Stoffkreisläufe aus Sicht der Zementindustrie

Stoffströme aus der Aufbereitung von Beton sind wertvolle Ressourcen, die zur Herstellung von Zement und Beton genutzt werden können. Heute wird der beim Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken anfallende Beton größtenteils als Rohmaterial für die Herstellung von z. B. Frostschutz- oder Ausgleichsschichten verwendet. Um Beton stattdessen als Rohstoffquelle für die Zement- und Betonherstellung verwenden zu können, sind weitere Aufbereitungsschritte erforderlich. Dabei fallen i. d. R. grobe Gesteinskörnung (RC-Körnung) sowie Brechsand (RC-Brechsand) an. Die Verwendung der groben RC-Körnung als Gesteinskörnung für Beton war bisher über eine Richtlinie vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton geregelt. Mit Einführung der DIN 1045-2, Ausgabe August-2023, werden erstmals Anwendungsregeln zur Herstellung von Beton mit RC-Körnung normativ festgeschrieben. Eine spürbar steigende Nachfrage nach Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, wo vorzugsweise die grobe RC-Körnung verwendet wird, geht einher mit einer höheren Verfügbarkeit an RC-Brechsanden. Die Anpassung der Regelwerke ermöglicht künftig weitere Anwendungsmöglichkeiten für die anfallenden Brechsande. Zum einen können sie künftig auch als Sand im Beton verwendet werden. Darüber hinaus können sie als Haupt- und Nebenbestandteil bei der Zementherstellung eingesetzt werden. Bereits heute können sie als Rohstoff für die Herstellung von Zementklinker genutzt werden. RC-Brechsande leisten, insbesondere wenn sie im Zement wiederverwendet werden, sowohl einen Beitrag zur Ressourcenschonung als auch zur Dekarbonisierung. DIN EN 197-6 legt Anforderungen an die Recyclingmehle zum Einsatz als Haupt- oder Nebenbestandteil sowie die Zusammensetzung der damit hergestellten Zemente normativ fest. Werden RC-Brechsande zur Herstellung des Zementklinkers eingesetzt, muss dies durch die jeweilige Landesbehörde genehmigt werden, da Zementöfen Produktionsstätten gemäß BImSchV sind. Die Qualität der Brechsande wird einerseits durch die Zusammensetzung des ursprünglichen Betons, andererseits aber auch durch die Art der Aufbereitung und Lagerungsdauer beeinflusst. Für eine hohe Wiederverwertungsquote ist ein sachgerechter Rückbau sowie eine gezielte Aufbereitung entscheidend. Brechsande aus der Aufbereitung von Beton können dazu beitragen, den Anteil an primären Rohstoffen zur Herstellung von Zementklinker und Zement weiter zu reduzieren.

doi.org/10.53184/STA9-2024-2

1 Einleitung

„Rohstoffe stehen am Anfang der industriellen Wertschöpfung." Mit diesem Satz wird das Vorwort der Rohstoffstrategie der Bundesregierung eingeleitet [1]. Ohne gesicherte Rohstoffversorgung ist die Produktion von Waren und Gütern nicht möglich. Dies gilt auch für die Zementindustrie in Deutschland. Hauptrohstoff für die Zementherstellung ist Kalkstein, der i. d. R. in Steinbrüchen in direkter Umgebung zum Zementwerk gewonnen wird.

■ Verfasser

Dr.-Ing. Werner Remarque
werner.remarque@dyckerhoff.com

Dyckerhoff GmbH
Lienener Straße 89
49525 Lengerich

Dr.-Ing. Julia Scheidt
julia.scheidt@dyckerhoff.com

Dr.-Ing. Thomas Sievert
thomas.sievert@dyckerhoff.com

Dyckerhoff GmbH
Dyckerhoffstraße 7
65203 Wiesbaden

Die Herstellung von Zement erfolgt in zwei Schritten. Zunächst wird im Zementofen der Zementklinker hergestellt. Im nächsten Produktionsschritt wird der Zementklinker gemeinsam mit einem Erstarrungsregler zu Portlandzement oder, unter Zugabe von weiteren Hauptbestandteilen, zu z. B. Hochofenzement oder Kompositzement vermahlen.

Im Sinne einer nachhaltigen Zementproduktion wurden bereits in der Vergangenheit die Produktionsanlagen stetig optimiert und eine Vielzahl von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen und niedrigem Klinkergehalt entwickelt. Zu den weiteren Hauptbestandteilen zählen sowohl primäre Rohstoffe, wie z. B. Kalkstein oder vulkanische Aschen, als auch Stoffe, die bei anderen Prozessen als Nebenprodukt anfallen, sogenannte alternative Rohstoffe, wie z. B. Hüttensand oder Flugasche.

Alternative Rohstoffe werden nicht erst seit Einführung von Kreislaufwirtschaftsgesetzen verwendet. Bereits 1909 wurden die „Deutschen Normen für Eisenportlandzement" eingeführt. Bei den Eisenportlandzementen handelt es sich um Zemente, bei denen ein Teil des Zementklinkers durch Hüttensand, ein Nebenprodukt, das bei der Roheisenherstellung anfällt, ersetzt wird. Diese Zemente werden auch heute noch unter der Normenbezeichnung CEM II/A-S bzw. CEM II/B-S hergestellt und verwendet. Seit dieser Zeit wurde eine Vielzahl von Zementarten entwickelt, deren Zusammensetzungen in den heute gültigen Zementnormen DIN EN 197-1, DIN EN 197-5 und DIN EN 197-6 definiert sind. Durch die Verwendung von alternativen Rohstoffen sowie die Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen konnten in den vergangenen Jahrzehnten jedes Jahr mehrere Millionen Tonnen Kalkstein eingespart sowie Treibhausgasemissionen reduziert werden.

Im Rahmen der Dekarbonisierung der Industrie werden künftig bekannte Rohstoffe nicht mehr oder nur noch eingeschränkt zur Verfügung stehen. Andererseits sind darüber hinaus weitere Stoffströme vorhanden, die bis heute kaum bei der Zementherstellung berücksichtigt werden. Eine mögliche Roh-

Construction and Demolition Waste (CDW) is a valuable resource. Today, the crushed concrete that accrues during the demolition of buildings and infrastructure structures is largely used as raw material for the production of frost-resistant subbase or leveling layers. In order to be able to use this concrete as raw material for cement and concrete production, further processing steps are required. During these steps coarse aggregate (RC aggregate) and sand (recycled concrete fines, RCF) are received. The use RC aggregate for concrete was previously regulated by a guideline from the German Committee for Reinforced Concrete [DAfStb]. With the introduction of DIN 1045-2, edition 08-2023, application rules for the production of concrete with RC aggregate are normatively laid down for the first time. An increasing demand for concrete with RC aggregate leads to a higher availability of RCF. With the introduction of the new generation of standards for concrete and an expansion of the cement standards, RCF can in future be used both in concrete and in cement, for the production of cement clinker or as a main and minor constituent in cement. RCF, especially when reused in cement, makes contributions to both, efficient use of primary raw materials and less CO_2-emissions. DIN EN 197-6 specifies the requirements for RCF to be used as a main or minor constituent, as well as the composition of the cements produced with them. If RCF are used to produce Clinker, this must be approved by the relevant state authority, as cement kilns has to fulfil the requirements of the BImSchV. The quality of the crushed sand is influenced by the composition of the original concrete, but also by the type of processing and storage period. Proper dismantling and targeted processing are crucial for a high recycling rate. Crushed sand from the processing of concrete can help to further reduce the amount of primary raw materials used to produce cement clinker and cement.

stoffquelle sind Brechsande, die bei der Aufbereitung von Beton bzw. Baureststoffen entstehen [2].

2 Zementherstellung und Ressourceneffizienz

Im Jahr 2020 wurden aus 40,7 Mio. t Rohstoffen gut 25 Mio. t Zementklinker hergestellt, aus denen wiederum unter Zugabe von weiteren Hauptbestandteilen gut 35,5 Mio. t Zement hergestellt wurden.

Hauptrohstoff für die Herstellung des Zementklinkers ist Kalkstein, chemisch $CaCO_3$. Dieser wird, gemeinsam mit weiteren Rohstoffen (z. B. Sand, Ton u. a.), im Zementofen auf etwa 1450 °C erhitzt. Der Anteil an sekundären bzw. alternativen Rohstoffen bei der Klinkerproduktion lag im Jahr 2020 bei gut 2 % (Bild 1). Diese Stoffe stammen zum größten Teil aus anderen Prozessen, wie z. B. der Stromerzeugung, und enthalten überwiegend Silicium, Aluminium und Eisen. Alternative kalkhaltige Rohstoffe werden aktuell aufgrund ihrer Verfügbarkeit und den teils aufwändigen Genehmigungsprozessn nur in begrenztem Umfang bei der Herstellung von Zementklinker eingesetzt. Dabei handelt es sich z. B. um Kalkschlämme aus der Wasseraufbereitung oder Stoffströme, die bei der Herstellung und Bearbeitung von zementhaltigen Produkten, wie z. B. Porenbeton oder Betonwaren, anfallen.

Beim Einsatz von alternativen Rohstoffen sind immer die Eignung (Zusammensetzung), die Logistik (Transporte und Handling im Zementwerk) und die Genehmigungsfähigkeit (Zementdrehöfen sind Anlagen gemäß BImSchV) zu berücksichtigen.

Bei der Zementherstellung wird der Zementklinker gemeinsam mit einem Erstarrungsregler und i. d. R. mit weiteren Zementhauptbestandteilen zu Zement vermahlen.

Ein wesentlicher weiterer Zementhauptbestandteil für die Zementherstellung ist heute der Hüttensand (Bild 2). Hüttensand wird bereits seit 1882 zur Zementherstellung verwendet. Im Rahmen der voranschreitenden Dekarbonisierung der Industrie in Europa werden die bisher zur Verfügung stehenden Hüttensandmengen rückläufig sein. Die in Deutschland aktiven Roheisenhersteller werden in den kommenden Jahren den Herstellungsprozess verändern. Statt Eisenerz wie bisher im Hochofen unter Zugabe von Koks und Zuschlagstoffen zu Roheisen aufzuschmelzen, wird man künftig das Eisenerz in einer Direktreduktionsanlage zu einem Eisenschwamm aufarbeiten [3]. Erst in den nachgelagerten Prozessen werden Schlacken anfallen, die aber nicht in jedem Fall als Rohstoff für die Zementindustrie geeignet sind. Die rückläufigen Hüttensandmengen werden durch andere Stoffströme

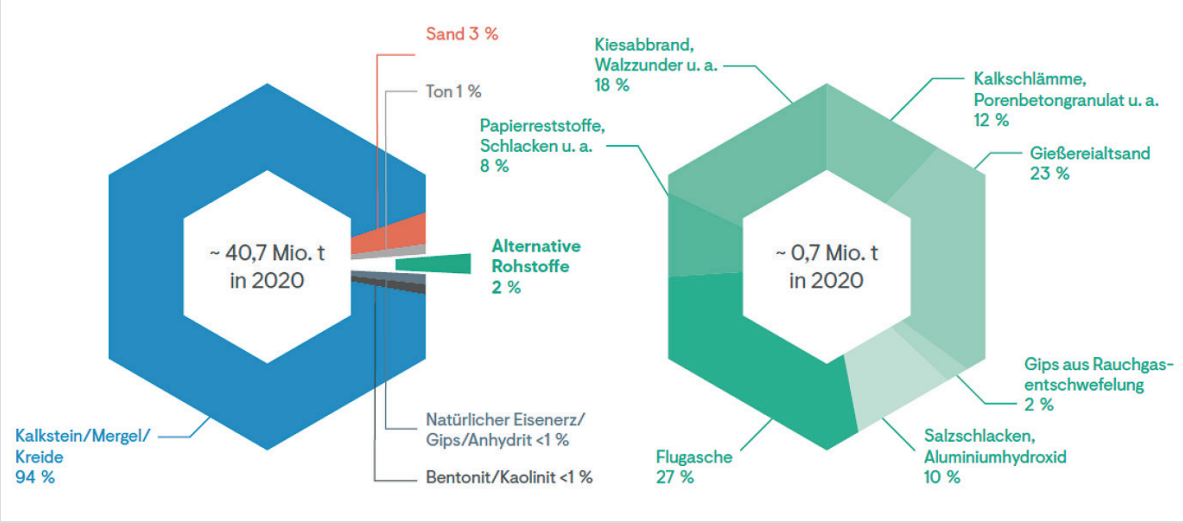

Bild 1: Rohstoffeinsatz für die Herstellung des Zementklinkers im Jahr 2020 [2]

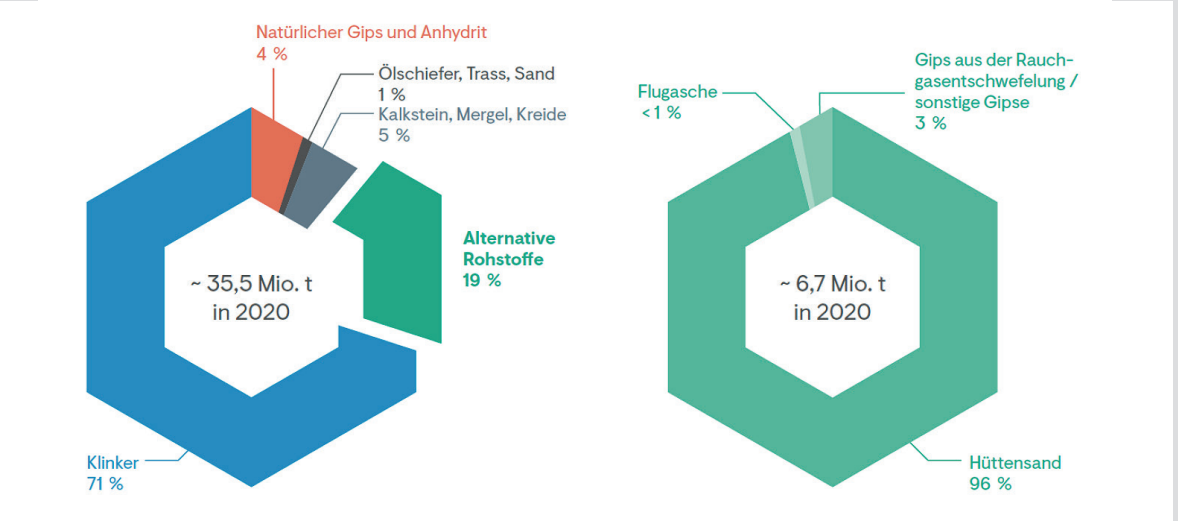

Bild 2: Bestandteile von Zement in Deutschland 2020 [2]

ersetzt werden müssen, um auch künftig die CO_2-Reduktionsziele zu erreichen.

3 Zementherstellung und Kreislaufwirtschaft

Zement ist ein Zwischenprodukt, aus dem überwiegend Beton hergestellt wird. Für Beton nach DIN 1045-2 kann bei sachgerechter Herstellung, Nutzung und Instandhaltung von einer Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren ausgegangen werden. Am Ende der Nutzungsdauer des Betons kann dieser zerkleinert und einer weiteren Verwertung zugeführt werden.

Um Beton als Rohstoffquelle für neuen Zement und Beton verwenden zu können, sollte der Betonbruch möglichst rein zurückgewonnen werden, analog der Verwertung von anderen Wertstoffen wie Glas, Papier oder Metallen, d. h. der Rückbau von Gebäuden muss selektiv erfolgen. Im Anschluss kann die zielgerichtete Aufbereitung des Altbetons erfolgen. Die dabei anfallende grobe RC-Gesteinskörnung kann wieder als Gesteinskörnung für Beton verwendet werden. Die entsprechenden Anwendungsregeln sind in einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton bzw. zukünftig in der Betonnorm DIN 1045-2:2023-08, festgelegt. Mit Einführung der DIN 1045-2:2023-08 dürfen auch RC-Brechsande im Beton eingesetzt werden. Diese neue Verwertungsoption wird jedoch vielfach aufgrund der Lagerkapazitäten und der vorhandenen Dosiertechnik in den Betonwerken schwer umsetzbar sein. Dennoch bieten sich in der Wertschöpfungskette der Betonherstellung sehr gute Verwendungsmöglichkeiten für den RC-Brechsand an: Er kann im Zement sowohl zur Herstellung von Zementklinker als auch als Haupt- oder Nebenbestandteil zur Herstellung von Zement verwendet werden.

An welcher Stelle Brechsande zur Herstellung des Zements eingesetzt werden, ist von den Gegebenheiten des Zementherstellers sowie der Qualität und Verfügbarkeit von Brechsanden abhängig. Bild 3 zeigt den Stoffkreislauf, wie er künftig möglich sein könnte.

3.1 Verfügbarkeit und Bedarf

Beton besteht aus gut 300 bis 320 kg Zement und evtl. Zusatzstoffen, wie z. B. Flugasche oder Kalksteinmehl, sowie 1800 bis 1900 kg Gesteinskörnung je Kubikmeter. Abhängig von der Anwendung variiert die

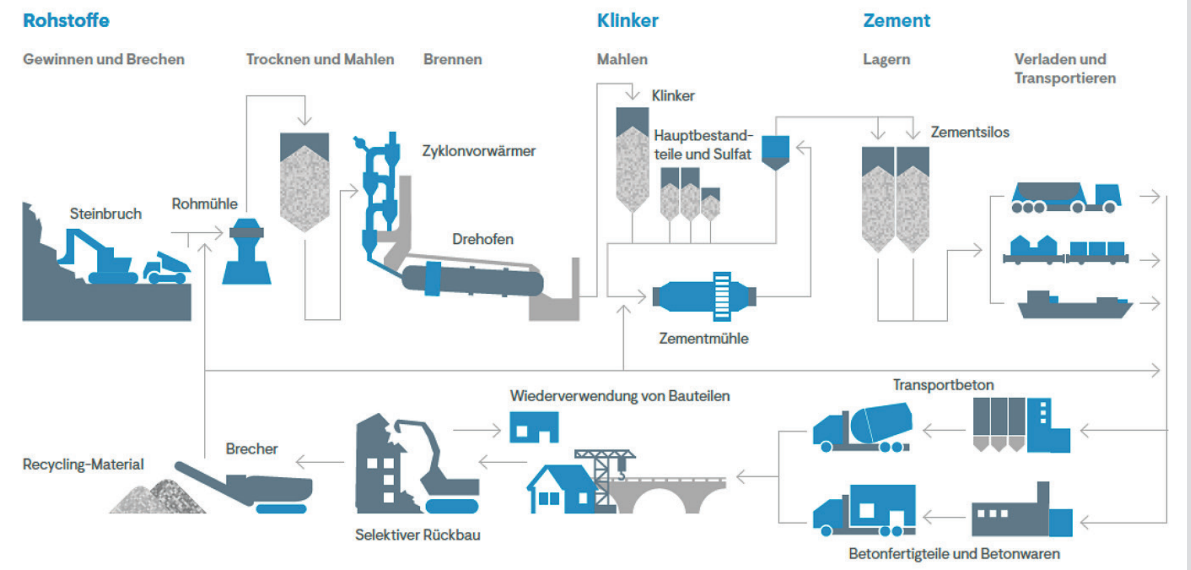

Bild 3: Stoffkreislauf Zement und Beton [2]

Zusammensetzung. Betone höherer Güte, wie sie z. B. in Betonfertigteilen zur Anwendung kommen, haben i. d. R. höhere Zementgehalte. Betone für Betonfahrbahndecken weisen Zementgehalte > 340 kg/m³ auf.

Aktuell fallen in Deutschland gemäß [4] jährlich ca. 25 Mio. t Betonbruch sowie in kleineren Mengen Betonabfälle und Betonschlämme an, aus denen sich ca. 9 Mio. t RC-Brechsand und ca. 15 Mio. t RC-Gesteinskörnung gewinnen ließen [6].

Diese theoretisch verfügbaren Mengen könnten im Stoffkreislauf Zement/Beton vollständig wiederaufgenommen werden. Betonbrechsande können ca. 10 % des Rohmaterials für die Klinkerproduktion ersetzen. Alleine aus diesem Verwertungsweg ergibt sich somit ein theoretischer Bedarf von ca. 4 Mio. t. Betonbrechsand pro Jahr in Deutschland, ungeachtet der weiteren Verwendungsmöglichkeiten der Betonbrechsande als Haupt- oder Nebenbestandteil in der Zementmahlung oder als teilweiser Ersatz für den primären Sand in der Betonherstellung [5]. Gleiches gilt für die groben RC-Gesteinskörnungen, für die sich bereits ohne Ausschöpfung aller normativ zulässigen Maximalanteile in R-Betonen ein Grundbedarf von > 25 Mio. t/a ableiten lässt [6].

Aufgrund einer steigenden Nachfrage nach Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ist in den kommenden Jahren auch mit einem steigenden Aufkommen an RC-Brechsanden zu rechnen.

Welche Mengen an RC-Brechsanden aus der Aufbereitung von Beton heute bereits zur Herstellung von Zementklinker und Zement eingesetzt werden, ist nicht bekannt, da diese Stoffströme in Branchenstatistiken nicht separat erfasst werden. Die Verwendung von Betonbrechsand als sekundäres Rohmaterial für die Klinkerproduktion ist bei der Dyckerhoff GmbH bereits über mehrere Jahre erprobt und gelebte Praxis. Erste Anwendungen, bei denen Stoffe aus der Betonaufbereitung als Nebenbestandteil des Zements in der Zementmahlung eingesetzt werden, sind ebenfalls dokumentiert, z. B. in [7].

Bild 4: Aufbereiteter Beton mit anhaftendem Zementstein (Foto: Julia Scheidt, Dyckerhoff GmbH)

3.2 Aufbereitung

Entscheidende Schritte bei der Aufbereitung von Beton sind das Zerkleinern sowie das Klassieren.

Die Herstellung der bisher bekannten RC-Baustoffe erfolgt durch „einfaches“ Zerkleinern und ggf. Fraktionieren des zerkleinerten Materials. Als Produkt steht am Ende der Aufbereitung ein RC-Baustoff mit einem Korngrößenbereich von 0 mm bis zur eingestellten, gewünschten maximalen Korngröße (z. B. 32 mm oder 45 mm) zur Verfügung. Für die Wiederverwertung von Beton als Rohstoff für die Zement- und Betonindustrie sind weitere Aufbereitungsschritte und Nachweise erforderlich. Hierzu zählen für die Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 in Beton beispielsweise die Klassierung in definierte Korngruppen, die Einhaltung einer definierten stofflichen Zusammensetzung, eine Umweltanalytik sowie der Nachweis einer Eigen- und Fremdüberwachung.

Bei der klassischen Aufbereitung fällt eine rezyklierte Körnung an, bei der an den primären Sand- und Gesteinskörnungspartikeln noch Zementstein, d. h. hydratisierter Zement, anhaftet. Bild 4 zeigt eine entsprechende Körnung ohne Brechsand. In [8] werden die Eigenschaften und die Einflüsse der RC-Körnung auf den damit hergestellten Beton ausführlich beschrieben. Brechsande aus der klassischen Betonaufbereitung zeichnen sich durch hohe Gehalte an SiO_2 aus. Daneben liefern Betonbrechsande nennenswerte Anteile an CaO. Beispielhaft ist die chemische Zusammensetzung eines Betonbrechsands in Tabelle 1 im Abschnitt 3.4 dargestellt.

3.3 Brechsande aus Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur

Rückbaumaßnahmen im Bereich der Verkehrsinfrastruktur (Betonfahrbahnen, Brückenbauwerke) stellen optimale (homogene und sortenreine) Rohstofflager für die Gewinnung von Betonbruch dar. Bislang wird das Material jedoch in den meisten Fällen als Frostschutzschicht wiederverwendet.

Der Aufbau von Betonfahrbahnen hat sich in den vergangenen 50 Jahren mehrfach geändert [9]. Ausgehend von einer Lebensdauer von 30 Jahren und mehr ist zu erwarten, dass in den kommenden Jahren Betonfahrbahndecken aus den 1980er- und 1990er-Jahren ersetzt werden müssen.

Bei einer Fahrbahnbreite von 11,0 bis

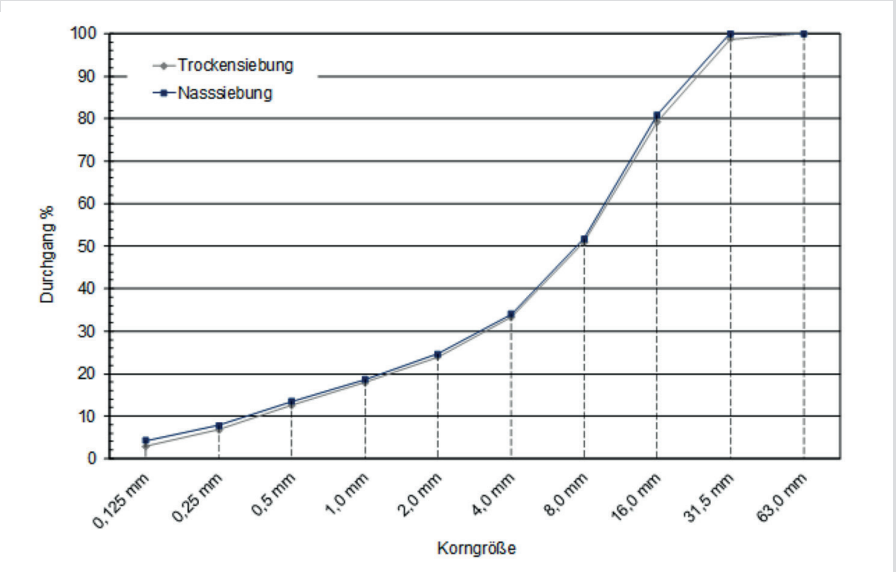

Bild 5: Korngrößenverteilung der zerkleinerten und aufbereiteten Betonfahrbahndecke BAB A 1 [12]

11,5 m ist je Zentimeter Deckendicke mit 110 bis 115 m^3 Beton pro Kilometer Betonfahrbahn zu rechnen. Bei einer Deckendicke von 26 cm fallen so je Kilometer Autobahn rund 2.900 bis 3.000 m^3 bzw. gut 7.000 t Beton an.

Ausgehend von dem in Abschnitt 3.4 beschriebenen Beispiel würden 25 bis 35 % bzw. gut 1.750 bis 2.500 t RC-Brechsand je Kilometer Richtungsfahrbahn anfallen, die als Rohstoff zur Herstellung von Zementklinker oder Zement wiederverwendet werden könnten.

Ein wichtiger Aspekt bei RC-Brechsanden aus Betonfahrbahnen ist der durch die Taumittelbeaufschlagung vorhandene Chloridgehalt. In [10] und [11] wurde festgestellt, dass der Chloridgehalt in den oberen 5 cm einer Betonfahrbahndecke recht hoch sein kann, die Chlorid-Ionen bei intakten Fahrbahnplatten darüber hinaus aber nicht in tiefere Schichten eindiffundieren. Dies sollte beim Rückbau berücksichtigt werden, d. h. der Beton bzw. der daraus gewonnene Brechsand sollte gut homogenisiert werden. Der Chloridgehalt des RC-Brechsands ist bei der Verwendung im Zementwerk zu berücksichtigen.

3.4 Eigenschaften von Betonbrechsanden aus Verkehrsbauwerken

Im Rahmen der 2023 durchgeführten grundhaften Erneuerung der BAB A 1 in Höhe Wildeshausen, Fahrtrichtung Osnabrück, wurde der Beton aus der rückgebauten Fahrbahndecke beprobt und analysiert. Die aufbereitete Betonfahrbahn wurde als Gesteinskörnung für die neue Frostschutzschicht verwendet. An der Probe wurde die Korngrößenverteilung mittels Siebung ermittelt und an dem labortechnisch gewonnenen RC-Brechsand 0/2 wurden zusätzlich die für die Zementherstellung relevanten Parameter ermittelt. Auf die Analyse von genehmigungsrelevanten Schwermetallen wurde in diesem Fall verzichtet, da das Material aufgrund der direkten Wiederverwendung als Straßenbaumaterial nicht für die Zementherstellung zur Verfügung stand.

Die Korngrößenverteilung der Probe ist in Bild 5 dargestellt. Durch die Art der Aufbereitung fallen 25 bis 35 % RC-Brechsand an, je nachdem, ob der Siebschnitt bei 2 mm oder bei 4 mm angesetzt wird. Tabelle 1 zeigt die chemische Zusammensetzung des Brechsands. Der Gehalt an SiO_2 ist, entsprechend dem Aufbereitungsverfahren, dominierend.

Insgesamt variiert die Zusammensetzung von RC-Brechsanden aus der Betonaufbereitung recht stark. Im Rahmen eines Großversuchs, siehe auch Abschnitt 3.5, wurde eine Vielzahl von RC-Brechsanden aus der Betonaufbereitung analysiert sowie verfügbare Literaturdaten ausgewertet. Die Streubreite der Zusammensetzungen ist in Bild 6 dargestellt. Auch der Anteil an RC-Brechsand, der beim Zerkleinern von Beton anfällt, variiert recht stark. Je nach Aufbereitungsverfahren zwischen 20 und 40 %.

Durch optimierte Aufbereitungsverfahren ist es möglich, den Zementstein weitestgehend von der primären Gesteinskörnung zu separieren. In den vergangenen Jahren wurden diverse Verfahren entwickelt, die teilweise bereits in der Anwendung sind. Ziel der optimierten Aufbereitung ist die Wiedergewinnung einer sauberen Gesteinskörnung, d. h. ohne Anhaftungen von Zementstein, sowie des separierten Zementsteins (Bild 7).

In Tabelle 2 ist die chemische Zusammensetzung von zurückgewonnenem Zementstein von unterschiedlichen Kornfraktionen angegeben. Bei den analysierten Proben handelt es sich um Zementsteinfraktionen eines optimierten Prozesses aus dem europäischen Ausland. Erwartungsgemäß steigt der Anteil an CaO und hydratisiertem Zementstein, je feiner die Probe ist. Der Gehalt an CaO ist jedoch nicht nur von der Feinheit abhängig, sondern auch von der ursprünglichen Betonzusammensetzung.

Zementstein aus Betonen mit klinkerreduzierten Zementen, z. B. Hochofenzement, weist in der Regel geringere CaO-Gehalte auf als Zementstein aus Betonen mit Portlandzement, die auch heute noch überwiegend zur Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton oder von Betonfertigteilen verwendet werden.

3.5 RC-Brechsande aus der Betonaufbereitung als Rohstoff für die Zementklinkerherstellung

Konventionell aufbereitete RC-Brechsande enthalten, wie bereits in Tabelle 1 und Bild 6 gezeigt, überwiegend SiO_2 und nennenswerte Anteile an CaO. Wie hoch der Beitrag von RC-Brechsand im Rohstoffmix zur

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung des Brechsands aus Betonfahrbahndecke BAB A 1 [12]

GLV 950 °C	CO_2	H_2O	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	Cl
					[M.-%]						
8,9	4,0	4,9	66,3	4,4	1,4	15,2	0,6	0,2	1,1	0,5	0,1

Senkung der prozessbedingten CO_2-Emissionen sein kann, hängt vor allem vom CaO-Gehalt ab. Der Gehalt wird maßgeblich, wie bereits in Abschnitt 3.4 beschrieben, von der Zusammensetzung des Betons sowie der Aufbereitung bestimmt.

Je besser der Zementstein vom Sand und von der groben Gesteinskörnung separiert wird, desto höher ist der CaO-Gehalt in der resultierenden Feinstfraktion.

Weiterhin beeinflusst die Lagerungsdauer des RC-Brechsands den Gehalt an CaO. Je länger der RC-Brechsand bewittert wird, desto höher ist die Carbonatisierungsrate. Insgesamt gilt: je höher der Anteil an CaO im RC-Brechsand, desto höher die mögliche Einsatzrate von RC-Brechsand im Rohmehlgemisch und desto größer der Beitrag zur Dekarbonisierung der Klinkerproduktion.

Im Rahmen eines Großversuchs zur Verwendung von RC-Brechsanden als Rohstoffkomponente zur Herstellung von Zementklinker im Zementwerk Göllheim der Dyckerhoff GmbH wurde eine Vielzahl von RC-Brechsanden bzgl. ihrer stofflichen Zusammensetzung und Eignung analysiert. Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt.

Bei dem internen Werksversuch wurden 4 % Primärrohstoffe durch RC-Brechsand ersetzt. Der mit dem Brechsand hergestellte Klinker wies die gleichen Eigenschaften auf wie der üblicherweise hergestellte Klinker. Der im RC-Brechsand enthaltene Anteil an CaO führte zusätzlich zu einer Minderung der rohstoffbedingten CO_2-Emissionen [13]. Würde man statt der RC-Brechsande den zurückgewonnenen Zementstein in reiner Form als Rohmehlkomponente verwenden, könnten die rohstoffbedingten CO_2-Emissionen unter idealen Bedingungen um bis zu 40 kg CO_2/t Zementklinker reduziert werden [5].

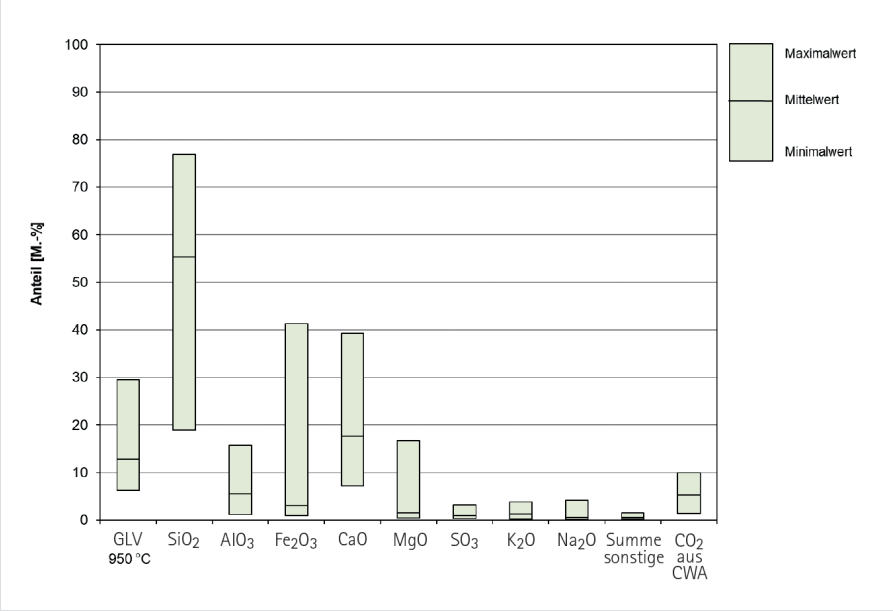

Bild 6: Varianz der Zusammensetzung von RC-Brechsanden mit Größtkorn 2 mm [13]

Bild 7: Zurückgewonnene Rohstoffe aus optimiertem Aufbereitungsprozess [Foto: Julia Scheidt, Dyckerhoff GmbH]

3.6 RC-Brechsande aus der Betonaufbereitung als Zementhauptbestandteil

In der Schweiz werden bereits seit mehreren Jahren Zemente mit Recyclingmehl auf Basis eines Merkblatts hergestellt und verwendet. Gemäß Merkblatt dürfen RC-Brechsande aus Betongranulat und aus Mischgranulaten zur Herstellung von Zement verwendet werden [15].

Im Rahmen des IGF-Vorhabens 282 EN [16] wurde die Verwendung von aufbereiteten Betonbrechsanden als Zementhauptbestandteil untersucht. Die Untersuchungen zeigten, dass Betone, die aus Zementen mit gemahlenem Brechsand als Zementhauptbestandteil hergestellt werden, vergleichbare Eigenschaften aufweisen wie Betone mit Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL). Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass die Eigenschaften der Betone mit Recyclingmehl verbessert werden können, wenn das Recyclingmehl carbonatisiert ist. Wie in Tabelle 2 dargestellt, kann der CaO-Anteil im Recyclingmehl durch eine selektive, optimierte Aufbereitung zusätzlich angereichert werden.

Das IGF-Vorhaben, diverse nationale und europäische Forschungsprojekte sowie die Erfahrungen aus der Schweiz bilden die Grundlage der Zementnorm DIN EN 197-6, Zement mit rezyklierten Baustoffen, die 2023 veröffentlicht wurde. Die Norm führt Betonrecyclingmehl mit dem Kürzel (F), abgeleitet aus „concrete fines“, als Zementhauptbestandteil ein.

Die Norm definiert zudem Herkunft und Anforderungen des Recyclingmehls sowie die Zusammensetzung der damit hergestellten Zemente. Als nicht-reaktives Material kann es analog zu Kalkstein im Zement verwendet werden. Je nach Zementart dürfen bis zu 35 M.-% Betonrecyclingmehl verwendet werden.

4 Fazit

Stoffströme mit hohem Anteil an reinem Altbeton, beispielsweise aus dem Rückbau von Bauwerken der Verkehrsinfrastruktur, sind wertvolle Ressourcen, die zur Herstellung von Zement und Beton genutzt werden können. Derzeit werden diese Stoffströme teilweise vor Ort in Frostschutzschichten wieder eingebaut oder aber zusammen mit Bauschutt zu sogenanntem RC-Baustoffen aufgearbeitet und stehen für eine direkte Wiederverwertung in Zement und Beton häufig nicht zur Verfügung.

Die bei der Aufbereitung von Beton anfal-

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung von Feinstfraktionen aus optimiertem Aufbereitungsprozess [14]

Bezeichnung	GLV 950 °C	CO_2	H_2O	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Zenmentsteinmehl 0-63 µm	26,3	5,8	20,4	38,1	6,6	1,6	20,7	2,1	1,5	1,1	0,6
Zementsteinmehl 63-250 µm	15,6	3,2	12,4	57,4	5,5	1,4	15,4	1,6	0,4	1,1	0,5

lenden RC-Brechsande können sowohl als Bestandteil des Rohmehls zur Herstellung von Zementklinker als auch als Haupt- und Nebenbestandteil von Zement gemäß DIN EN 197-6 verwendet werden. Dadurch können die Anteile an Primärrohstoffen zur Herstellung von Zementklinker und Zement sowie die rohstoffbedingten CO_2-Emissionen weiter reduziert werden.

Der Bedarf sowohl bei der Verwendung von RC-Gesteinskörnung im Beton als auch beim Einsatz von RC-Brechsand in der Klinker- oder Zementproduktion, übersteigt die derzeitige Verfügbarkeit deutlich, insbesondere vor dem Hintergrund der erweiterten normativen Möglichkeiten durch DIN 1045-2:2023-08 und DIN EN 197-6. Entscheidend für eine Maximierung der Verfügbarkeit sind ein sachgerechter und optimalerweise sortenreiner Rückbau sowie eine gezielte Aufbereitung des Betons. So wird es künftig möglich sein, den Anteil an primären Rohstoffen zur Herstellung von Zementklinker und Zement weiter zu reduzieren, sofern es gelingt, die mineralischen Bauabfälle, insbesondere den Beton, im Kreislauf der Zement- und Betonherstellung zu halten.

Literaturverzeichnis

[1] Rohstoffstrategie der Bundesregierung, Bundesministerium für Wirschaft und Energie (BMWi), Stand Dezember 2019

[2] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf 2022

[3] Eiserner Vorsatz – Die CO_2-intensiven Hochöfen weichen Direktreduktionsanlagen, VDI Nachrichten, Ausgabe vom 16.6.2023

[4] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg): Zahlen und Daten 2022 – Zementindustrie in Deutschland

[5] Verwendung von RC-Materialien in Klinker&Zement; Cordes, W., Neumann, T., Palm, S., Schuster, T., Sievert, T., Severins, K., Fachtagung Zementchemie, Verein Deutscher Zementwerke, März 2023

[6] Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton; Herrmann, J., Kruspan, P., Palm, S., Scheidt, J., Wagner, E., Fachtagung Zementchemie, Verein Deutscher Zementwerke, März 2023

[7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-3.17-2189, Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 N (rc) „Königs Wusterhausen“

[8] Scheidt, J.: Einfluss der Wasseraufnahme von rezyklierten Gesteinskörnungen auf den Wasserzementwert von R-Beton, Beton Heft 4/2020

[9] Oesterheld, R., Peck, M., Villaret, S.: Straßenbau heute – Band 1 Betondecken, 7. Überarbeitete Auflage, Verlag Bau+Technik GmbH 2018

[10] Eickschen, E., Müller, C.: Alkali-Kieselsäure-Reaktion im kommunalen Straßenbau, Betontechnische Berichte, Beton Heft 4/2018

[11] Auswirkungen der Alkalizufuhr durch Taumittel auf Bindemittel für Beton mit alkalireaktiven Gesteinskörnungen, Kurzfassung, IGF-Vorhaben 15977 N, Verein Deutscher Zementwerke

[12] Interner Untersuchungsbericht BAB A 1, Dyckerhoff GmbH 2023

[13] Interner Untersuchungsbericht Brechsand Göllheim, Dyckerhoff GmbH 2023

[14] Interner Untersuchungsbericht Feinstfraktionen aus der Betonaufbereitung, Dyckerhoff GmbH 2023

[15] Factsheet Holcim Susteno 4, Holcim (Schweiz) AG

[16] LeptoCalc – Verwendung von Feinanteilen aus dem Betonrecycling als Zementhauptbestandteil, Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 282 EN, VDZ Technology gGmbH

C. Drewes, D. John, H.-H. Meseberg
2015, 312 Seiten, DIN B5, Hardcover
84,– € inkl. MwSt. und Versand im Inland
ISBN 978-3-7812-**1940**-3

Auch als E-Book inkl. KV-Reader erhältlich!
(Einzelplatz-Lizenz) erhältlich!

ZTV M 13

Handbuch und Kommentar für Markierungen auf Straßen

Die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Markierungen auf Straßen“, Ausgabe 2013 (ZTV M 13) nehmen sowohl Auftraggeber als auch Auftragnehmer durch zahlreiche Neuerungen stärker in die Pflicht.

Mit ARS Nr. 24/2013 hat das BMVI – damals noch BMVBS – **die ZTV M 13** bekannt gegeben. Im Gegensatz zu den ZTV M 02 behandelt das neue Regelwerk nicht nur endgültige weiße Markierungen, sondern auch vorübergehende gelbe Markierungen. Darüber hinaus gibt es aber noch weitere **grundlegende Neuerungen**, die in der Kommentierung eingehend behandelt und erläutert werden. So wird z. B. bei den Anforderungen an die Tages- und Nachtsichtbarkeit von endgültigen Markierungen zwischen Anforderungen im Neuzustand und solchen im Gebrauchszustand unterschieden, um den üblichen Verschleiß angemessen zu berücksichtigen. Auch wird in den ZTV M 13 erstmals empfohlen, wann eine Fahrbahnmarkierung erneuert werden sollte, weil sie ihre Funktion nicht mehr erfüllt. Markierungsfirmen, die im Geltungsbereich der ZTV M 13 arbeiten wollen, müssen sich zukünftig zertifizieren lassen und dabei nachweisen, dass sie alle Anforderungen erfüllen, die das neue Regelwerk u. a. an Maschinen und Personal stellt.

Ziel der Kommentierung ist es, insbesondere die zahlreichen Neuerungen eingehend zu erläutern und praxisgerechte Vorgehensweisen anzubieten. Auch Fragen, die sich bereits aus der praktischen Anwendung der ZTV M 13 ergeben haben, werden aufgegriffen und behandelt. Neben der Kommentierung der ZTV M 13 werden auch weitergehende Hinweise gegeben und Zusammenhänge mit europäischen Normen und anderen Regelwerken aufgezeigt.

Um einen vollständigen Blick auf das aktuelle Regelwerk zur Markierung zu erhalten, wurden wichtige Auszüge aus den Technischen Lieferbedingungen, den Hinweisen zu Markierungen auf neuen Fahrbahnoberflächen sowie die geltenden RMS Teil 1 und 2 mit in das Werk integriert.

KIRSCHBAUM

Weitere Infos/Online-Bestellung unter
www.kirschbaum.de