wiederum unter Beweis gestellt werden.

Ob ein derartiger Stein auf dem Markt Verkaufschancen hat, ist fraglich. Die augenblickliche Situation auf dem Baustoffsektor und speziell bei den Betonsteinen ist durch Überkapazitäten und damit einhergehend mit erheblich verschärftem Wettbewerb gekennzeichnet.

Gleichzeitig ist auch für Naturzuschläge ein Preisrückgang zu verzeichnen, der den Einsatz von RC-Zuschlägen im Beton und in der Betonsteinproduktion nicht eben attraktiv macht.

Insofern ist - bei ungefährer Preisgleichheit zwischen einem normalen Betonstein und einem RC-Stein - der Anreiz eher gering, das RC-Produkt einzusetzen. Interesse wird insbesondere von öffentlichen Auftraggebern bekundet, die mit dem Einsatz eines RC-Steines für öffentliche Flächen wie z.B. Fußgängerzonen, Parkplätze etc. ihre Vorbildfunktion im Sinne einer praktizierten Kreislaufwirtschaft unter Beweis stellen wollen.

Für den Einsatz des RC-Steines aus dem vorliegenden Projekt wurden bereits derartige Interessen bekundet, von den Städten Georgsmarienhütte und Bremen sowie von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, dem Fördermittelgeber. Dennoch steht bis zum heutigen Tage die Erprobung des Steines im Praxiseinsatz noch aus. Es wäre wünschenswert, wenn hier bald eine größere Versuchsfläche gefunden würde. Die Projektteilnehmer sind davon überzeugt, dass der RC-Stein seine Bewährungsprobe auch in der Praxis bestehen wird. Ein derartiger Beweis könnte Skeptiker überzeugen, Vorbehalte abbauen und dem RC-Stein zu mehr Akzeptanz und Verkaufschancen verhelfen.

Für eine weitergehende Produktentwicklung sehen die Projektteilnehmer sowohl limitierende Projekterkenntnisse als auch weitere Optimierungsmöglichkeiten. Hinsichtlich der RC-Zuschläge scheint eine Erhöhung des Ziegelsplittanteils möglich, ohne das Eigenschaftsbild wesentlich zu verschlechtern. Bei Verwendung eines gemischten Betonsplitts z.B. aus einer Baustoffaufbereitungsanlage sind jedoch Festigkeitseinbußen zu erwarten.

Der Einsatz von gemischtem Bauschutt oder minderfester Zuschläge erscheint aussichtslos, wenn das hohe Anforderungsprofil beibehalten werden soll. Auch die Verwendung von RC-Sand wird kaum zu vergleichbar guten Ergebnissen führen, wie sie das Projekt gezeigt hat.

Die Zugabe weiterer Additive wie Silicastaub oder Hüttensand konnte im Projekt nur ansatzweise versucht werden.

8. Projektrelevante Literatur

- [1] DIN 18501, Pflastersteine aus Beton (11/1982)
- [2] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) (7.10.1996)
- [3] Kohler, G.: Recyclingpraxis Baustoffe, Köln, Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1997
- [4] 1. Monitoring-Bericht des Kreislaufwirtschaftsträgers Bau (KWTF) (6/2000)
- [5] BMBF-Verbund-Projekt „Baustoffkreislauf im Massivbau“ (BiM), www.b-i-m.de
- [6] Diedrich R.: Einfluss von Brechwerkzeugen auf die Eigenschaften von Betonrezyklaten, HTM (2001) 143 – 149
- [7] Kohler G.: Recyclingpraxis Baustoffe, Köln, Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1994
- [8] Theiner J.: Gute Marktchancen für Hochwert-Recycling-Betonsteine, Baumarkt 1 (1992) 28 – 29
- [9] Görisch U.: Recycling-Material – ein Zuschlag für die Herstellung von Betonsteinen, Baustoff-Recycling 2 (1990) 12 – 14
- [10] Kuhne V.: Wiederverwertung von Abbruchmaterialien, ABSE Periodica (1/1986) 17 – 28
- [11] Beenken W.: Die Aufbereitungstechnik – der Schlüssel zum Recycling, Aufbereitungstechnik 33, 12 (1992) 665 – 672
- [12] Zimbelmann R.: Zur Frage der Festigkeitssteigerung von Beton, Betonwerk + Fertigteil-Technik 2 (1976) 89 – 95
- [13] DIN 4226, Zuschlag für Beton (4/1983)
- [14] Materialprüfanstalt Eckernförde.: Bestimmung der Wasseraufnahme und Rohdichte von wiederaufbereitetem Beton“, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Eckernförde (2/1996)