

# **Abschlussbericht**

## **BMBF Forschungsvorhaben**

**Förderkennzeichen: 033R076C**

**KMU-innovativ – Verbundvorhaben Ressourceneffizienz**

*„Konstruktion einer elektrodynamischen Aufbereitungsanlage für Altbeton zur Rückgewinnung von Rohstoffen für die Zementindustrie“*

**Zuwendungsempfänger:**

Fraunhofer IBP

SCHWENK Zement KG

Leiblein GmbH



**Bearbeiter:**

Dr. Volker Thome, Fraunhofer IBP

**Laufzeit des Vorhabens:** 01.04. 2012 – 31.03. 2014

**Datum:** Holzkirchen, September 2014

## **I. Kurze Darstellung**

### **I.1. Aufgabenstellung**

Beton ist mengenmäßig nach Wasser das meistbenutzte Material der Erde, dementsprechend groß sind die jährlich anfallenden Abfallmengen an Bauschutt mit ca. 900 Mio. t / a in USA, Europa und Japan. Wiederverwertung von Altbeton kommt daher aus politischen und ökologischen Gründen eine immer höhere Bedeutung zu. Insbesondere sind hier zu nennen:

- intensive Entnahme natürlicher Rohstoffe für die Beton- und Zementherstellung (Kalkstein, Kies/Splitt, Sand und Ton)
- die damit verbundenen hohen CO<sub>2</sub>-Emissionen
- Auflagen des Gesetzgebers zur Wiederverwertung gebrauchter Baustoffe
- Verknappung von Deponieraum

Die bisher zur Altbetonaufbereitung eingesetzten Techniken erlauben kein echtes Recycling. Ursache dafür ist, dass Beton als Verbundmaterial aus Gesteinskörnung (Kies, Sand) und aus der Bindemittelmatrix, dem Zementstein besteht. Die mit mechanischen Aufbereitungsmethoden hergestellten sog. recycelten Gesteinskörnungen führen bei ihrer Wiederverwertung im Frischbeton zu einer Reihe von bekannten Problemen und werden daher meist als Straßenschotter oder als Füllmaterial verwertet. Altbeton kann nur dann effektiv recycelt werden, wenn es gelingt, die Gesteinskörnung möglichst vollständig und unbeschädigt von dem Zementstein zu trennen. Damit könnte zum einen die Gesteinskörnung wieder als solche verwendet werden, während der Zementstein z.B. als Rohstoff für die Zementherstellung Verwendung finden könnte.

Eine innovative Technik um Verbundwerkstoffe selektiv aufzutrennen ist die sog. elektrodynamische Fragmentierung. Dabei werden Festkörper durch elektrische Unterwasser-Entladungen entlang ihrer Korngrenzen aufgetrennt. Diese Methode fand für Altbeton bislang keine großtechnische Anwendung, da trotz effektiver Auftrennung die Durchsatzraten von 1 t / h zu gering und sowohl die Energiekosten als auch der Wasserverbrauch zu hoch waren. Durch eine neu entwickelte Entladungstechnik, welche deutlich weniger Energie verbraucht und damit im Bereich der Energiekosten einer mechanischen Aufbereitung liegt, ist mittlerweile ein höherer Materialdurchsatz möglich. In diesem abgeschlossenen Projekt sollte eine Labor-Fragmentierungsanlage mit einer Wasseraufbereitungsanlage kombiniert und so ein kontinuierlicher Betrieb gewährleistet werden. Weiterhin sollten die Produkte dieses Verfahrens hinsichtlich ihres Recyclingpotentials untersucht und bewertet werden. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen sollte im Anschluss an das Projekt ein Prototyp entwickelt werden, der zunächst in Transportbetonwerken zur Anwendung kommen sollte, um aus Altbeton vor Ort wieder Gesteinskörnungen für Frischbeton zurückzugewinnen.

## **I.2 Voraussetzungen unter denen das FE-Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt ist einzuordnen unter dem Förderprogramm KMU – Innovativ „Ressourcen- und Energieeffizienz“ des BMBF - Schwerpunkt: „Ressourceneffizienz“. Das angestrebte Recyclingverfahren trägt insgesamt zu einer Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zementindustrie, Ressourcenschonung von Kalksteinbrüchen, Kies- und Tongruben, sowie zu einer Schonung von Deponieflächen bei. Das Projektvorhaben verbindet als Querschnittsthema die Bereiche der Materialwissenschaften (Betontechnologie) und Verfahrenstechnik (Recycling & Aufbereitung).

Das Fraunhofer IBP möchte sich in Zukunft verstärkt der Aufbereitung von mineralischen Stoffen für die Herstellung von Bausubstanzen widmen und setzt dabei auf innovative Technologien wie der elektrodynamischen Fragmentierung. Die Umsetzung dieser Aufbereitungstechnologie für Altbeton für den nationalen und internationalen Markt erfordert die Bündelung verschiedener Kompetenzen aus den Bereichen Baustoffentwicklung, Maschinenbau, Mineralogie, Wasserchemie und Verfahrenstechnik. Diese Kompetenzen waren in dem Projekt-Konsortium, bestehen aus dem Fraunhofer IBP, der SCHWENK Zement KG und der Fa. Leiblein GmbH vertreten. Die intensive Zusammenarbeit im Zuge dieses Projektes lieferte die entsprechenden Bedingungen für ein hohes Maß an technologischen Erkenntnissen und Resultaten, die im folgenden Schlussbericht dargestellt werden.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Planung und Durchführung der Arbeiten gliederten sich entsprechend des Projektantrages in die unten genannten Arbeitspakete. Änderungen in der Durchführung der Arbeiten ergaben sich im Punkt „Verwendung der Feinfraktionen als Zementzumahlstoff“ und in dem darauf aufbauenden Arbeitspaket („Optimierung der Menge“).

## **I.4 Anknüpfung an den wissenschaftlichen technischen Stand**

### **I.4.1 Wissenschaftlicher Stand**

Das Prinzip der elektrodynamischen Fragmentierung wurde bereits in den 40er Jahren des letzten Jahrhunderts an der Universität Tomsk (RUS) entdeckt. Das Forschungszentrum Karlsruhe (jetzt: KIT) hat in Zusammenarbeit mit der Polytechnischen Universität Tomsk eine Fragmentierungsanlage mit einem Durchsatz von 1 t / h entwickelt und patentiert:

„Prozessreaktor und Betriebsverfahren für die elektrodynamische Fragmentierung“ Patent Nr.: EP1673172 (2008), Hoppe, P. et al. FZK GmbH, 76133 Karlsruhe (D)

Die Firma selfrag ist Lizenznehmer des KIT Karlsruhe und hat ein eigenes Patent angemeldet: EP2 266 701 A1: „Arbeitselektrode für eine elektrodynamische Fragmentierungsanlage“ Veröffentlichungstag: 29.12. 2010

Das US Patent: 7,258,737 B2 „Method for recycling concrete waste“ von 2007 beschreibt eine thermisch-mechanische Aufbereitung von Altbeton. Altbeton wird zunächst auf 500 °C aufgeheizt, danach gemahlen und anschließend unter Zugabe von CaO auf 700 °C erhitzt, um den Aufschlussgrad zu verbessern. Von einem energetischen Standpunkt aus macht dieses Verfahren wenig Sinn.

#### Bisherige Arbeiten des Antragstellers

In einer Diplomarbeit des Antragstellers konnte bereits 1998 die Anwendbarkeit dieses Verfahrens für Altbeton im Labormaßstab gezeigt werden.



Durch die elektrodynamische Fragmentierung lässt sich Altbeton wieder in Kies, Kalk, Zementstein und Bewehrung auftrennen (siehe **Abb. 1**). Der Kalk entsteht durch eine Karbonatisierung des alkalischen Prozesswassers, welches gelöste  $\text{Ca}^{2+}$  Ionen enthält.

**Abb. 1:** fragmentierter Altbeton, zerlegt in Kies, Kalk und Zementstein, Diplomarbeit V. Thome in Karlsruher Forschungszentrum (1998): „Mineralogische Veränderungen in Glimmer und Zementhydraten nach einer elektrodynamischen Behandlung“.

#### I.4.2 Technischer Stand

Ein elektrodynamisches Verfahren zur Bearbeitung von Betonoberflächen wurde schon erfolgreich mit einer Wasseraufbereitungsanlage kombiniert [1]. Aufgrund der bekannten

Probleme ist der Energieaufwand ohne die „Streamers-Technik“ mit bis zu 1000 J / cm<sup>3</sup> sehr hoch und der Durchsatz mit ca. 0,3 m<sup>3</sup> / h sehr gering.

Nach unserem Kenntnisstand existiert auch derzeit auf dem Markt kein Verfahren, welches die Aufbereitung von Altbeton mit Rückgewinnung von hochwertigen Zuschlägen und potentiellen Rohstoffen für die Zementherstellung ermöglicht.

## **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Als Unterauftragnehmer haben sich die UVR-FIA und die selfrag AG (CH) an diesem Projekt beteiligt. UVR-FIA war verantwortlich für die mechanische und selfrag für die elektrodynamische Aufbereitung der Betonproben.

## **II Eingehende Darstellung**

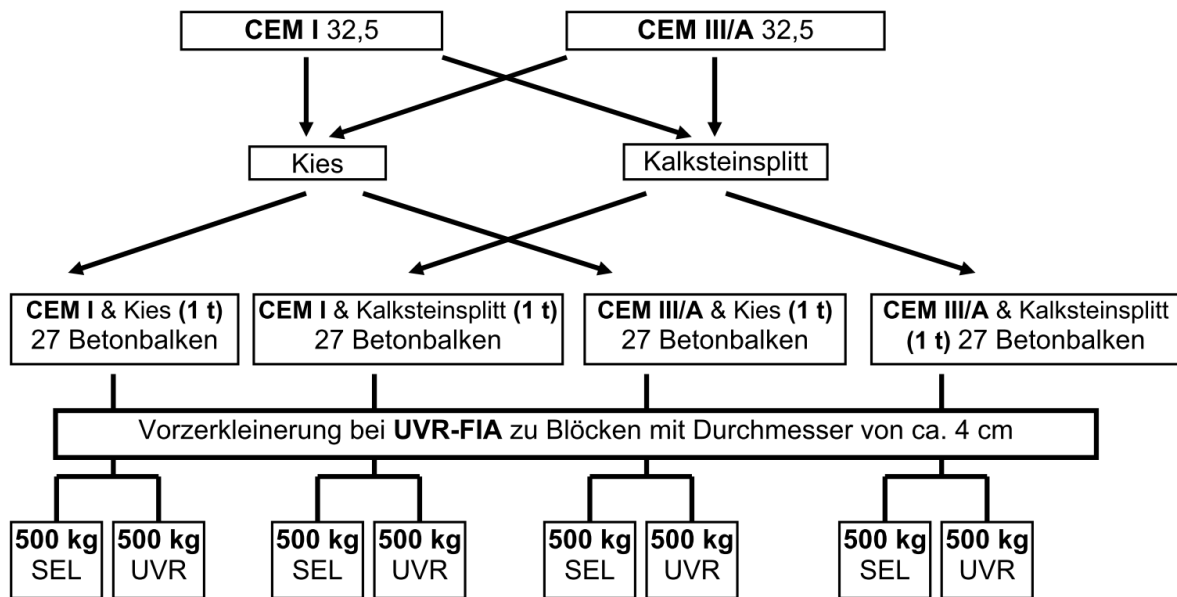
### **II.1 des erzielten Ergebnisses**

#### **AP 1: Herstellung von Betonprüfkörpern und Einstellen der Geräteparameter**

Das Ziel des Arbeitspaketes 1 bestand darin, vier verschiedene Ausgangsbetone herzustellen. Die Ausgangsbetone sollten anschließend vorgebrochen werden und zur mechanischen und elektrodynamischen Zerkleinerung vorbereitet werden.

Von Seiten der SCHWENK Zement KG wurden zunächst ausreichend große Mengen an Gesteinskörnungen für das Projekt zur Verfügung gestellt. Die Gesteinskörnungen (quarzitische Sand 0-2 mm, quarzitische Kies 2-8 mm, 8-16 mm, 16 – 32 mm sowie Kalksteinbrechsand 0-2 mm, Kalksteinsplitt 2-8 mm, 8-16 mm, 16 – 32 mm) wurden nach Bereitstellung zum Fraunhofer-Institut IBP zur Herstellung der Betone verschickt. Ebenso erfolgte die Probenahme und der Versand eines Portlandzementes CEM I 32,5 R und eines Hochofenzementes CEM III/A 32,5 N. Anhand von Erstprüfungen wurden bei SCHWENK mit den Ausgangskomponenten 4 Betone mit gleichem w/z-Wert und ähnlicher Festigkeitsentwicklung konzipiert und die Rezepturen dem IBP zur Verfügung gestellt.

Am IBP erfolgte daraufhin die Herstellung von vier verschiedenen Betonen in der Kombination aus den jeweils zwei verschiedenen Zementen und Gesteinskörnungen entsprechend dem nachfolgenden Schema (**Abb. 2**).



**Abb. 2:** Graphische Darstellung des Arbeitspaketes 1, Herstellung des Ausgangsmaterials und Halbierung für mechanische und elektrodynamische Aufbereitung.

### AP 1.2 Vorzerkleinerung der Betonprüfkörper

Die vier Betone wurden beim Auftragnehmer, der UVR-FIA GmbH, auf handliche Stückgröße von ca. 4 – 8 cm Durchmesser vorzerkleinert. Die vier Betone wurden anschließend geteilt und jeweils eine Hälfte zum Auftragnehmer SELFRAG AG zur elektrodynamischen Zerkleinerung verschickt bzw. die jeweils andere Hälfte zur mechanischen Aufbereitung bei der UVR-FIA GmbH belassen.

### AP 1.3 Einstellen der Geräteparameter

Durch Vorversuche auf der Laboranlage am IBP zur elektrodynamischen Aufbereitung von Altbeton, konnten erste Grenzwerte für die Prozessparameter ermittelt werden. Die Mindestspannung beträgt 160 kV, bei geringerer angelegter Spannung wird eine effektive Trennung zwischen Gesteinskörnung und Zementstein erschwert, die Produkte ähneln dann einem mechanisch aufbereiteten Beton. Die ermittelten Geräteparameter wurden Selfrag übermittelt, um eine erste Auswahl an geeigneten Fragmentierungsverfahren zu treffen.

## AP 2 Aufbereitung und Analyse

### AP 2.1 Zerkleinerung der Betonproben

Der Unterauftragnehmer selfrag plante die Aufbereitung des bereitgestellten "Altbetons" auf der neu entwickelten „Pre-weakening-Test-Station“ durchzuführen (siehe Zwischenbericht Nr.1), um den Energieverbrauch weiter zu minimieren. Diese Anlage war noch mit ein paar „Kinderkrankheiten“ behaftet, welche Probleme für die Durchführung der geplanten Arbeiten bereiteten und zu Verzögerungen führten. Zudem lagen mit der neuen Anlage noch keine Erfahrungswerte für die Aufbereitung von Altbeton vor. In Zusammenarbeit zwischen selfrag und dem IBP wurden daher ca. 20 Optimierungsversuche durchgeführt, um verschiedene Kombinationen von Anlagen-Komponenten zu testen:

So musste ein geeigneter Generator gebaut, die Entladungstechnik angepasst und die Elektrodenkonfiguration geändert werden. Mittlerweile läuft die Anlage (zwar noch ohne Wasseraufbereitung, aber mit einer Wasserspülung) und die Arbeiten zu AP 3 konnten nach einer mehrwöchigen Verspätung abgeschlossen werden. Die Betonproben wurden elektrodynamisch fragmentiert und die prozentualen Anteile an Grob- (> 2 mm) und Feinfraktion (< 2 mm) ermittelt.

In Zusammenarbeit mit selfrag konnte ein mehrstufiger Prozess („Flowsheet“) entwickelt werden, mit dem es möglich ist, Altbeton bis zu einer Korngröße von > 4 mm effektiv aufzubereiten, d.h. den Kies sauber vom Zementstein zu trennen (siehe **Abb. 3**).



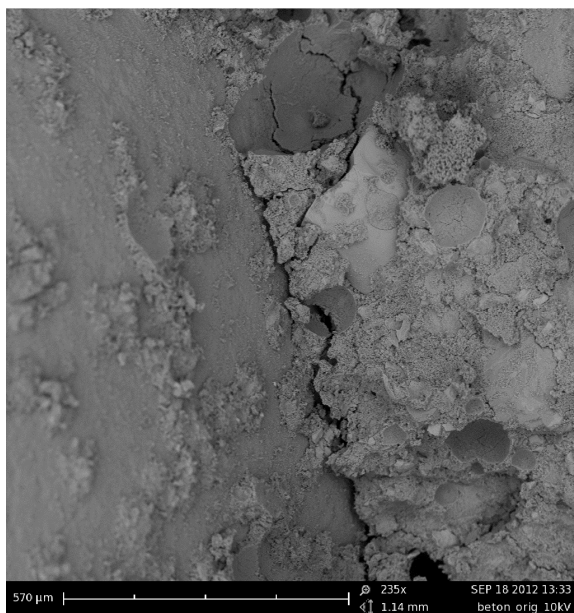
**Abb. 3:** Altbeton vor und nach einer elektrodynamischen Fragmentierung.

Um auch Korngrößen < 4 mm aufzubereiten, ist jedoch eine Wasseraufbereitung notwendig. Es konnten erste Kenngrößen (Durchflussmenge von Frischwasser durch Prozesszone: mindestens: 4 m<sup>3</sup> / h) ermittelt werden.

## AP 2.2 Analyse

### Analyse der zerkleinerten Betonproben

Sowohl die fragmentierten als auch die mechanisch aufbereiteten Produkte wurden am IBP röntgenographisch untersucht und mit Hilfe eines externen Standards der Anteil an amorphen Phasen bestimmt. Dabei zeigte sich ein eindeutiger Trend. In den fragmentierten Proben war oberhalb einer Korngröße von 2 mm nur minimale Anteile amorpher Phasen zwischen 0 - 2 Gew. % nachzuweisen, der Großteil (20 - 30 Gew. %) befand sich im Filtrat des Prozeßwassers. Die Fraktionen 2 - 5 mm enthielten zwischen 6 - 15 Gew. % amorpher Phasen. In den mechanisch aufbereiteten Proben hingegen konnten in allen Fraktionen amorphe Phasen nachgewiesen werden. Dies zeigt, daß die Fragmentierung zu einer selektiven Trennung der amorphen Phasen (aus dem Zementstein) von den Zuschlägen führt (siehe **Abb. 4**).



**Abb. 4:** linkes Bild: mechanisch gebrochener Altbeton, es sind noch deutlich Anhaftungen von Zementstein auf Kies zu erkennen, rechtes Bild: fragmentierter Altbeton, die Kiesoberfläche ist frei von Zementstein, es konnte lediglich Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) nachgewiesen werden.



## **AP 3.1: Recycling der fraktionierten Gesteinskörnungen - Grobfraktion > 2 mm - in Neu-Beton**

### **Korngrößenverteilung**

Nach deutlichen Verzögerungen bei der Aufbereitung der Betone aufgrund technischer Schwierigkeiten wurden die Aufbereitungsprodukte der elektrodynamischen Fragmentierung und mechanischen Zerkleinerung zu SCHWENK geliefert. Die elektrodynamisch fragmentierten und die mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnungen der Fraktionen > 2 mm wurden bei der SCHWENK Zement KG zunächst hinsichtlich ihrer Eignung zum erneuten Einsatz im Beton analysiert. Dabei bestand die Fraktion > 2 mm bei der elektrodynamischen Zerkleinerung überwiegend aus Gesteinskörnung mit sehr wenigen anhaftenden Zementsteinresten. Das mechanisch aufbereitete Material hingegen enthielt neben der Gesteinskörnung noch erhebliche Anteile an Zementstein.

Im ersten Schritt erfolgten zunächst Siebanalysen zur Bestimmung der Kornverteilungen. Anhand der ermittelten Körnungsverteilung wurden Sieblinien erstellt, die möglichst nahe an den Sieblinien der Ausgangsgesteinskörnungen (Kies-Sand bzw. Kalksteinsplitt) lagen und einen vergleichbaren Einsatz in neuem Beton ermöglichen sollten. Es stellte sich bei den Siebanalysen heraus, dass mit den elektrodynamisch fragmentierten Gesteinskörnungen mit Korngrößen zwischen 2 und 32 mm nahezu identische Sieblinien zu den Referenzgesteinen erzeugt werden konnten. Nachteilig für den direkten Vergleich in neuem Beton waren jedoch die Kornbänder der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnungen. Hier lag das Material lediglich in den Fraktionen 0-2 mm und 2–8 mm vor, während die elektrodynamisch fragmentierten Gesteinskörnungen in verschiedenen Abstufungen mit Größtkorn bis 32 mm für einen Neu-Beton deutlich besser geeignet waren. Die exakte Anpassung identischer Sieblinien zur Ausgangskörnung war mit den mechanisch aufbereiteten Materialien nicht möglich. Die einzelnen Sieblinien aller 10 Vergleichsbetone aus den bereitgestellten Körnungen der aufbereiteten Materialien sind im Anhang in **Abb. 24 – 33** aufgeführt. Exemplarisch sind im Anhang in den **Abb. 34 – 41** die einzelnen Körnungen des elektrodynamisch und mechanisch aufbereiteten Betons aus CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand) abgebildet.

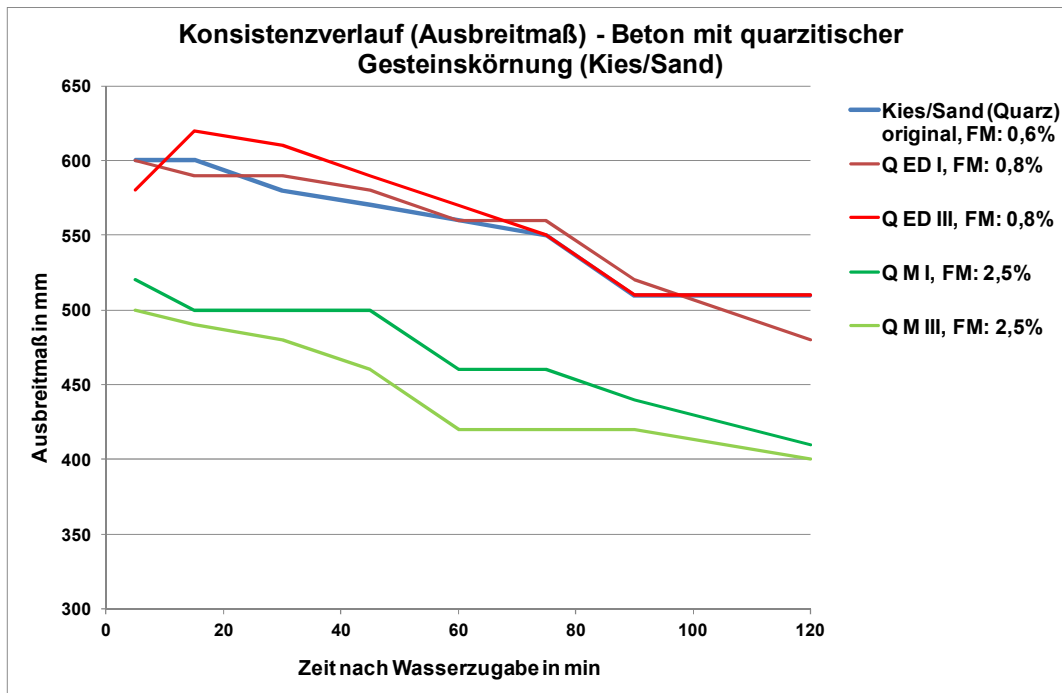
### **Frischbetonprüfungen**

Zum direkten Vergleich der aufbereiteten Gesteinskörnungen wurden zwei Betone mit original Gesteinskörnung (Kies-Sand und Kalksteinsplitt-Brechsand) sowie in der jeweiligen Materialprovenienz vier Betone mit den aufbereiteten Gesteinskörnungen und identischer

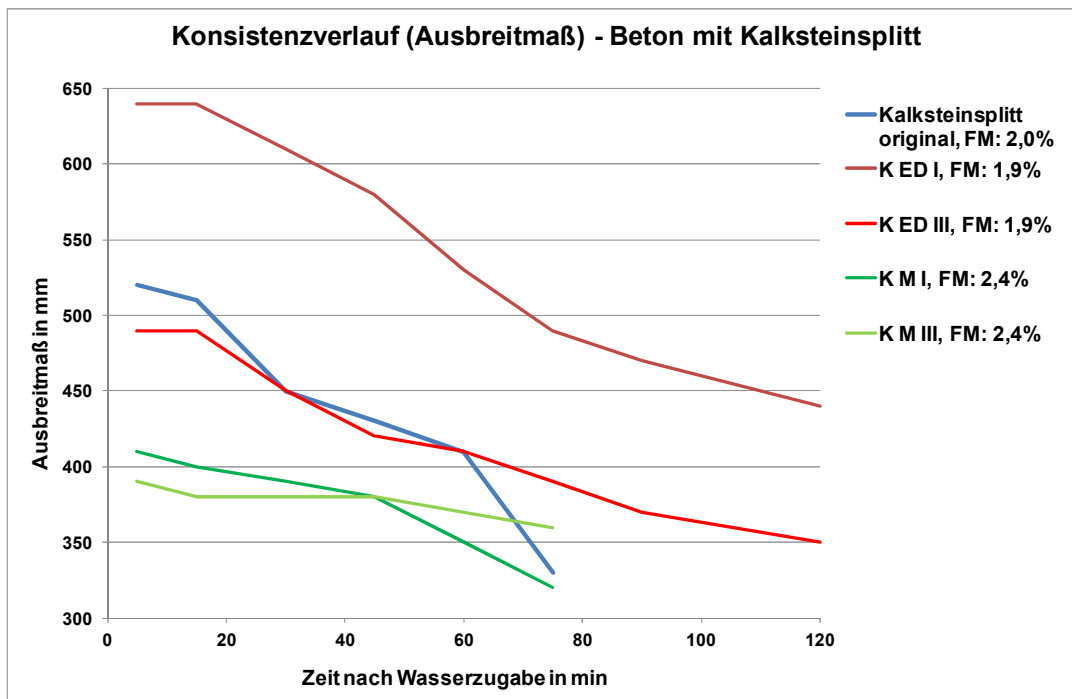
Zusammensetzung (Zement: CEM I 42,5 R 380 kg/m<sup>3</sup>, w/z-Wert: 0,45, Zielfestigkeit: C35/45) hergestellt und hinsichtlich ihrer Frisch- und Festbetoneigenschaften miteinander verglichen.

Zunächst erfolgte die Ermittlung der Konsistenz nach DIN EN 12350-5:2009 [2] zur Bewertung der Verarbeitbarkeit. Dabei wurde eine Zielkonsistenz von ca. 600 mm angestrebt. (Konsistenzklasse F5). Weiterhin wurde das Rücksteifverhalten der Betone über einen Zeitraum von 2 h dokumentiert. Dabei zeigte es sich, dass die beiden Betone mit der elektrodynamisch aufbereiteten Sand/Kies-Gesteinskörnung mit minimal höherem Fließmittelanspruch nahezu identische Konsistenzverläufe aufweisen (siehe **Abb. 5**). Die mechanisch aufbereiteten Sand/Kies-Gesteinskörnungen hingegen benötigten erheblich mehr Fließmittel (2,5 % vom Zement statt 0,8%) zur Verflüssigung. Selbst mit dem erheblich höheren Fließmittelgehalt zeigten diese beiden Betone eine deutlich schlechtere Verarbeitbarkeit und Konsistenzhaltung.

Erfahrungsgemäß sind die Ausbreitmaße von Betonen mit gebrochener Gesteinskörnung im direkten Vergleich zu Körnungen mit Rundkorn (Kies/Sand) etwas niedriger bei höherem Fließmittelanspruch. Dies konnte auch an Betonen mit Kalksteinsplitt beobachtet werden. Die beiden Betone mit elektrodynamisch aufbereiteter Gesteinskörnung zeigten trotz dem leicht geringeren FM-Anspruch eine gleiche bzw. bessere Konsistenzhaltung als der Beton mit originalem Kalksteinsplitt-Brechsand. Hingegen wiesen die Betone mit der mechanisch aufbereiteten Kalkstein-Gesteinskörnung wiederum einen extrem hohen Fließmittelbedarf auf, bei deutlich kleinerem Ausbreitmaß und starkem Rücksteifen (siehe **Abb. 6**).



**Abb. 5:** Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5, Gesteinskörnung: Kies-Sand.



**Abb. 6:** Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5, Gesteinskörnung: Kalksteinsplitt-Brechsand.

### Festbetonprüfungen

Zur Bewertung der aufbereiteten Gesteinskörnung gegenüber der frischen Gesteinskörnung erfolgten an den 10 Betonen vergleichende Festbetonprüfungen. Dabei wurden Probekörper

nach DIN EN 12390-2:2009 [3] hergestellt und entsprechend gelagert. Die Prüfung der Betondruckfestigkeiten erfolgte gemäß DIN EN 12390-3:2009 [4] nach 1d, 2d, 7d, 28d, 56d und 91d an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge (siehe Anhang **Abb. 42 - 43**). Es zeigte sich dabei, dass alle Betone mit recycelter Gesteinskörnung bezüglich der Festigkeitsentwicklung gleichwertig waren bzw. zum Teil sogar höhere Druckfestigkeiten aufwiesen, als die Betone mit originaler Gesteinskörnung. Offensichtlich wurden bei der elektrodynamischen Aufbereitung an den Kornaggregaten anhaftende Bestandteile von minderer Festigkeit oder Gefügestörungen gelöst und ausgewaschen, so dass trotz identischer Betonzusammensetzung höhere Druckfestigkeiten erzielt wurden. Bei den mechanisch aufbereiteten Körnungen kommt es durch den extrem hohen Fließmittelgehalt teilweise zu einer verzögerten Reaktion (1d), die jedoch mit fortschreitender Hydratationsdauer kompensiert wird.

Die statischen E-Module (geprüft nach DIN 1048-5:1991 [5]) lagen untereinander in ähnlicher Größenordnung. Lediglich die beiden Betone mit der mechanisch aufbereiteten Kalksteinsplittkörnung wiesen niedrigere E-Module auf. Offensichtlich führte diese Aufbereitungsmethode an dem weicheren Kalkstein zu Schädigungen im Mikrogefüge der Aggregate.

Als Indiz für die Dichtigkeit eines Betons gegenüber eindringenden Medien wird u.a. die Prüfung der Chloridmigration angesehen. Im Prüfverfahren nach Tang und Nilsson [6] wurden die Probekörper (Bohrkerne mit 50 mm Länge und Durchmesser) mit einer 3%igen NaCl-Lösung unter Anlegung einer Spannung von 30 V über 24 h beaufschlagt. Anschließend erfolgte die Spaltung der beaufschlagten Proben und Ermittlung der Eindringtiefe mit Hilfe einer Indikatorlösung (siehe Anhang **Abb. 44**). Über ein Berechnungsverfahren wird unter Berücksichtigung der Randbedingungen und der Eindringtiefe der so genannte Chloridmigrationskoeffizient errechnet. Erfahrungsgemäß zeichnet ein Chloridmigrationskoeffizient von  $x \cdot 10^{-12}$  einen sehr dichten Beton aus. An den geprüften Betonen wurden Chloridmigrationskoeffizienten zwischen  $4 \cdot 10^{-12}$  und  $8 \cdot 10^{-12}$  ermittelt. Somit sind alle Betone mit frischer und mit aufbereiteter Gesteinskörnung als sehr dicht einzustufen. Die ermittelten minimalen Unterschiede zwischen den Betonen sind erfahrungsgemäß dem Prüfverfahren geschuldet.

Die Prüfung der Karbonatisierungstiefen erfolgten nach DIN EN 14630:2006 [7] an Würfeln mit 100 mm Kantenlänge über einen Zeitraum von 356 Tagen. Die Lagerung der Betonwürfel erfolgte nach DIN EN 12390-2:2009 [3] bei 20°C und 65° relativer Luftfeuchte. Aufgrund der sehr hohen Dichtigkeit der Betone konnten selbst über einen Prüfzeitraum von einem Jahr

keine Karbonatisierungstiefen an den Probekörpern gemessen werden. Die verwendete Gesteinskörnung wirkte sich offensichtlich nicht negativ auf die Dichtigkeit der Betone aus.

Als weitere Festbetonprüfung zur Bewertung der Dauerhaftigkeit erfolgten die Prüfungen des Frostwiderstandes nach dem CF-Prüfverfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [8]. Nach 28 bzw. 56 Frost-Tau-Wechseln erfolgte die Bewertung (siehe Anhang **Abb. 46**). In Deutschland sind Grenzwerte für einen hohen Frostwiderstand z. B. im "Merkblatt Frostprüfung von Beton" der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) [9] definiert. Das Merkblatt gibt neben einem Abnahmekriterium für die innere Schädigung (Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls) für einen hohen Frostwiderstand des Betons eine Abwitterung von  $\leq 1.000 \text{ g/m}^2$  nach 28 Frost-Tau-Wechseln vor. Die Betone zeigten unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung einen sehr hohen Frostwiderstand. Selbst nach 56 Frost-Tauwechseln wird der Grenzwert von  $1.000 \text{ g/m}^2$  weit unterschritten.

Unabhängig von den Unterschieden im Frischbeton zeigten alle 4 Betone mit mechanisch und alle 4 Betone mit elektrodynamisch aufbereiteter Gesteinskörnung im Festbeton vergleichbare Festbetoneigenschaften (Druckfestigkeit, E-Modul, Frostwiderstand, Chloridmigration und Karbonatisierungstiefen) gegenüber den Betonen mit original Gesteinskörnung. Abweichend vom beantragten Prüfprogramm konnten die Eigenschaften Schwinden, Quellen, Kriechen und Permeabilität nicht geprüft werden, da mit den aufbereiteten Gesteinskörnungen nur begrenzte Betonmengen (je Beton max. 60 Liter) hergestellt werden konnten und somit die Menge der möglichen Probekörper stark eingeschränkt war.

Als Fazit der Vergleichsprüfungen kann der elektrodynamisch fragmentierten Gesteinskörnung in den Frisch- und Festbetoneigenschaften eine absolute Gleichwertigkeit gegenüber originaler Gesteinskörnung  $> 2 \text{ mm}$  bescheinigt werden. Die mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnungen zeigen zwar vergleichbar gute Festbetoneigenschaften, jedoch sind Verarbeitbarkeit und Fließmittelanspruch dieser Gesteine im Frischbeton deutlich schlechter und für den Praxiseinsatz eher ungeeignet.

### **AP 3.2 Recycling der Feinfraktion ( $< 2 \text{ mm}$ ) und AP 3.3 Optimierung des Zusatzstoffanteils**

Ziel der beiden Arbeitspakete 3.2 und 3.3 war es, die bei den mechanisch und elektrodynamisch aufbereiteten Betonen angefallenen Materialien  $< 2 \text{ mm}$  als hydraulischen Zusatzstoff (Zementersatz) oder als inerte Sandkomponente in neuem Beton einzusetzen und die Eigenschaften zu vergleichen bzw. die Einsatzmenge zu optimieren. Dabei sollte der

eingesetzte Standardzement mit 5%, 10% und 15% sowie einer optimierten Menge an Feinfraktion ersetzt werden.

Im Förderantrag war vorgesehen, die Untersuchungen direkt an Betonabmischungen mit den verschiedenen Zugabemengen durchzuführen. Abweichend vom Förderantrag wurde zunächst geprüft, ob das Feinmaterial überhaupt eine hydraulische Aktivität (Festigkeitsbeitrag zur Zementhydratation) zeigt. Grundlage hierfür war die Prüfung des Aktivitätsindex in Anlehnung an die DIN EN 450-1:2005 [10] und die Prüfung der Hydratationswärmeentwicklung. Bei der Prüfung des Aktivitätsindex gemäß DIN EN 450-1:2005 [10] werden die Druckfestigkeiten von genormten Mörtelprismen nach DIN EN 196-1:2005 [11] miteinander verglichen. Dabei wird zunächst als Referenz ein Normmörtel mit vollem Zementanteil hergestellt. Demgegenüber erfolgt die Herstellung eines Normmörtels mit 75% Zement und 25% Flugasche bzw. dem hydraulisch wirksamen Zementersatz. Der Aktivitätsindex muss nach 28 Tagen mindestens 75% und nach 90 Tagen mindestens 85 % betragen.

Die erfolgreiche Prüfung des Aktivitätsindex sowie ein deutlicher Betrag zur Hydratationswärmeentwicklung sind Grundvoraussetzung für die Eignung und den Einsatz hydraulischer Betonzusatzstoffe wie z. B. Flugasche, Hüttensandmehl oder andere Zementersatzstoffe. Vor den weiteren Untersuchungen wurden die 8 verschiedenen Feinfraktionen < 2 mm sowie aus der jeweiligen Fraktion zusätzlich abgeseibtes Material < 1 mm (Körnung mit angereichertem Zementstein) in einer Laborkugelmühle auf Zementfeinheit aufgemahlen. Für die Aktivitätsprüfung standen somit 16 aufgemahlene Materialien (8x < 2 mm, 8x < 1 mm) der aufbereiteten Betone zur Verfügung. Zusätzlich wurde ein feines Quarzmehl als inertes Referenzmaterial hinzugezogen. Neben dem genormten Mengenverhältnis von 75% Zement und 25% Zusatzstoff wurden zusätzlich zur sicheren Bewertung Normmörtel mit 50% Zement und 50% Zusatzstoff hergestellt und miteinander verglichen. Eine tatsächliche hydraulische Aktivität liegt dann vor, wenn ein Zusatzstoff im Normmörtel im Austausch von Zement (25% bzw. 50%) messbar einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung und zur Hydratationswärmeentwicklung zeigt.

Es stellte sich jedoch bei diesen Untersuchungen heraus, dass alle geprüften Feinstsande < 2 mm und die mit Zementstein angereicherten Fraktionen < 1 mm aus den aufbereiteten Betonen nach einem erneuten Aufmahlen auf Zementfeinheit keine hydraulische Aktivität aufwiesen. Der angestrebte Aktivitätsindex nach 28d von 75% bzw. nach 90d von 85% konnte nicht erreicht werden. Im direkten Vergleich zu dem inerten Quarzmehl war keine signifikante Aktivität messbar. Aus diesem Grund wurde auf die ursprünglich geplanten, umfangreichen Betonversuche verzichtet, da aufgrund dieser Vorversuche keine hydraulische Aktivität der aufgemahlene Feinstoffe im Beton zu erwarten war. Die Materialien verhalten sich absolut inert. Ein solcher Einsatz (Austausch von Zement) führt unweigerlich zu minderwertigeren

Betoneigenschaften. In den **Abb. 47 – 51** im Anhang sind sämtliche Aktivitätsindizes der aufgemahlten Körnungen  $< 2$  mm und  $< 1$  mm gegenüber dem inerten Quarzmehl im Austausch von 25% und 50% des Zementes dargestellt.

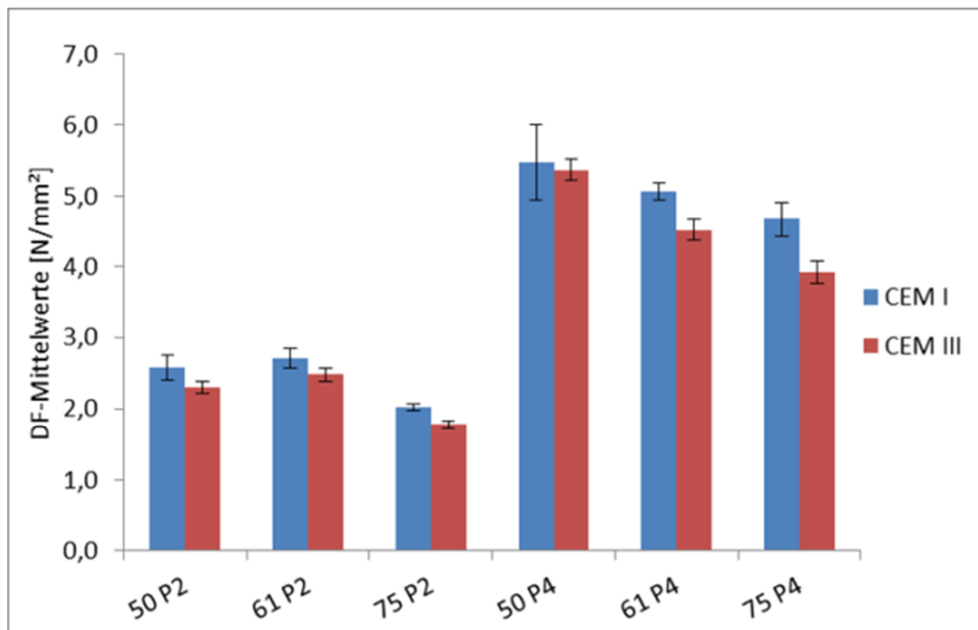
Ebenso konnten bei einer Gegenüberstellung (siehe Anhang, **Abb. 52 - 54**) der Wärmeentwicklung bei der Hydratation keine signifikanten Aktivitäten festgestellt werden. Die ermittelte Gesamtwärmeabgabe der Abmischungen mit den aufbereiteten Feinfraktionen lag zwar um etwa 5 J/g über den inerten Quarzmehlarmischungen, was auf die etwas höhere Mahlfineinheit aus der Aufmahlung in der Laborkugelmühle gegenüber dem Quarzmehl zurückzuführen ist. Ansonsten sind die Hydratationswärmefreisetzungen aller Abmischungen in der entsprechend messtechnisch bedingten Schwankungsbreite nahezu identisch.

#### **AP 4 Alternative Verwendungsmöglichkeiten der Feinfraktion**

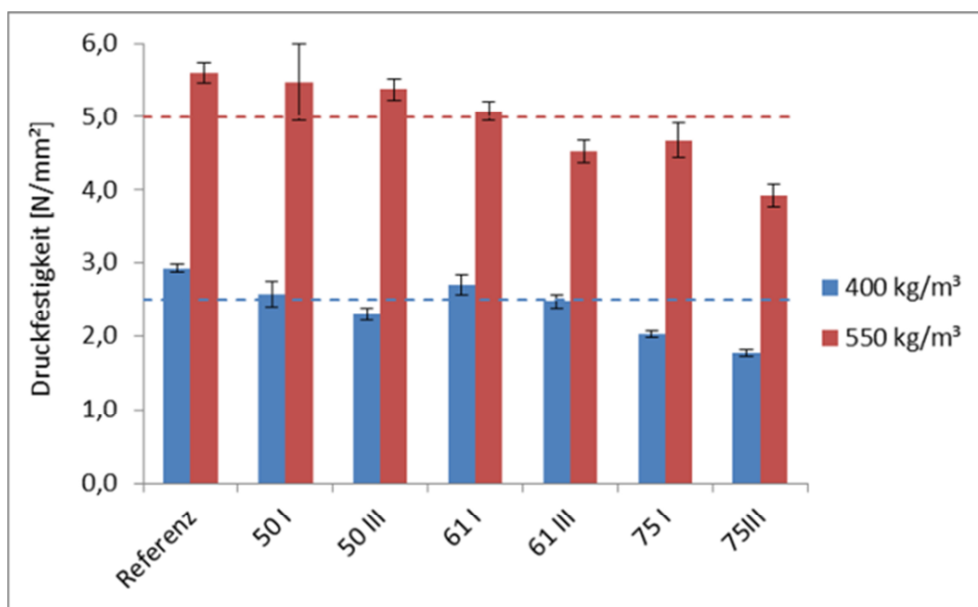
##### **AP 4.1 Rohstoffe für die Herstellung von Porenbeton**

Die durchgeführten Versuche befassten sich mit der Herstellung von Porenbeton, bei welchem Teile des verwendeten Quarzsandes, der ca. 45 % der Gesamtmischung ausmacht, durch Recyclingmaterial aus aufbereitetem Altbeton (CEM I und CEM III) ersetzt wurden. Bei dem Ersatzmaterial handelt es sich um die, bei der elektrodynamischen Aufbereitung anfallenden,  $\text{SiO}_2$ -haltigen Fraktion  $< 2$  mm („Middlings“). Es wurden Porenbetonproben der Rohdichte 400  $\text{kg/m}^3$  und 550  $\text{kg/m}^3$  mit 0 %, 50 %, 61 % und 75 % Quarzersatzmaterial hergestellt und diese hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit untersucht.

Mittels uniaxialen Druckversuchen nach DIN EN 772-1 wurde geprüft, wie sich die Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Ersatzart und -Menge verhält. Dies ergab, wie in **Abb. 7** dargestellt, dass die Druckfestigkeit für CEM I-Porenbeton generell höher ist als für Proben mit CEM III. Weiter sind in **Abb. 8** die Druckfestigkeitsmittelwerte in Abhängigkeit der Ersatzmenge zusammengefasst, sowie die Grenzwerte, die erreicht werden müssen, um der DF-Klasse P2 (blau) oder P4 (rot) zugeordnet werden zu können. Für Rohdichten von 400  $\text{kg/m}^3$  erfüllen die Proben mit 50 % CEM I und 61 % CEM I und CEM III die Kriterien zur Nutzung als Mauerstein. Für die Proben mit einer Rohdichte von 550  $\text{kg/m}^3$  ist dies für 50 % und 61 % beider Ersatzmaterialtypen der Fall. Dies bedeutet, dass bis zu 61 % des verwendeten Quarzsandes, was in etwa einem Anteil von 30 % an der Gesamtmischung entspricht, durch Recyclingmaterial ersetzt werden kann und weiterhin ausreichend hohe mechanische Eigenschaften erzielt werden, um die Produkte als Mauersteine einzusetzen.



**Abb. 7:** Druckfestigkeitswerte in Abhängigkeit der verwendeten Middlings-Typen.



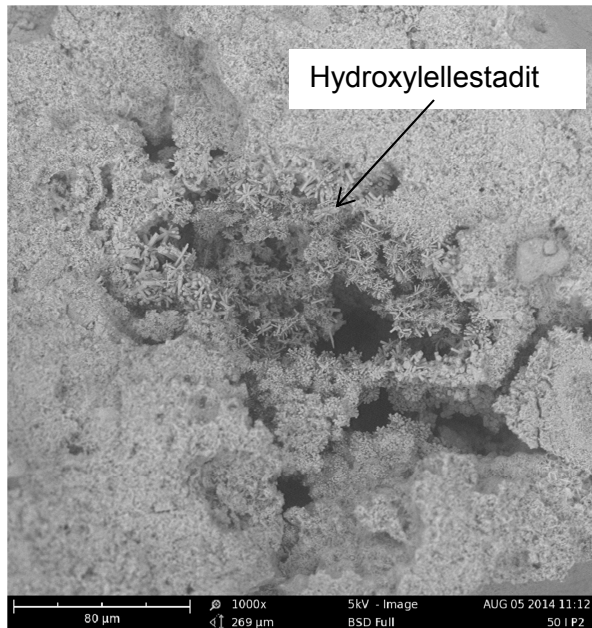
**Abb. 8:** Übersicht der Druckfestigkeitsmittelwerte aller Proben. Die unterbrochenen Linien markieren die Grenzwerte, die im Mittel erreicht werden müssen, um der DF-Klasse P2 (blau) oder P4 (rot) zugeordnet werden zu können.

Weiter ergaben die XRD-Analysen, dass der Porenbeton mit Recyclingmaterial dieselben Phasen aufweist, wie die Referenzproben, jedoch mit leicht veränderten Mengenverhältnissen. Tendenziell nimmt der Phasenanteil von 11 Å Tobermorit und Anhydrit mit steigenden Ersatzmengen ab, wohingegen die Menge an Hydroxyllestadit steigt. Der abnehmende 11 Å Tobermoritphasenanteil dürfte zur Schwächung des Materials führen und somit direkt mit der

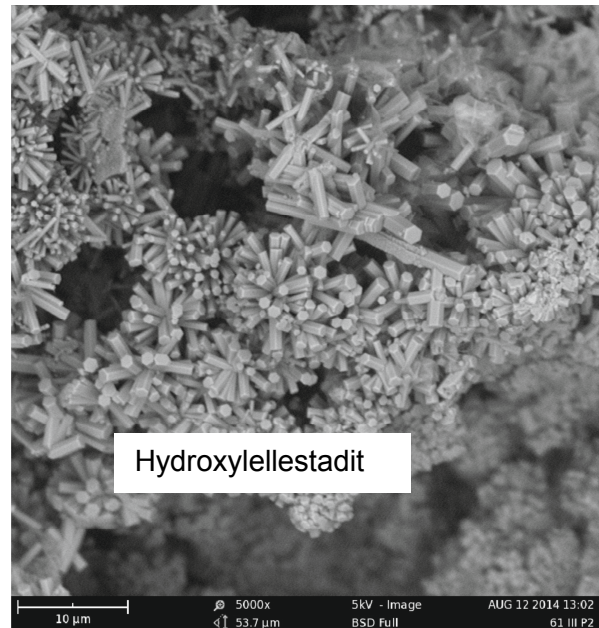


Druckfestigkeit zusammenhängen. Hinzu kommt, dass der Porenbeton mit Recyclingmaterial zum Teil Hydrogranat aufweist, welcher als Vorstufe des 11 Å Tobermorit bei der hydrothermalen Härtung entsteht.

Die REM-Aufnahmen zeigen, dass der Hydroxyllestadit löchrig und porös erscheinende Strukturen in den Porenstegen erzeugt (siehe **Abb. 9** und **Abb. 10**), was zu einer Schwächung des Materials führt, wodurch ein Zusammenhang zwischen sinkender Druckfestigkeit, steigendem Hydroxyllestaditgehalt und zunehmender Menge an Ersatzmaterial hergestellt werden konnte.



**Abb. 9:** Löchrig und schwammartig erscheinender Bereich auf einem Porensteg, in dem Hydroxyllestadit auftritt.



**Abb. 10:** Strahlenförmig verwachsene, langstängelige Hydroxyllestadit Kristalle mit hexagonalem Querschnitt.

#### AP 4.2 Rohstoffe für die Zementproduktion

Im Rahmen des AP 4 sollte untersucht werden, ob sich die Feinfraktionen als Ausgangsmaterial für die Zementherstellung eignen und die herkömmlichen Rohstoffe Kalkstein, Sand und Tone ersetzen können. Exemplarisch wurden dafür vier Materialien mit unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Zum Einsatz kamen die elektrodynamisch fraktionierten Gesteine aus:

- 1.) CEM I mit quarzitischer Gesteinskörnung < 2 mm;
- 2.) CEM I mit quarz. Gesteinskörnung (Filterrückstand – Zementstein angereichert);
- 3.) CEM I mit Gesteinskörnung aus Kalksteinsplitt < 2 mm;
- 4.) CEM I mit Gesteinskörnung aus Kalksteinsplitt (Filterrückstand – Zementstein angereichert).

Nach Aufmahlen der vier Fraktionen auf Zementfeinheit wurde zunächst die chemische Zusammensetzung mittels RFA-Analyse bestimmt. Erwartungsgemäß bestätigte sich bei den beiden Fraktionen mit quarzitischer Gesteinskörnung ein sehr hoher  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von 73% (Material < 2 mm) bzw. 64% (Material aus Filterpresse). Es wurde ein CaO-Gehalt von 17% bzw. 23% ermittelt. Einen deutlich höherer Kalk und niedrigerer Quarzgehalt wurde an den Körnungen des aufbereiteten Kalksteinbetons gemessen. Hier lag ein  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von 18% und ein CaO-Gehalt von 65% bei beiden Faktionen vor.

Für die Rohmehlzusammensetzung für das Brennen von Zementklinker existieren die Berechnungsformeln des Kalkstandard (KS), des Silikatmoduls (SM) und des Tonerdemoduls (TM) [12]. Maßgeblich für einen Qualitätsklinker mit hohem Alitgehalt ( $\text{C}_3\text{S}$ ) ist ein Kalkstandard von 97 – 102 als definiertes Verhältnis aus CaO,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Die vier aufbereiteten Fraktionen mussten vor dem Klinkerbrand mit den Korrekturstoffen Kalksteinmehl ( $\text{CaCO}_3$ ) bzw. Quarzmehl ( $\text{SiO}_2$ ) versetzt werden, um einen einheitlichen Kalkstandard von 98 zu erzielen. Für die Fraktionen 1 und 2 mussten aufgrund des hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehaltes (aus der quarzitischer Gesteinskörnung) große Mengen an Kalksteinmehl (91% und 92,5%) zugegeben werden. Die beiden Fraktionen 3 und 4 konnten aufgrund des hohen Kalkanteils mit einer sehr geringen Menge an Quarzmehl (1,8%) auf den Kalkstandard von 98 aufdotiert werden.

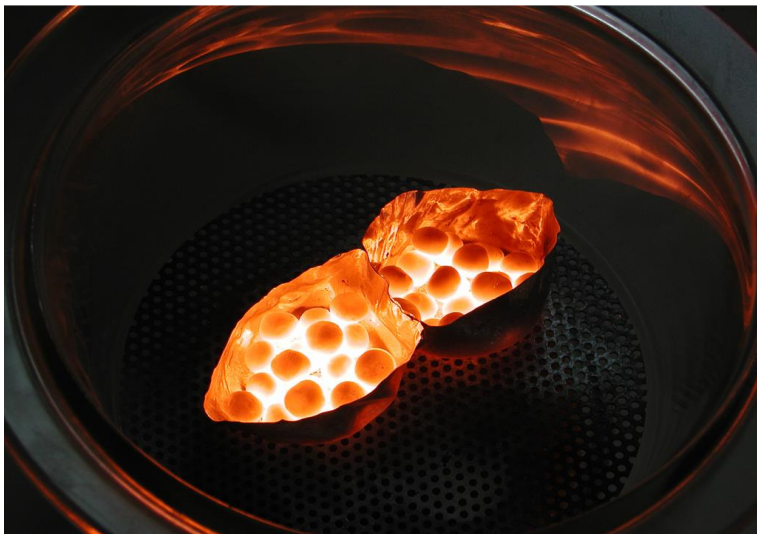
Aus den vier optimierten Rohmehlen wurden anschließend Klinkergranalien per Hand aus einem breiartigen Gemisch der Rohmehle mit Wasser geformt (siehe **Abb. 11**), bei 105°C vorgetrocknet und in einem Laborofen, angelehnt an die Brennbedingungen im Zementwerk, 15 min bei 1.450°C gebrannt (siehe **Abb.12**). Im Anschluss erfolgten an den gebrannten Klinkergranalien (siehe **Abb. 13** und **Abb. 14**) erneut chemisch/mineralogische Analysen (siehe **Abb. 55 – 58** im Anhang) sowie eine elektronenoptische Bewertung der entstandenen Klinkerphasen.



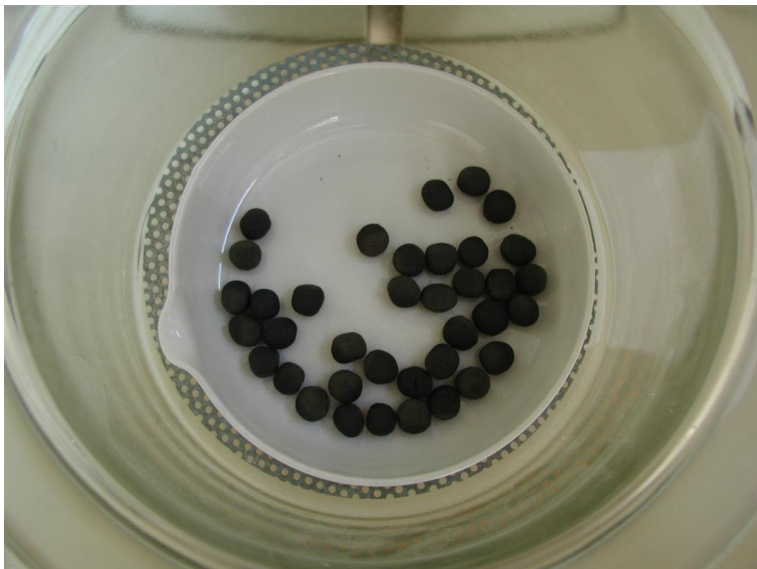
**Abb. 11:** Formen der Klinkergranalien und vortrocknen bei 105°C. [Quelle: SCHWENK]



**Abb. 12:** Klinkerbrand im Laborofen, 15 min bei 1.450°C. [Quelle: SCHWENK]

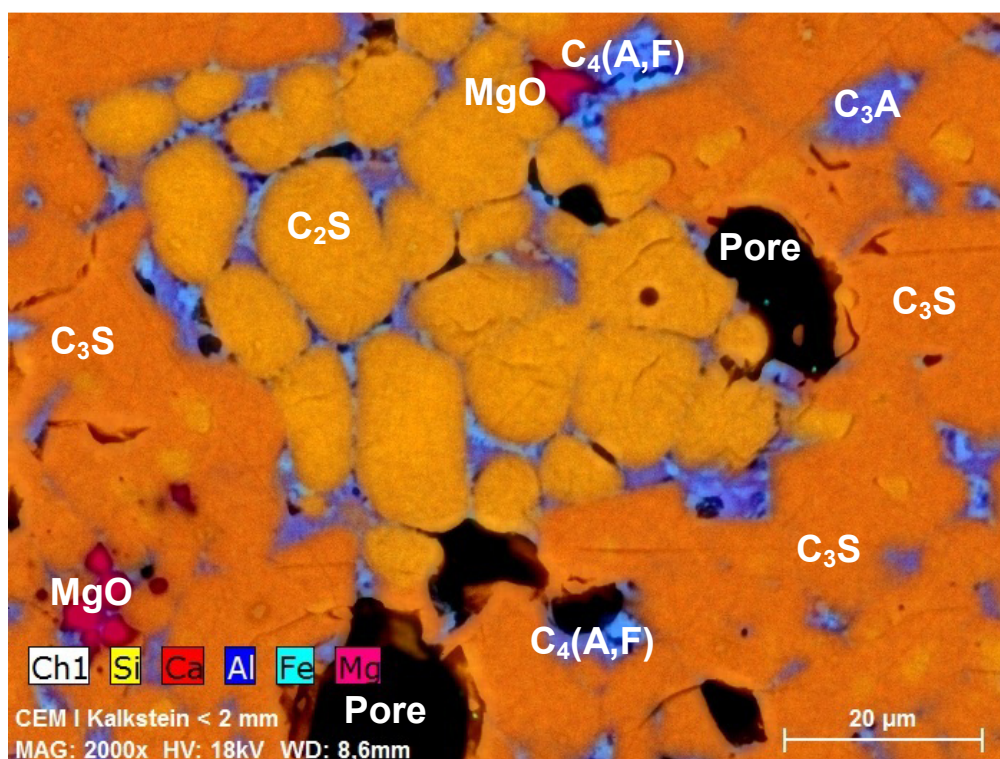


**Abb. 13:** Klinkergranalien direkt nach dem Brand in der Abkühlphase. [Quelle: SCHWENK]

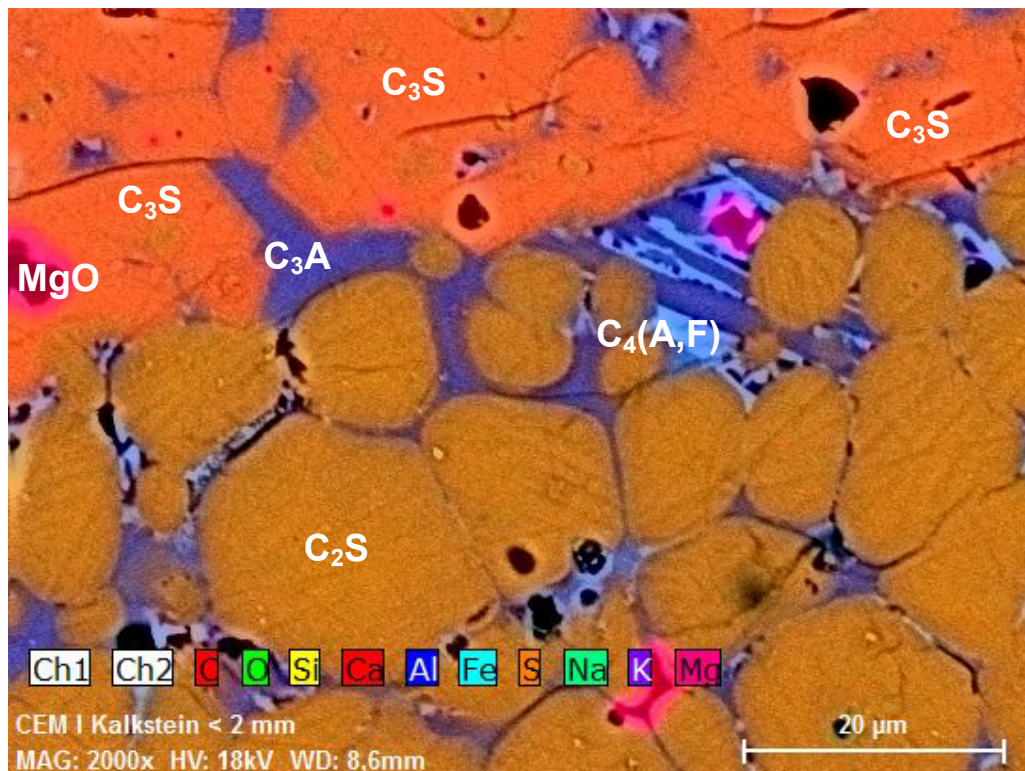


**Abb. 14:** gebrannte Klinkergranalien nach dem Abkühlen. [Quelle: SCHWENK]

Bei der Analyse der gebrannten Klinkergranalien zeigte es sich, dass alle vier Brennversuche erfolgreich waren. Die Hauptklinkerphasen  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  und  $C_4(A,F)$  ließen sich an allen 4 Klinkern zweifelsfrei bestimmen. Der Anteil an freiem Kalk ( $CaO_{\text{frei}}$ ) lag prozentual bei den Klinkern aus den Fraktionen 1, 2 und 4 über dem eines industriell hergestellten Portlandzementklinkers. Neben dem Kalkstandard sind, wie bereits dargestellt, weitere Korrekturfaktoren der Rohmehlmischung (Tonerdemodul, Silikatmodul) einzuhalten [12], so dass bei der weiteren Optimierung auch mit diesen Materialien ein optimaler Klinkerbrand zu erwarten ist. Die Variante 3 (Gesteinsmehl aus CEM I mit Gesteinskörnung Kalksteinsplitt < 2 mm und 1,8 % Quarzmehl zur Korrektur) lieferte bereits im ersten Labor-Brandversuch einen Zementklinker, der chemisch/mineralogisch mit einem industriell gebrannten Klinker identisch ist (siehe **Abb. 15** und **Abb. 16**).



**Abb. 15:** REM-Aufnahme mit EDX-Elementmapping (Klinker 3 aus Beton mit CEM I und Kalkstein).



**Abb. 16:** REM-Aufnahme mit EDX-Elementmapping (Klinker 3 aus Beton mit CEM I und Kalkstein).

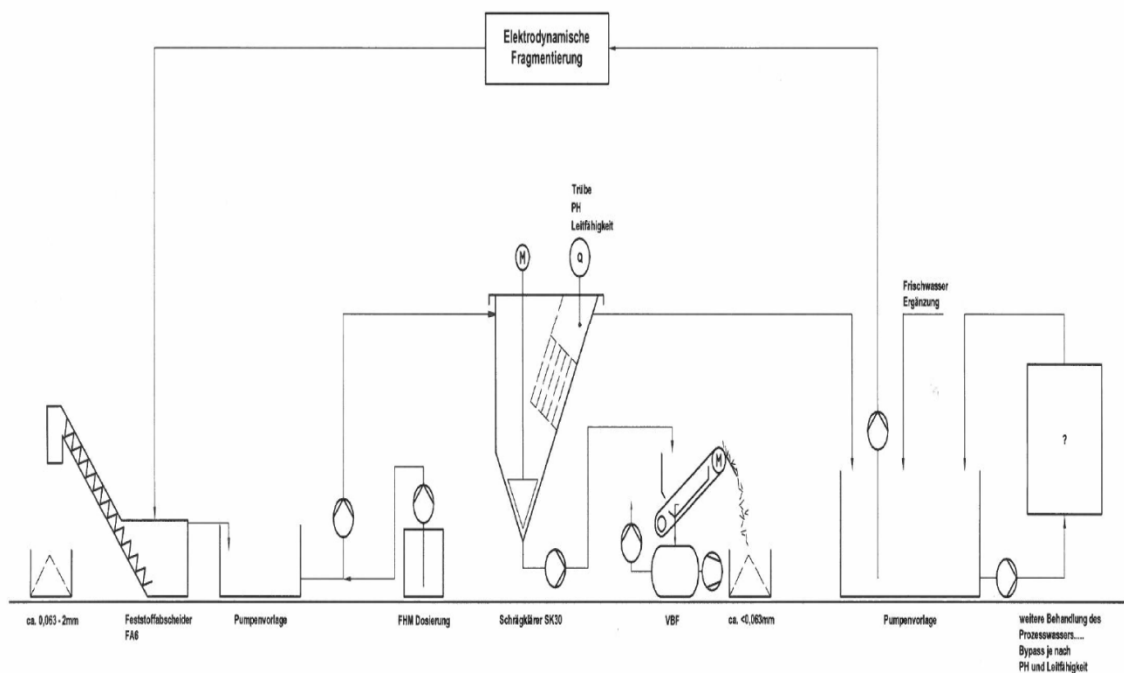
Wie die Untersuchungen zeigen, lässt sich das Feinmaterial < 2 mm aus der elektrodynamischen Fragmentierung mit geringem Aufwand als Rohstoffkomponente für die Herstellung von Portlandzementklinker verwenden.

Hiermit konnte erstmalig gezeigt werden, dass man aus Altbeton wieder qualitativ hochwertigen Zement herstellen kann und damit ein echtes Recycling von Beton möglich ist.

## AP 5 Prozessoptimierung

## AP 6 Entwurf und Bau des Prototyps

Mit Firma Leiblein wurde der Entwurf einer Fragmentierung & Wasseraufbereitungsanlage erarbeitet (siehe **Abb. 17**). Dieser beinhaltet alle benötigten Teilschritte und verschiedenen Aufbereitungsverfahren. Für die Abtrennung der Feinfraktionen soll ein Lamellenklärer zum Einsatz kommen, während die Abtrennung der Grobfraktion über eine Klassierschnecke erfolgt (Feststoffabscheider).



**Abb. 17:** Verfahrensschritte der Wasseraufbereitung und Feststoffabscheidung für fragmentierten Altbeton.

Um die Leitfähigkeit des Prozesswassers möglichst niedrig zu halten, hat sich ein von Leiblein eingesetztes Fällungsmittel bewährt. Schon durch Zugabe geringer Mengen können die Schwebstoffe ausgefällt und die Leitfähigkeit des Prozesswassers auf einem niedrigen Wert gehalten werden.

Zusammenfassend konnten von Leiblein folgende Verfahrensschritte ermittelt werden, um das bei der Fragmentierung von Altbeton anfallende Prozesswasser effizient aufzubereiten:

- Mechanische Abtrennung/Gewinnung der Feststoffe 0,063-2 mm mit einem Feststoffabscheider (siehe **Abb 18**).
- Wasserbehandlung, Senkung von pH-Wert und Leitfähigkeit durch den Einsatz Fällungsmittel (siehe **Abb. 18**)
- Sedimentation der Feststoffe < 0,063 mm mithilfe eines Schräglklärers und Dosierung von Flockungshilfsmitteln (FHM)
- Entwässerung des Schlammes aus dem Schräglklärer mit einem Vakuumbandfilter



**Abb 18:** Dosiereinrichtung für Fällungsmittel und Feststoffabscheider für Prozesswasser.

Es konnte somit ein kontinuierlicher Prozess für die Aufbereitung von Altbeton mit Hilfe der Fragmentierung dargestellt werden

## **AP 7 Lebenszyklusanalyse und Ökobilanzierung**

### **Einführung in die Ökobilanz**

Die Ökobilanz (engl. auch LCA – Life Cycle Assessment) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen während des gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“). Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und der Entsorgung, sowie die damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (z. B. Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe). Die Methode der Ökobilanz kann als Tool für umweltorientierte Entscheidungen herangezogen werden. Anwendungsbereiche lassen sich in der Entwicklung und der Verbesserung von Produkten, im Rahmen strategischer Planung, bei politischen Entscheidungsprozessen und im Marketing finden.

Die Ökobilanz ist ein Teilelement der Ganzheitlichen Bilanzierung und ist in DIN ISO 14040/44 [13] [14] standardisiert.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Durchführung einer Ökobilanz kann wie folgt beschrieben werden:

- Entlang des Lebensweges eines Produktes werden die Stoff- und Energieströme des gesamten Produktsystems, also aller beteiligten Prozesse, analysiert.
- Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie der Natur entnommene Ressourcen – werden systematisch erfasst und in der so genannten „Sachbilanz“ abgelegt.

- Die potenziellen Umwelteffekte wie Treibhauseffekt, Sommersmog, Versauerung, Überdüngung etc. werden anschließend im Rahmen der „Wirkungsabschätzung“ ausgewertet.

Eine Ökobilanz ist in folgende vier Schritte untergliedert (DIN EN 14040 [13]):

(1) Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Der erste Schritt der Ökobilanz legt das Ziel und den Untersuchungsrahmen fest. Dies beinhaltet z.B. die Definition der Systemgrenzen, der Funktion des Systems, die Anforderungen an die Datenqualität etc.

(2) Sachbilanz (engl. LCI – Life Cycle Inventory)

Die Sachbilanz beinhaltet die Datensammlung aller benötigten Inputs (Ressourcen, Vorprodukte) und Outputs (Emissionen, Abfälle) und das Aufstellen einer Bilanz.

(3) Wirkungsabschätzung (engl. LCIA – Life Cycle Impact Assessment)

Bei der Wirkungsabschätzung werden die potenziellen Umweltwirkungen, Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und Ressourcenverfügbarkeit mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz abgeschätzt / berechnet.

(4) Auswertung

Bei der Auswertung werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung in Bezug auf das Ziel der Ökobilanzstudie interpretiert.

In einer Ökobilanz wird der ökologische Einfluss von Produkten, Verfahren und Dienstleistungen über den Lebensweg analysiert. In einer Ganzheitlichen Bilanzierung (engl. Life Cycle Engineering) werden zudem die potentiellen ökonomischen, technischen und sozialen Einflüsse untersucht.

Nachfolgend werden der Ziel- und Untersuchungsrahmen definiert, die Ökobilanzergebnisse dargestellt und die Ergebnisse diskutiert.

### **Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens**

Die Studie ist in Übereinstimmung mit der ISO-Norm für Ökobilanzen [14] folgendermaßen gegliedert:

#### **Ziel der Studie**

Die innovative Technologie der elektrodynamischen Fragmentierung zur Altbetonaufbereitung erzeugt drei Wertstoffströme, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften verschiedene Primärmaterialien ersetzen können. Die Qualitäten und die damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten der neu generierten Fraktionen wurden während des Projektes untersucht und in die sich daraus ableitenden Szenarien werden im Folgenden beschrieben und verglichen.



## **Gründe für die Durchführung der Studie**

Im Rahmen des Projekts „ELDYNTON“ wird versucht aus einer Laboranlage eine großindustrielle Anlage, die eine Tonne Altbeton pro Stunde bearbeiten kann, zu entwickeln. Die Funktionalität der elektrodynamischen Fragmentierung wurde bereits im Labormaßstab nachgewiesen.

Beton ist ein sehr häufig verwendetes Ressourcengemisch, welches derzeit nur teilweise wiederverwendet wird. Der anfallende Altbeton soll mit Hilfe des innovativen Verfahrens einer Wiederverwendung als Betonzuschlag, Zement- oder Kiesersatz dem Herstellungsprozess wieder zugeführt werden. Diese Umsetzung könnte einen erheblichen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit beisteuern indem sie Emissionen verringert und primäre Ressourcen schont. Die projektbegleitend durchgeführte Ökobilanzstudie soll die Vorteile hinsichtlich ausgewählter Wirkungskategorien zeigen.

## **Anwendung**

Die Ergebnisse der Studie liefern parallel zur Entwicklung der großindustriellen Anlage Zusatzinformationen über die ökologischen Auswirkungen der elektrodynamischen Fragmentierung. Diese geben ein Feedback innerhalb des Konsortiums.

Zukünftig soll sich das Verfahren in dem Markt etablieren und wirtschaftlich und ökologisch Altbeton recyceln. Hierzu kann die ökologische Bewertung als Marketing Instrument eingesetzt werden um auf das Verfahren aufmerksam zu machen.

Zudem soll sie aufzeigen, dass eine weitere Entwicklung der Technologie unter ökologischen Aspekten sich als sinnvoll erachten kann.

## **Angesprochene Zielgruppe**

Mit der LCA-Methode werden ökologisch signifikante Prozesse und deren Einflüsse ermittelt. Schon während der Entwicklung des Prozesses kann hierbei auf die ökologischen Auswirkungen eingegangen werden. Frühzeitig kann hierdurch auf eine ökologische Verlagerung der Problematik der Altbetonrückgewinnung hingewiesen werden bei Beton- und Zementproduzenten, sowie bei denjenigen Firmen, die Altbeton derzeit anders verwerten müssen. Auch private Haushalte können bei einer Umsetzung der Technologie ihren Altbeton z.B. bei einem Transportbetonwerk abliefern ohne Deponiekosten zahlen zu müssen. Zudem können Märkte für die rückgewonnenen Rohstoffe erschlossen werden. In Abhängigkeit von der Qualität der Fraktionen können hier unterschiedlichste Wirtschaftszweige angesprochen werden.

## Untersuchungsrahmen der Studie

Durch die eindeutige Festlegung des Untersuchungsrahmens, der alle für das Ergebnis bedeutenden Prozesse miteinbezieht und darüber hinaus alldiejenige abschneidet, die keinen Einfluss auf das Ergebnis haben, wird ein repräsentativer Szenarienvergleich gewährleistet.

**Tab. 1:** Zusammensetzung des Betons und der entstandenen Fraktionen

	Massen- prozent	CEM I & Kies	CEM III & Kies	CEM I & Kalksteinsplitt	CEM III & Kalksteinsplitt
<b>Grob- korn</b>	55	<b>Kiesersatz</b>	<b>Kiesersatz</b>	<b>Kalksteinsplitt</b>	<b>Kalksteinsplitt</b>
<b>Midd- lings</b>	40	<b>Sand</b> sehr fein	<b>Sand</b> sehr fein	<b>Kalksteinmehl</b>	<b>Kalksteinmehl</b>
<b>Filtrat</b>	5	<b>Kalkstein- mehl</b> (50 %) <b>Sand</b> sehr fein (50 %)	<b>Kalksteinmehl</b> (50 %) <b>Sand</b> sehr fein (50 %)	<b>Kalksteinmehl</b> (90 %) <b>Sand</b> sehr fein (10 %)	<b>Kalksteinmehl</b> (90 %) <b>Sand</b> sehr fein (10 %)

## Untersuchte Szenarien

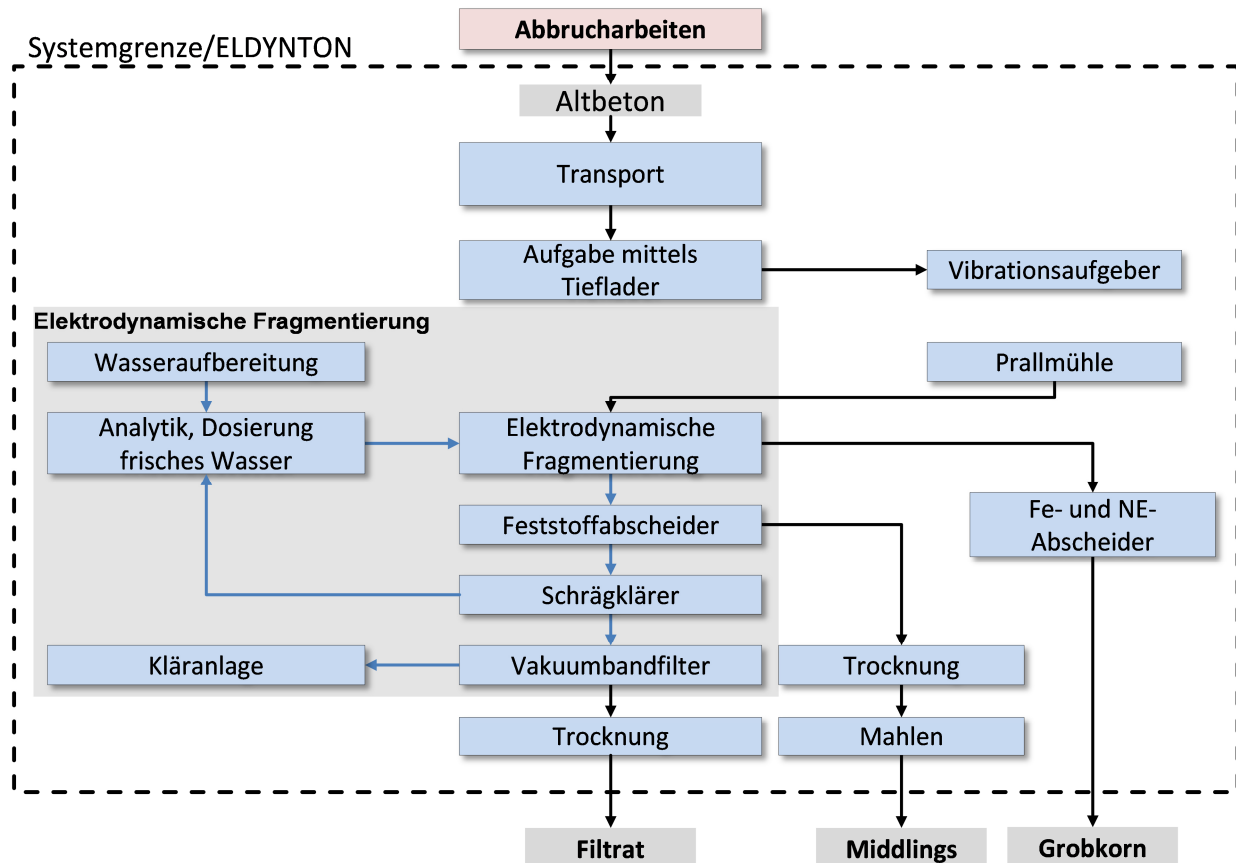
Anhand der heterogenen Zusammensetzung des anfallenden Materials werden in dem Projekt vier Betonarten untersucht. Die zwei betrachteten Zementarten (CEM I und CEM III) werden zum einen mit Kies und zum anderen mit Kalksteinsplitt zu Beton gemischt. Die insgesamt vier Betonarten werden dem neuen Recycling-Verfahren zugeführt. Abhängig von der Art des Betons ergeben sich mehrere Einsatzmöglichkeiten der entstehenden Fraktionen (Grobkorn, Middlings und Filtrat). Diese können sich zudem hinsichtlich ihrer Qualität unterscheiden.

Besteht der Ausgangsbeton aus CEM I & Kies oder CEM III und Kies kann das Grobkorn ohne Qualitätsverluste als Kies wiederverwendet werden. Das Filtrat kann die Primärmaterialbereitstellung von Kalksteinmehl (50 %) und Sand (50 %) ersetzen. Die Ausgangsbetonarten unterscheiden sich bei der Zusammensetzung der Middlings. Durch CEM I & Kies besteht die Möglichkeit Kalksteinmehl zu ersetzen, bei CEM III & Kies sehr feinen Sand. Setzt sich der Ausgangsbeton aus CEM I oder CEM III & Kalksteinsplitt zusammen, kann das Grobkorn ohne Qualitätsverluste als Kalksteinsplitt zur Betonherstellung eingesetzt werden. Das Filtrat kann die Primärmaterialbereitstellung von Kalksteinmehl (90 %) und Sand (10 %) ersetzen. Die Ausgangsbetonarten unterscheiden sich bei der Zusammensetzung der

Middlings. Durch CEM I & Kalksteinsplitt besteht die Möglichkeit Kalksteinmehl zu ersetzen, bei CEM III & Kalksteinsplitt sehr feinen Sand.

### Systemgrenze

Es werden alle Prozesse betrachtet, die einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Vergleichbarkeit haben. Die Systemgrenze ist in **Abb. 19** grafisch dargestellt.



**Abb. 19:** Systemgrenze und Flussdiagramm des ELDYNTON Ansatzes.

Der bei der Abbruchstelle anfallende Altbeton wird mittels Lastkraftfahrzeuge zur Recyclinganlage transportiert und dort mittels eines Tiefladers in den Vibrationsaufgeber aufgeben und in eine grobe Fraktion ( $> 10$  cm) und in eine feinere ( $< 10$  cm) aufgeteilt. Die größere Fraktion wird mittels Prallbrecher zerkleinert und zusammen mit der kleinen Fraktion der elektrodynamischen Fragmentierung zugeführt. Hier wird der Altbeton durch ultrakurze Blitze an den Phasengrenzen aufgetrennt und die größte Fraktion ( $> 2$  mm), das sogenannte „Grobkorn“ direkt abgetrennt. Das Wasser-Feststoff-Gemisch bestehend aus Middlings, Filtrat und Abwasser wird in den Feststoffabscheider geleitet, in der die Middlings (0,5 mm – 2 mm) separiert werden. Die kleinste Fraktion, das Filtrat ( $< 0,5$  mm), wird in einem Schräglärer durch

Flockungsmittel ausgefällt und weiter verdichtet bis es schließlich im Vakuumbandfilter abgeschieden wird. Ein großer Teil des anfallenden Wasser wird im Kreislauf geführt. Um die Konzentrierung von Störstoffen im Wasserkreislauf zu verhindern, wird das bei dem Vakuumbandfilter anfallende Abwasser der Abwasserbehandlung (Kläranlage) zugeführt. Bevor die entstehenden drei Fraktionen wiederverwendet werden, muss das Grobkorn evtl. von Eisen- und Nichteisenmetallen (z. B. Stahlfasern) befreit werden, die Middlings gemahlen und zudem wie das Filtrat getrocknet werden.

### **Allokationsverfahren**

In dem Modell kommen keine Allokationsverfahren zur Anwendung. Bei den verwendeten Prozessen (Strom-Mix, thermische Energie, etc.) kommen Allokationen im Vordergrundsystem der kommerziell erhältlichen GaBi-Datenbank [19] vor.

### **Wahl der relevanten Wirkungskategorien**

Die internationale Norm (ISO 14040 [16]) schreibt nicht explizit vor, welche Wirkungskategorien angewandt werden sollen. Sie beschreibt hingegen, dass die auf den Wirkungskategorien basierende Wirkungsabschätzung zur Beurteilung der Größen und Bedeutungen der daraus resultierenden Umweltwirkungen dient. durchgeführt. Zudem wird der Primärenergiebedarf betrachtet.

Die für diese Studie ausgewählten Wirkungskategorien sind:

- Treibhauspotential (GWP)
- Versauerungspotential (AP)
- Eutrophierungspotential (EP)
- Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP)
- Primärenergiebedarf, gesamt ( $PE_{ges}$ )
- Primärenergiebedarf, regenerativ ( $PE_{reg}$ )
- Primärenergiebedarf, fossil ( $PE_{fos}$ )

Das Treibhauspotential beschreibt den potenziellen Beitrag verschiedener Emissionen auf den Wärmehaushalt der Atmosphäre. Dieser Beitrag wird anhand der Referenzgröße Kilogramm Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ )-Äquivalente abgebildet. Eine Versauerung des Bodens findet statt, wenn die Menge an eingetragenen Protonen im Boden nicht mehr neutralisiert werden kann. Mit dem Versauerungspotential wird die Menge der versauernd wirkenden Luftschadstoffe in massenbezogene Schwefeldioxid ( $SO_2$ )-Äquivalente ausgedrückt. Eine Eutrophierung kann von Luftschadstoffen, Abwässern und der landwirtschaftlichen Düngung hervorgerufen werden. Das Eutrophierungspotential beschreibt das aggregierte Ergebnis der eutrophierend wirkenden Stoffe bezogen auf die Referenzeinheit Kilogramm Phosphat. Der abiotischer

Ressourcenverbrauch beschreibt die Verfügbarkeit der Ressourcen in der Erde in Antimon (Sb)-Äquivalente. Der Primärenergiebedarf (Megajoule, MJ) ist eigentlich eine Inventargröße, wird aber in der Regel wie eine Impactgröße genutzt. In dieser Studie wird der Primärenergiebedarf unterteilt in fossil und regenerativ betrachtet.

Ein Augenmerk liegt in dieser Studie auf der Bewertung der regionalen und globalen Wirkungen. Lokale Wirkungen wie Lärmbelästigung oder Geruchspotenzial fließen nicht in die Bewertung ein.

### **Datenherkunft**

Die Kooperation mit den Projektpartnern stellte die Grundlage zur Einreichung der erforderlichen vollständigen Massen- und Energiebilanz der einzelnen Prozessmodule dar. Das Vorgehen zur Datenaufnahme während des Projekts ist in **Tab. 2** dargestellt.

**Tab. 2:** Die Schritte der iterativen Vorgehensweise der Datensammlung

Schritt 1	Erstellen des Flussdiagrammes des ELDYNTON Verfahrens
Schritt 2	Zuordnung der Massen- und Energieströme
Schritt 3	Messen, Berechnen und Abschätzen der erforderlichen Daten durch die Experten
Schritt 4	Abschätzen der noch fehlenden Daten basierend auf Expertenmeinungen und Literaturrecherche

Die Datenaufnahme lief so ab, dass basierend auf den Informationen der einzelnen Projektpartner Fließschemata für die einzelnen Prozesse erstellt wurden. Diese Informationen lieferten die Basis zur Erstellung von Datensammelbögen, in denen den einzelnen Prozessen Stoff- und Energieströme zugeteilt wurden. Die prozessbezogenen Daten wurden anschließend von den jeweiligen Experten gemessen, berechnet oder abgeschätzt. Noch fehlende Daten wurden auf der Grundlage von Expertenmeinungen oder Literaturrecherchen abgeschätzt. Datensätze für Prozesse des Hintergrundsystems (Materialien, Strom, Erdgas, Verbrennungsprozesse etc.) wurden der GaBi 6 Datenbank [16] entnommen.

### **Abschneidekriterien, Annahmen und Abschätzungen**

Die Studie hat ein definiertes Ziel, den ökologischen Vergleich des innovativen Recyclingverfahrens mit der Primärbereitstellung der zu substituierenden Materialien. Abgeschnitten wurden die Prozesse des Rückbaus bzw. des Abrisses des Gebäudes. Der Betrachtungsraum beginnt somit mit dem Transport des Altbetons zum „Altbetonaufbereitungswerk“, welches ein Recyclinghof, oder ein Transportbetonwerk sein kann.

Stoff- und Energieflüsse, die für den Bau oder Rückbau aller Anlagenteile oder Infrastruktur benötigt werden, werden nicht berücksichtigt. Eine überschlägige Berechnung zeigte, dass sie sich auf ein irrelevantes Minimum beschränken. Bei Anlagen mit einem sehr hohen Massendurchsatz und Energiebedarf reduziert sich der ökologische Einfluss der Bereitstellung der Anlage des Öfteren auf ein irrelevantes Minimum.

Erste Untersuchungen zeigten, dass das Grobkorn ohne Qualitätsverlust, abhängig vom Ausgangsmaterial entweder als Kiesersatz oder als Kalksteinsplittersatz verwendet werden kann.

Je nach Art des Altbetons können die Middlings nach einem Trocknungs- und Mahlprozess entweder das Primärgut Kalksteinmehl ersetzen oder sehr feinen Sand ersetzen und somit als Rohstoff für die Porenbetonherstellung dienen.

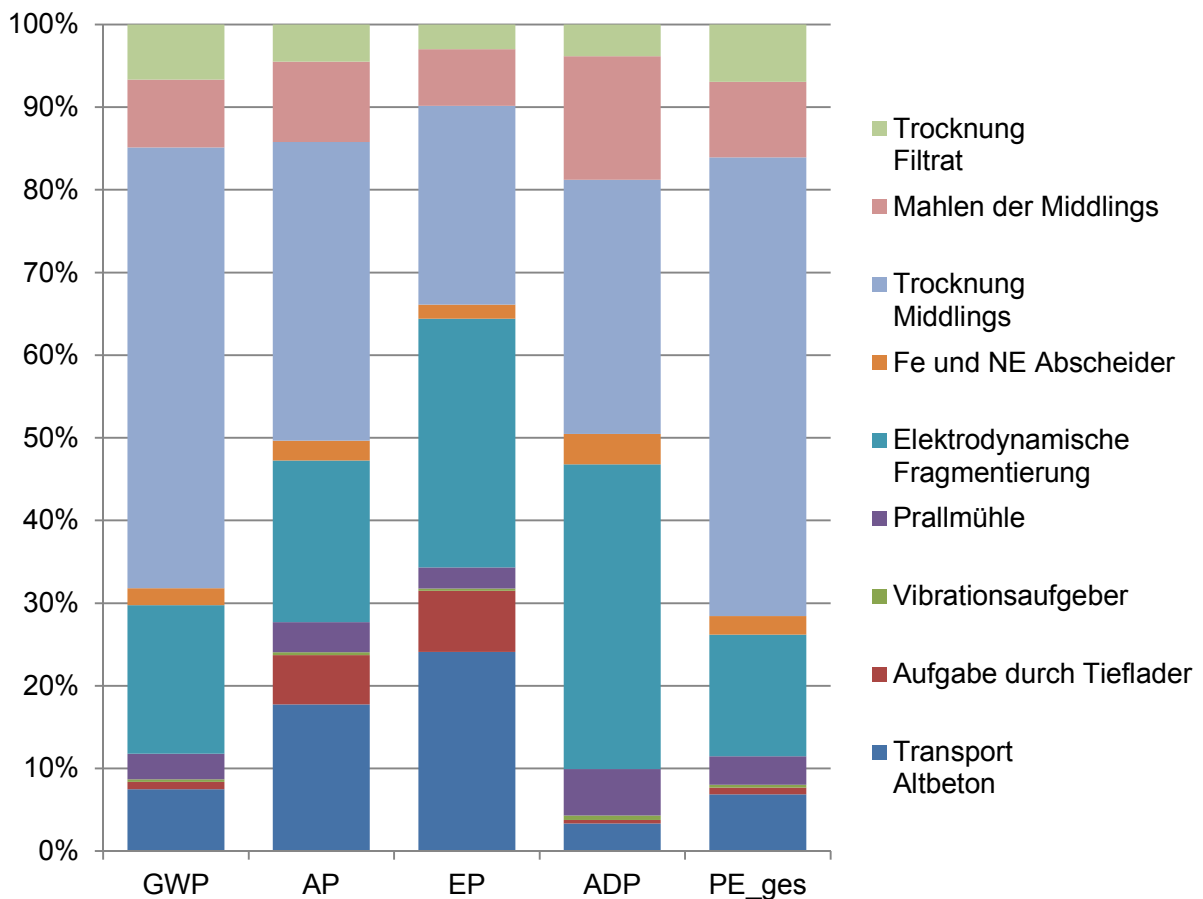
Das Filtrat kann je nach Zusammensetzung des Altbetons Kalksteinmehl oder sehr feinen Sand substituieren.

Das entstehende Abwasser bei der elektrodynamischen Fragmentierung wird derzeit in eine kommunale Abwasserreinigungsanlage geleitet.

Die Anlage könnte dort aufgebaut werden, wo die Materialströme direkt wiederverwendet werden können. Geeignet hierfür sind z.B. Transportbetonwerke, die in einem maximalen Umkreis von circa 30 km liegen. Die Referenzprodukte (siehe **Tab. 1**) müssen zudem vom Abbauort zum Einsatzort (Betonwerk) transportiert werden. Es wird angenommen, dass sich die Transportdistanzen der Substitutionsmaterialien in jeder Region stark voneinander unterscheiden. In den betrachteten Szenarien wird diese Transportdistanz jedoch vernachlässigt um eine Aussage zu treffen inwieweit sich das Verfahren sich unabhängig vom Transport ökologisch rentiert. In einer weiteren Auswertung wird die Transportdistanz der Materialien eines ausgewählten Szenarios erhöht, um aufzuzeigen ab welcher Distanz es sich ökologisch lohnt das Verfahren umzusetzen.

### **Betrachtung des ELDYNTON Verfahrens**

Die relativen Beiträge der ELDYNTON Prozesse auf die einzelnen Wirkungskategorien werden in der **Abb. 20** gezeigt. Hierdurch werden die Prozesse die einen signifikanten Einfluss auf die jeweilige Wirkungskategorie haben ermittelt. Die ähnliche Struktur der Beiträge auf die einzelnen Wirkungskategorien sind deutlich erkennbar.



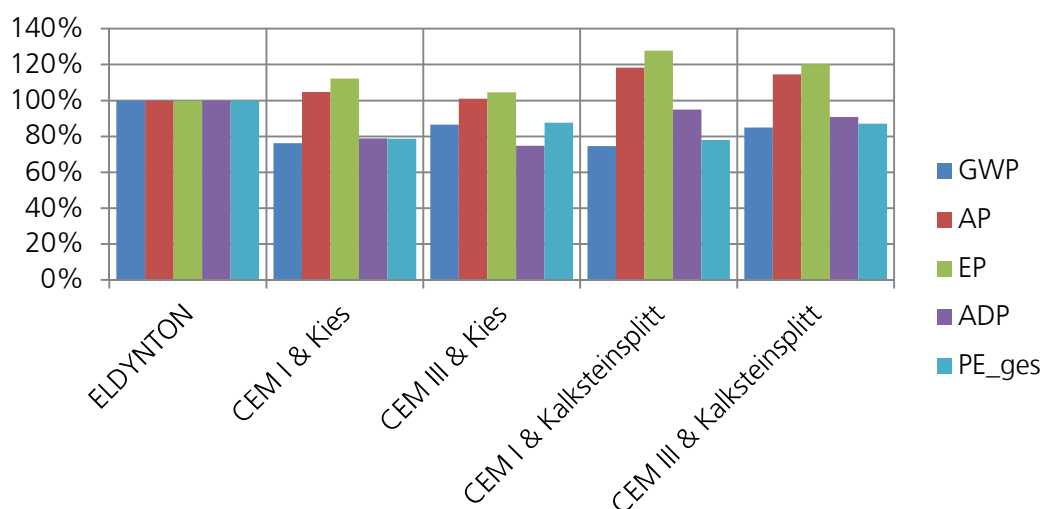
**Abb. 20:** Einfluss der einzelnen Prozesse im ELDYNTON-Verfahren auf die betrachteten Wirkungskategorien.

Beim Treibhauspotential hat die Trocknung der Middlings mit 53 % den größten Anteil, danach folgen die elektrodynamische Fragmentierung mit 18 %, das Mahlen der Middlings mit 8 %, der Transport und die Trocknung des Filtrats mit 7 %. Einen geringeren Einfluss weisen die Prozessschritte Aufgabe durch den Tieflader (6 %), sowie die Prallmühle (4 %), der Fe und NE Abscheider (2 %) und der Vibrationsaufgeber (<1 %) auf. Einen Blick auf die Struktur des Versauerungspotential zeigt den Einfluss der Trocknung der Middlings (36 %), der elektrodynamischen Fragmentierung (20 %), des Transportes (18 %), dem Mahlen der Middlings (10 %), der Aufgabe des Tiefladers (6 %), die Trocknung des Filtrats (5 %), die Prallmühle (4 %); den Fe und NE Abscheider (2 %) sowie der Vibrationsaufgeber (<1 %). Betrachtet man das Eutrophierungspotential verteilt sich der größte Einfluss auf die Prozesse der elektrodynamischen Fragmentierung mit 8 %, des Transports mit 24 %, sowie die Trocknung der Middlings ebenfalls mit 24 %. Einen erheblich kleineren Anteil weisen die Prozesse Mahlen der Middlings (7 %), Aufgabe mittels Tiefladers (7 %), die Prallmühle (3 %), die Trocknung des Filtrats (3 %), der Fe und NE Abscheider (2 %) und der

Vibrationsaufgeber(<1 %) auf. Die Struktur der Säule des anthropogenen abiotischen Ressourcenverbrauchs setzt sich hauptsächlich aus den Prozessen der Trocknung der Middlings (35 %) und der elektrodynamischen Fragmentierung (31 %) zusammen. Die Prozesse Mahlen (16 %), Prallmühle (6 %), Trocknung des Filtrats (4 %), Fe und NE Abscheider (4 %), Transport (3 %), Vibrationsaufgeber (<1 %) und Aufgabe durch Tieflader (<1 %) haben einen geringeren Einfluss. Mehr als die Hälfte des Energiebedarfs benötigt im ELDYNTON Prozess mit 55 % die Trocknung der Middlings. Gefolgt von den Prozessen der elektrodynamischen Fragmentierung mit 15 %, dem Mahlen der Middlings mit 9 %, der Trocknung des Filtrats sowie dem Transport des Altbetons mit jeweils 7 %. Die Prozesse Prallmühle (3 %), Fe und NE Abscheider (2 %), Vibrationsaufgeber (<1 %) und Aufgabe durch den Tieflader (<1 %) haben im Vergleich einen sehr geringen Energiebedarf.

### ELDYNTON Verfahren im Vergleich zur Primärbereitstellung

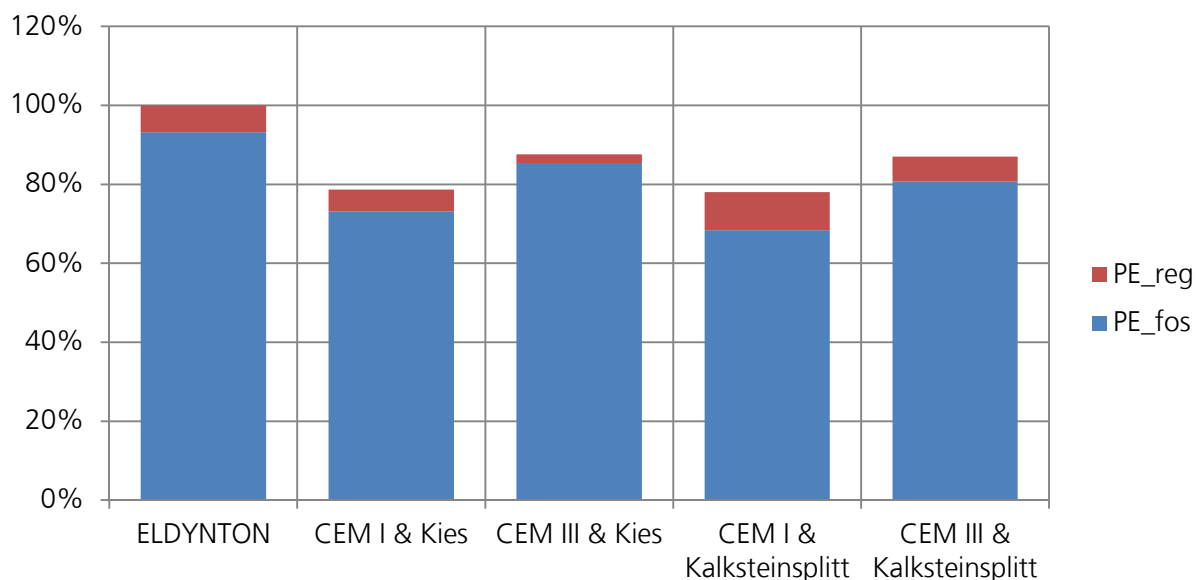
**Abb. 21** zeigt eine Übersicht über die Umweltwirkungen (GWP, AP, EP, ADP und PE\_ges) des ELDYNTON Prozesses in Bezug auf die einzelnen Szenarien. Der Impact des ELDYNTON Prozesses wird hierzu auf 100 % gesetzt und dient somit als prozentuale Bezugsgröße für die Szenarien und deren Referenzprodukte. Liegen die Werte über dem ELDYNTON Verfahren, also über 100 %, dann hat die Primärbereitstellung einen größeren Einfluss auf die betrachtete Kategorie und es lohnt sich aus Sichtweise dieser Kategorie das ELDYNTON Verfahren umzusetzen. Die Primärbereitstellung der rückzugewinnenden Materialien weisen in den allen betrachteten Szenarien in den Kategorien AP und EP mehr Emissionsäquivalente auf, benötigen aber weniger Primärenergie und haben einen geringeren Einfluss auf die Wirkungskategorien GWP und ADP.



**Abb. 21:** ELDYNTON Verfahren im Vergleich mit der Primärbereitstellung.



Die Bereitstellung der Substitutionsmaterialien vom Ausgangsbeton CEM I & Kies emittieren 5 % mehr SO<sub>2</sub>- und 12 % mehr PO<sub>4</sub>-Äquivalente als das ELDYNTON Verfahren. Die Primärbereitstellung emittiert 24 % weniger CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Zudem benötigt sie 21 % weniger Primärenergie und die Werte des abiotischen Ressourcenverbrauchs nehmen um 21 % ab. Die Bereitstellung der Substitutionsmaterialien vom Ausgangsbeton CEM III & Kies emittieren 1 % mehr SO<sub>2</sub>- und 5 % mehr PO<sub>4</sub>-Äquivalente als das ELDYNTON Verfahren. Die Primärbereitstellung emittiert 16 % weniger CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Zudem benötigt sie 12 % weniger Primärenergie und die Werte des abiotischen Ressourcenverbrauchs nehmen um 25 % ab. Die Bereitstellung der Substitutionsmaterialien vom Ausgangsbeton CEM I & Kalksteinsplitt emittieren 18 % mehr SO<sub>2</sub>- und 28 % mehr PO<sub>4</sub>-Äquivalente als das ELDYNTON Verfahren. Die Primärbereitstellung emittiert 25 % weniger CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Zudem benötigt sie 22 % weniger Primärenergie und die Werte des abiotischen Ressourcenverbrauchs nehmen um 5 % ab. Die Bereitstellung der Substitutionsmaterialien vom Ausgangsbeton CEM III & Kalksteinsplitt emittieren 14 % mehr SO<sub>2</sub>- und 20 % mehr PO<sub>4</sub>-Äquivalente als das ELDYNTON Verfahren. Die Primärbereitstellung emittiert 15 % weniger CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Zudem benötigt sie 13 % weniger Primärenergie und die Werte des abiotischen Ressourcenverbrauchs nehmen um 9 % ab. In **Abb. 22** wird der Primärenergiebedarf unterteilt in den fossilen und regenerativen Anteil dargestellt. In dem ELDYNTON Verfahren sowie in der Primärbereitstellung der Substitutionsprodukte ist der Primärenergiebedarf gesamt überwiegend aus fossilen Ursprungs.

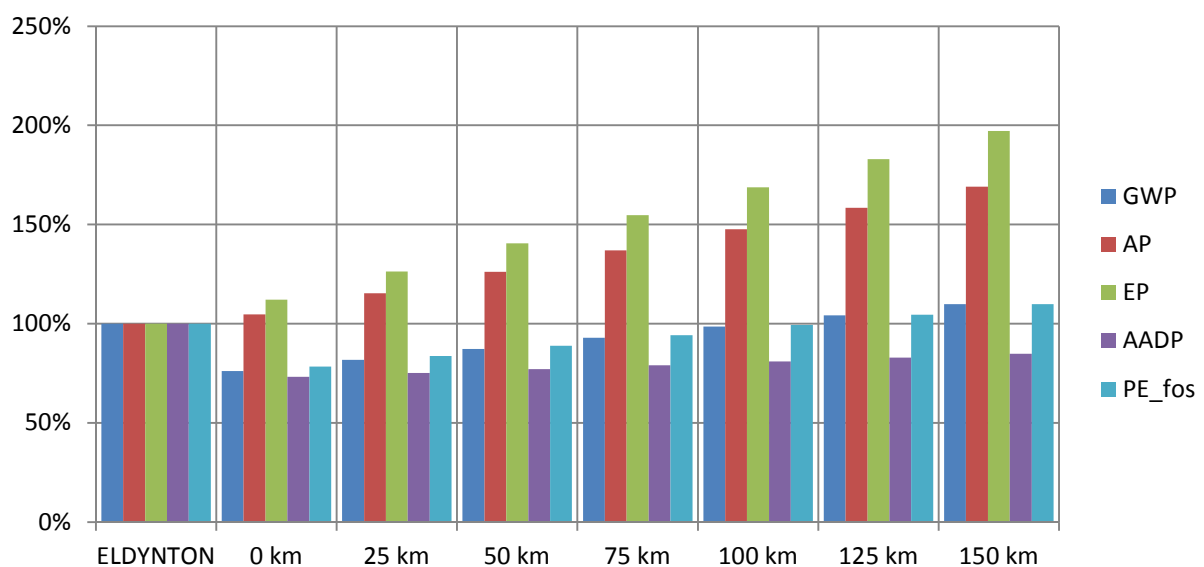


**Abb. 22:** Unterteilung des Primärenergiebedarfs gesamt in den fossilen und regenerativen Anteil.

Im ELDYNTON Verfahren setzt sich der Primärenergiebedarf gesamt zu 93 % aus fossilem und zu 7 % aus regenerativem Teil zusammen. Die Substitutionsprodukte von CEM I & Kies haben einen geringeren Bedarf und setzen sich zu 93 % aus fossilem und zu 7 % aus regenerativem Teil, die Produkte von CEM III & Kies setzen sich zu 98 % aus fossilem und zu 2 % aus regenerativem Teil, die von CEM I & Kalksteinsplitt setzen sich zu 88 % aus fossilem und zu 12 % aus regenerativem Teil und die von CEM III & Kalksteinsplitt zu 92 % aus fossilem und zu 8 % aus regenerativem Teil

### Transportdistanzen

Der Transport der Substitutionsprodukte ist in allen betrachteten Szenarien derzeit vernachlässigt worden. Ausgegangen wurde von einer identischen Entfernung von Substitutionsprodukte und primär hergestellten Produkten. Wird jedoch die Distanz der primär hergestellten Güter größer als die der Substitutionsprodukte, so wird das ELDYNTON-Verfahren aufgrund eingesparter Transportdistanzen aus ökologischer sowie ökonomischer Sicht attraktiver. Wenn die Substitutionsprodukte hingegen weiter transportiert werden, hat dies einen negativen Einfluss auf die Vorteilhaftigkeit des ELDYNTON Verfahrens. In der nachfolgenden **Abb. 23** ist das ELDYNTON Verfahren bezogen auf die einzelnen Wirkungskategorien auf 100 % gesetzt. Daraus lässt sich ermitteln in jeder betrachteten Wirkungskategorie, ab welcher Transportdistanz das Szenario ökologisch vorteilhaft ist.



**Abb. 23:** Schrittweise Erhöhung der Transportprodukte CEM I & Kies.

Aus der **Abb. 23** wird ersichtlich ab welcher Transportdistanz sich es lohnt das betrachtete Verfahren, hier die Substitutionsprodukte von CEM I und Kies, umzusetzen. Die Emissionsäquivalente von den Kategorien Versauerungspotential (AP) und Eutrophierungspotential (EP) liegen schon bei einer Distanz von 0 km unter den Emissionen des ELDYNTON Verfahrens. Beim Treibhauspotential (GWP) und beim Primärenergiebedarf lohnt es sich zwischen den Transportdistanzen 100 – 125 km. Beim ADP lohnt es sich nach ca. 300 km.

### **Diskussion der Ergebnisse**

Anhand des aufgeschlüsselten ELDYNTON Verfahrens in **Abb. 19** können die signifikanten Prozesse in den einzelnen Wirkungskategorien ermittelt werden.

Ein signifikanter Prozess ist die Trocknung der Middlings. In diesem Prozess wird die ankommende Fraktion durch einen Luftstrom, der mittels Erdgasverbrennung erwärmt wird, getrocknet. Dieser Prozess erzeugt über die Hälfte der CO<sub>2</sub>-Emissionsäquivalente und hat einen ebenso hohen Anteil an dem Primärenergiebedarf. Eine mögliche Optimierung ist hierbei die Umstellung des Trocknungsverfahrens das die Middlings und das Filtrat auf einer regenerativen Basis trocknet. Zudem könnte auch Abwärme von anderen Systemen integriert werden. Dadurch könnten die Emissionen weiter reduziert werden. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sobald Abwärme genutzt wird, diese zu einem Wertstoff wird und nicht lastenfrei in das System eingetragen werden kann. Dabei muss eine Allokation im Vordergrundsystem bestimmt werden, wie viel Lasten der Abwärme zugeteilt werden. Falls die Abwärme nicht am Ort des ELDYNTON Verfahrens anfällt, ist es sinnvoll die Transportaufwendungen der Nutzung der Abwärme gegenzurechnen. Eine weitere Alternative könnte ein neuer Einsatzort der Middlings sein, wenn hierdurch der Trocknungsprozess eingespart werden würde.

Ein weiterer signifikanter Prozess ist die elektrodynamische Fragmentierung. Der dortige Stromverbrauch der Fragmentierung kann eventuell durch weitere Optimierung des Verfahrens verringert werden. Eine entscheidende Rolle spielt die Strombereitstellung. Derzeit wird der Strom-Mix Deutschland betrachtet. Durch Nutzung eines regenerativen Stromanbieters oder durch das Zurückgreifen auf Strom aus regenerativen Quellen könnte der Einfluss der elektrodynamischen Fragmentierung verringert werden. Das Umstellen der Strombereitstellung hat zudem einen positiven Einfluss auf alle Prozesse die Strom benötigen.

Bekräftigt wird diese Aussage durch **Abb. 22**. Hier wird die Zusammensetzung des Primärenergiebedarfs gezeigt. Ersichtlich ist der maßgeblich fossile Anteil der durch die oben genannten Möglichkeiten im ELDYNTON Verfahren reduziert werden könnte.

Die Transportvariation in **Abb. 23** zeigt den Einfluss der Transportkilometer von den zu ersetzenden Materialien. In Gebieten, in denen die Rohmaterialien weit angeliefert werden

müssen und in denen Altbeton vor Ort anfällt, ist das ökologische Potential besonders hoch, da sich das Verfahren in den Wirkungskategorien GWP, AP, EP und  $PE_{\text{gesamt}}$  schon ab einer Transportdistanz von 125 Kilometern rentiert.

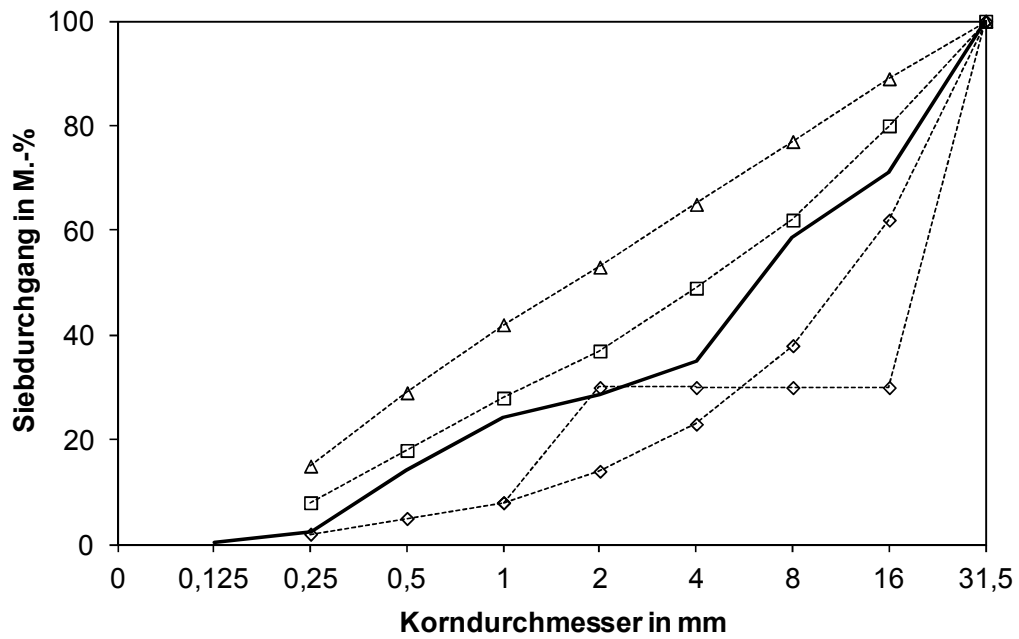
### **Zusammenfassung und Ausblick**

In der Studie wird aufgezeigt unter welchen Aspekten das Altbeton Recycling ökologische Verbesserungspotentiale aufweist. Um Recyclingprozesse zu bewerten, wird der Aufwand des derzeitigen Abbaus der zu ersetzenden Materialien mit dem zugehörigen Recyclingverfahren verglichen. Ist der Aufwand der primären Herstellung größer als der des Recyclingprozesses, dann lohnt sich Recycling. Ein besonderes Augenmerk ist es zu bestimmen, in welcher Qualität das Recyclinggut anfällt und welche Primärmaterialien hierfür ersetzt werden können. Diese Aussagen werden von Experten des Fachgebiets getroffen. Mit Hilfe der Ökobilanz konnte gezeigt werden, unter welchen Umständen das Verfahren bereits jetzt ökologische Vorteile aufweist. Die maßgeblichen Prozesse wurden identifiziert und Optimierungsvorschläge abgeleitet. Die Integration von Abwärme hat ein großes Potential und sollte bei zukünftigen Umsetzungen des Verfahrens berücksichtigt werden. Durch die Rückgewinnung von Primärmaterialien können Transportwege eingespart werden. Dies kann im lokalen und regionalen aber auch im global betrachteten Markt eine Rolle spielen. Schon heute werden z.B. Sande zur Betonherstellung weit transportiert, da die lokal und regional verfügbaren Quellen häufig erschöpft sind. Aus ökologischer Sicht weist das neuartige Verfahren ein erhebliches Potential unter bestimmten Randbedingungen auf, weshalb weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten empfehlenswert sind.

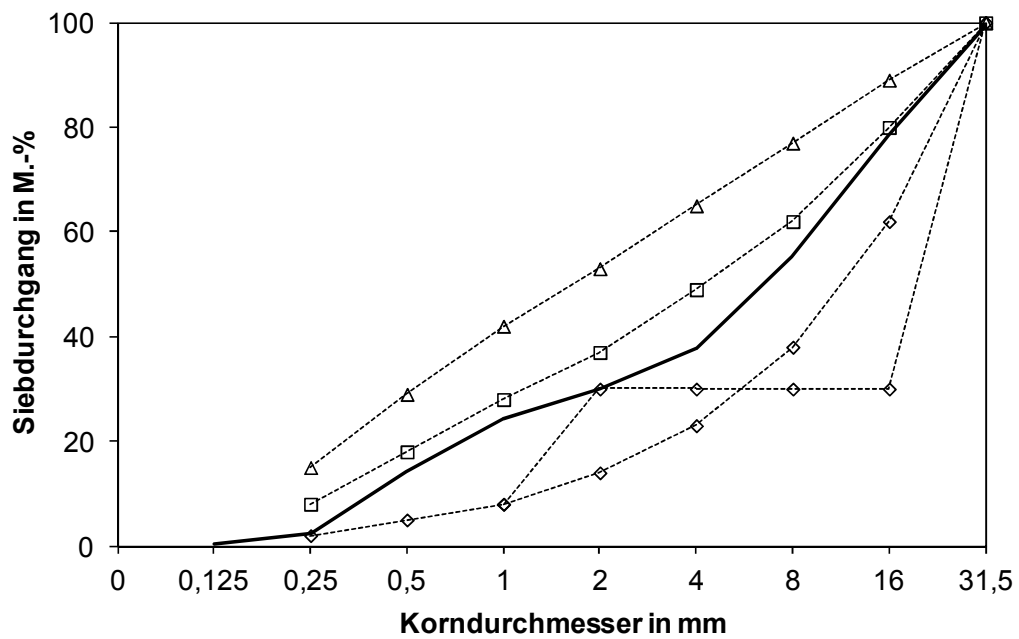
### **Anhang**

#### **Abkürzungen**

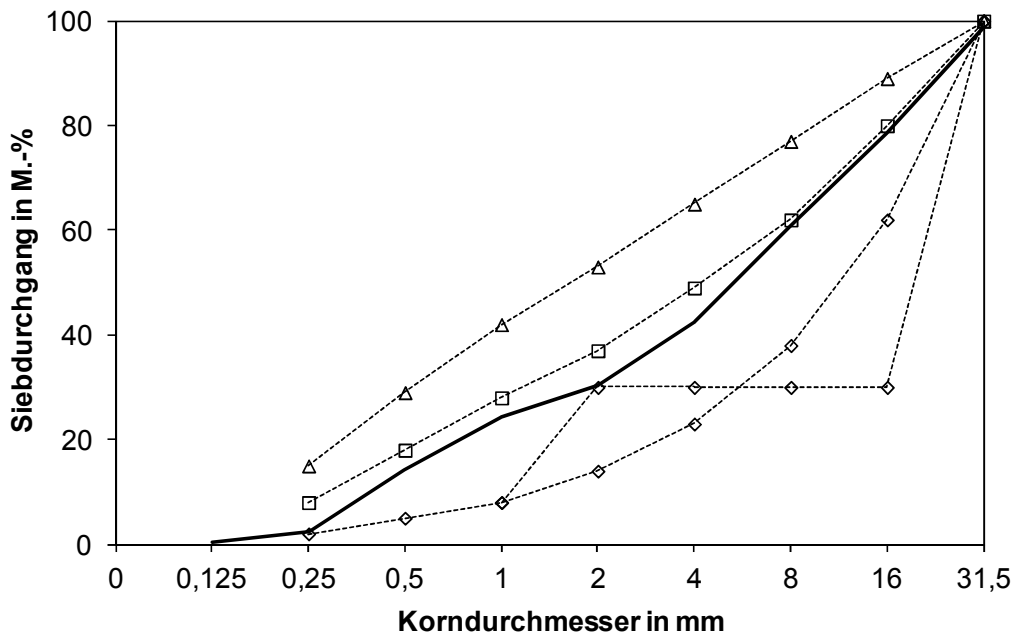
Q ED I	Beton aus Kies/Sand und CEM I, elektrodynamisch aufbereitet
Q ED III	Beton aus Kies/Sand und CEM III, elektrodynamisch aufbereitet
Q M I	Beton aus Kies/Sand und CEM I, mechanisch aufbereitet
Q M III	Beton aus Kies/Sand und CEM III, mechanisch aufbereitet
K ED I	Beton aus Kalksteinsplitt und CEM I, elektrodynamisch aufbereitet
K ED III	Beton aus Kalksteinsplitt und CEM III, elektrodynamisch aufbereitet
K M I	Beton aus Kalksteinsplitt und CEM I, mechanisch aufbereitet
K M III	Beton aus Kalksteinsplitt und CEM III, mechanisch aufbereitet



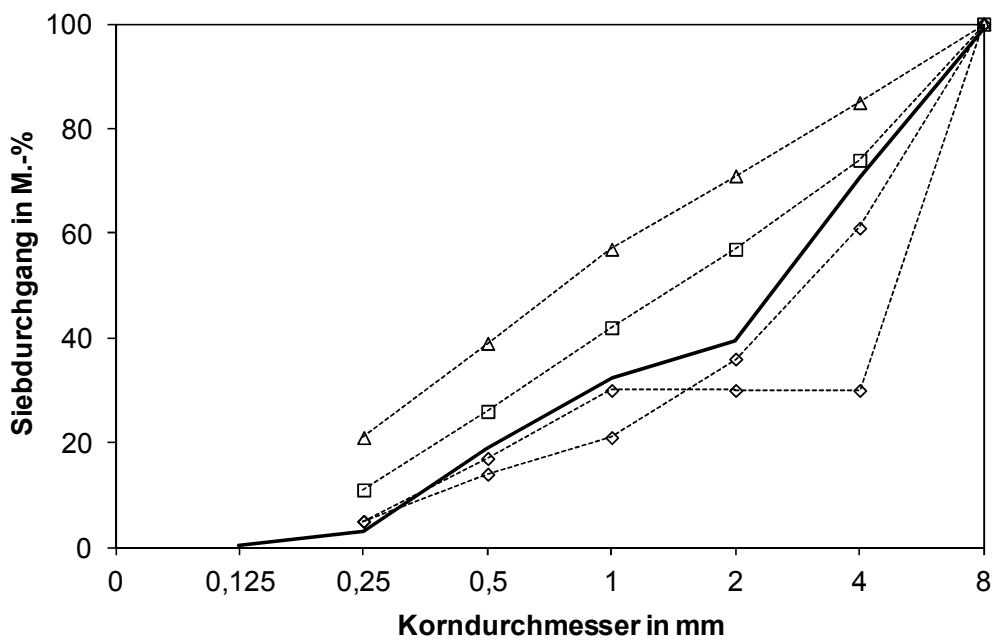
**Abb. 24:** Sieblinie original Gesteinskörnung Sand/Kies.



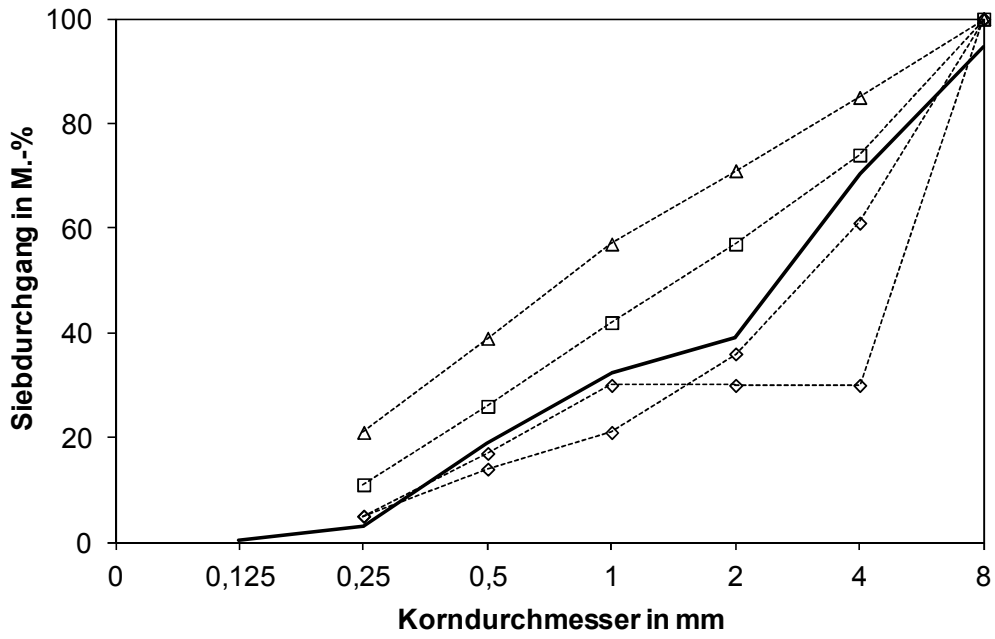
**Abb. 25:** Sieblinie der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM I und Sand/Kies).



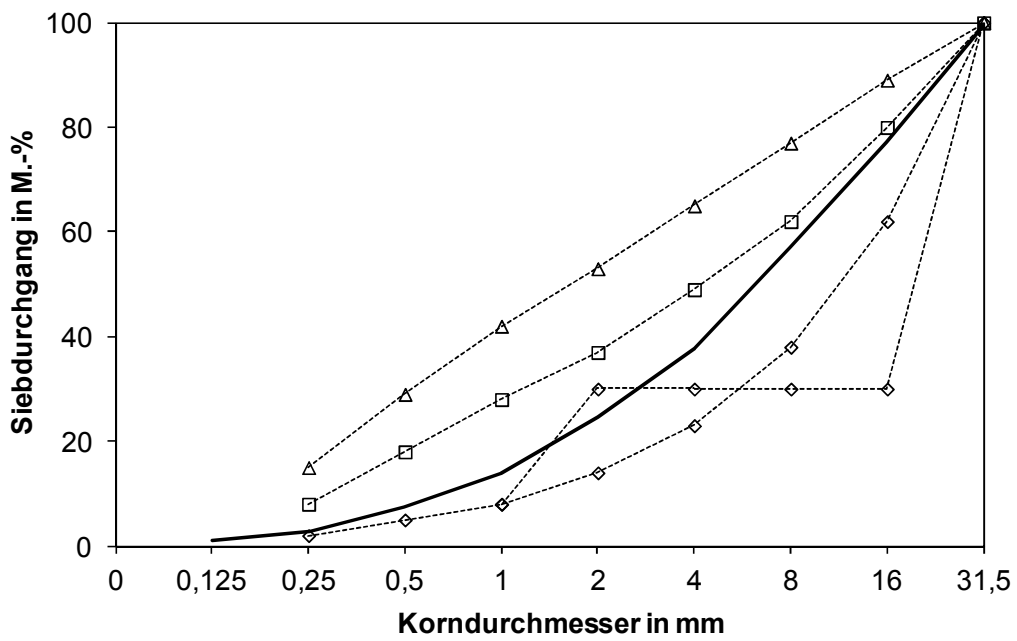
**Abb. 26:** Sieblinie der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM III und Sand/Kies).



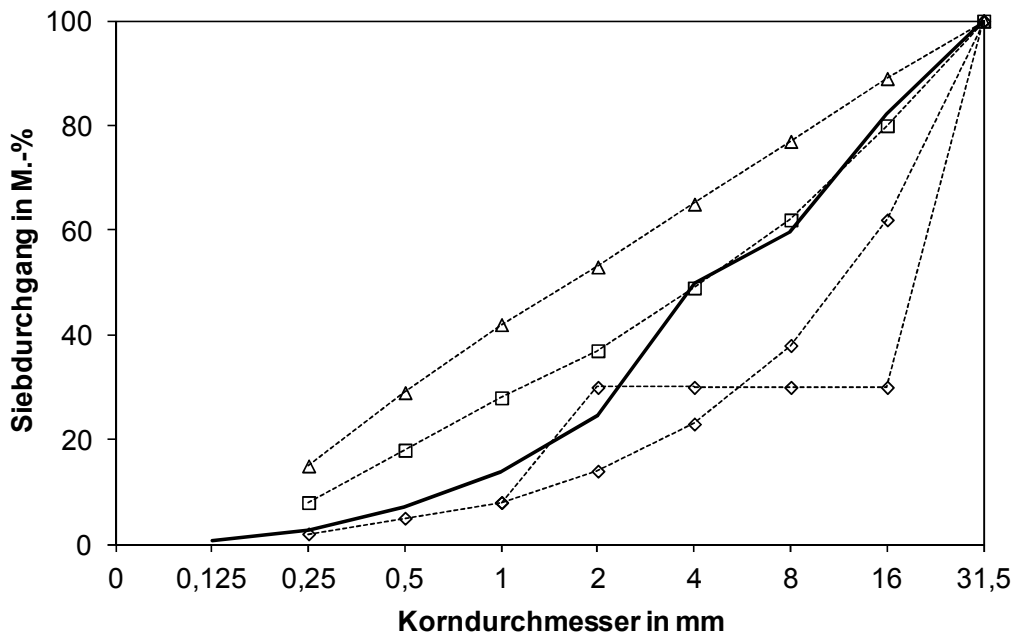
**Abb. 27:** Sieblinie der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM I und Sand/Kies).



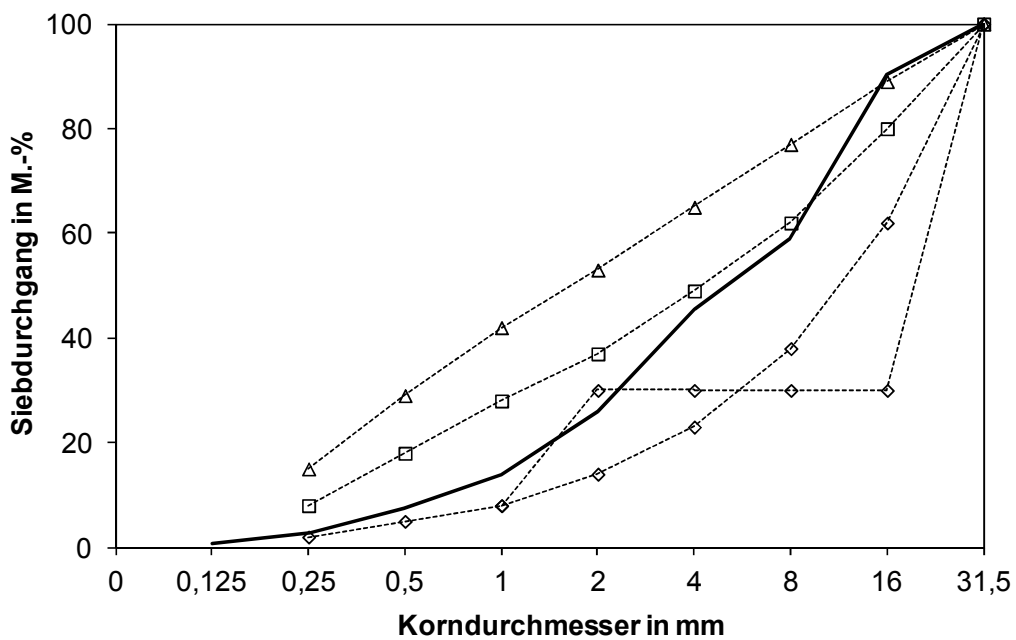
**Abb. 28:** Sieblinie der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM III und Sand/Kies).



**Abb. 29:** Sieblinie original Gesteinskörnung Kalksteinbrechsand/Kalksteinsplitt.

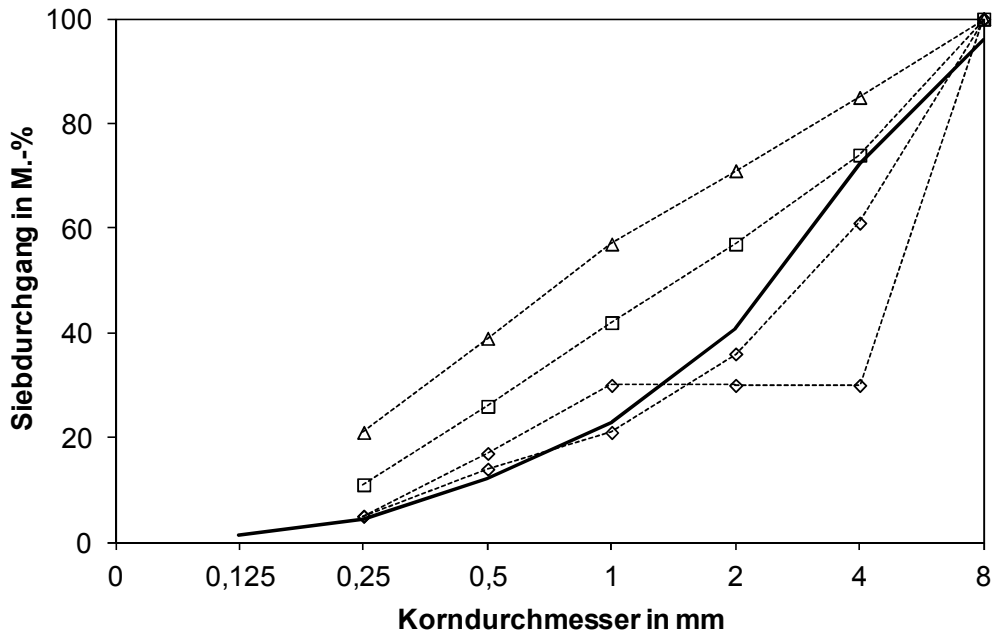


**Abb. 30:** Sieblinie der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM I und Kalksteinbrechsand/Kalksteinsplitt).

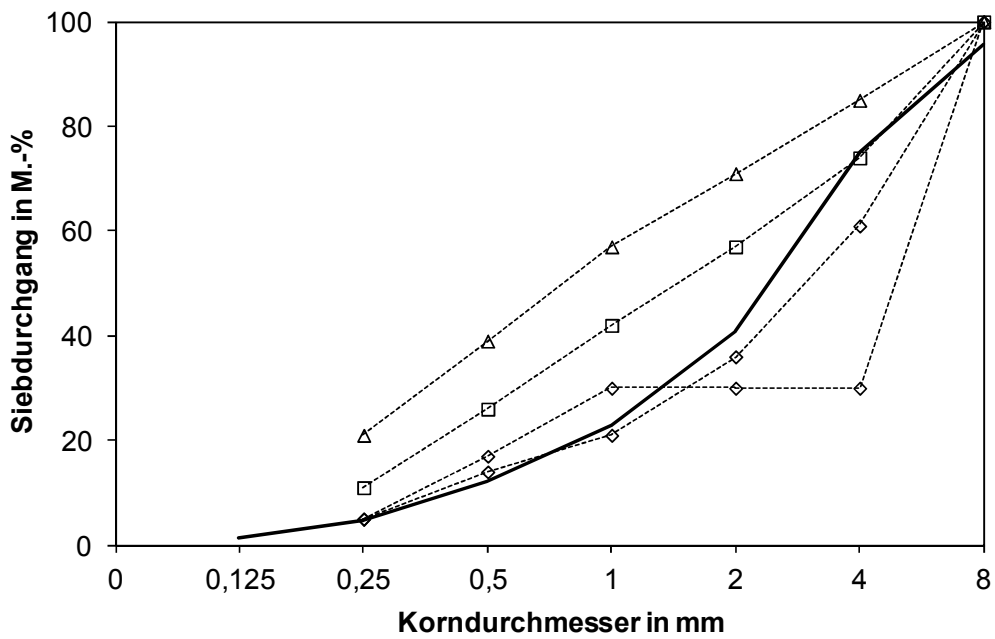


**Abb. 31:** Sieblinie der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM III und Kalksteinbrechsand/Kalksteinsplitt).





**Abb. 32:** Sieblinie der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM I und Kalksteinbrechsand/Kalksteinsplitt).



**Abb. 33:** Sieblinie der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung (Beton mit CEM III und Kalksteinbrechsand/Kalksteinsplitt).



**Abb. 34:** Fraktion > 20 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



**Abb. 35:** Fraktion 15 - 20 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



**Abb. 36:** Fraktion 10 - 15 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



**Abb. 37:** Fraktion 5 - 10 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



**Abb. 38:** Fraktion 2 – 5 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



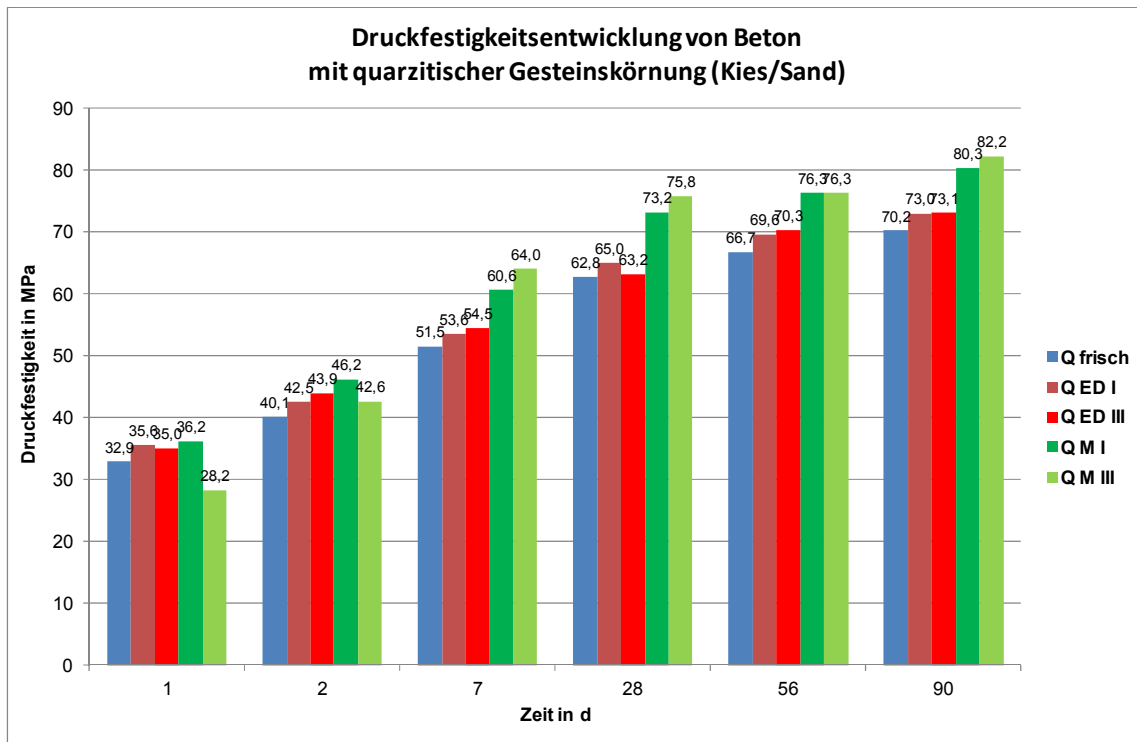
**Abb. 39:** Fraktion < 2 mm der elektrodynamisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



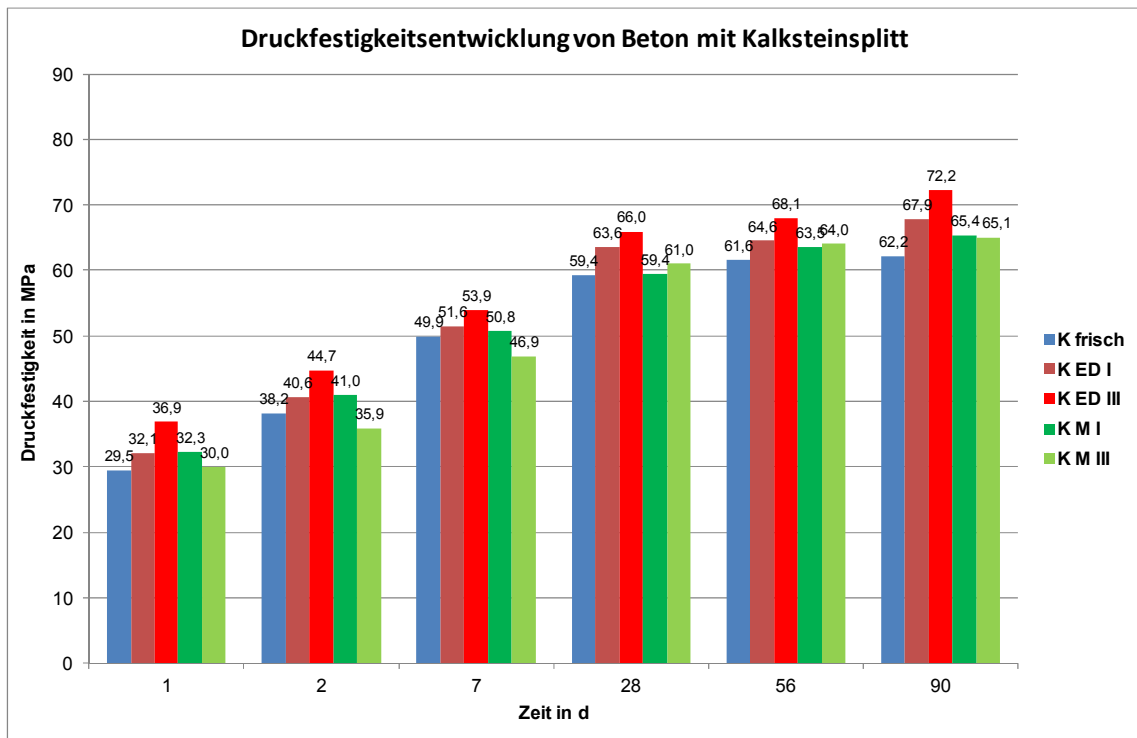
**Abb. 40:** Fraktion 2 - 8 mm der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



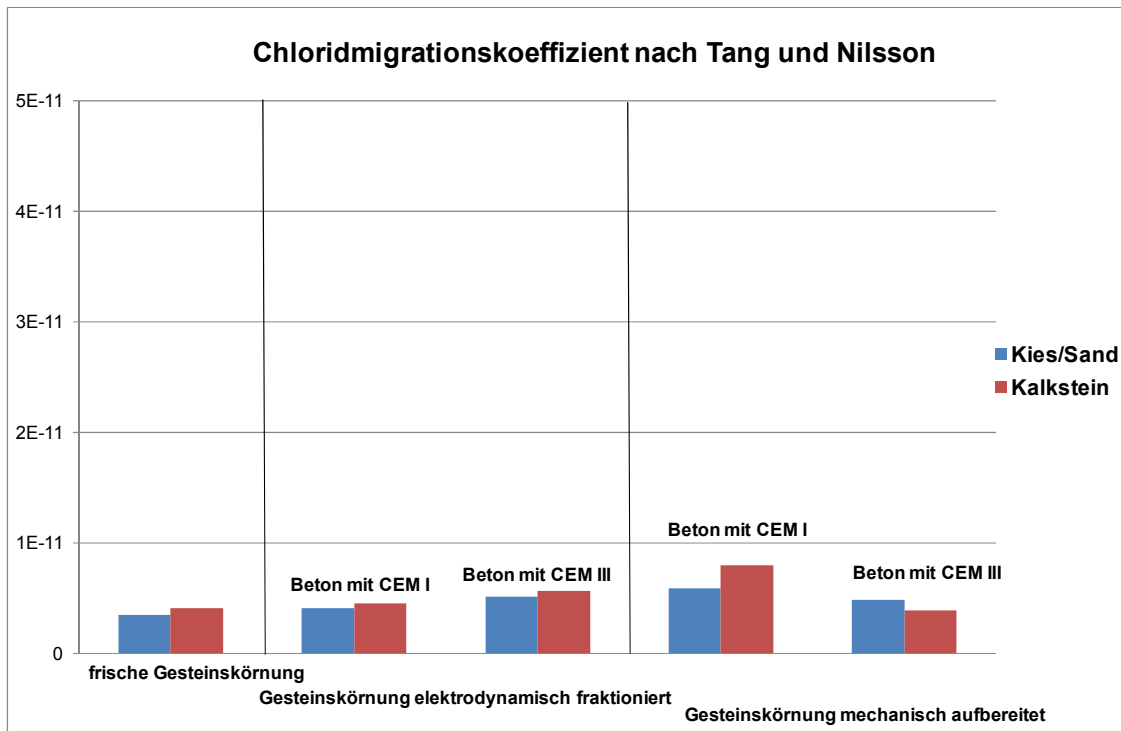
**Abb. 41:** Fraktion < 2 mm der mechanisch aufbereiteten Gesteinskörnung aus Beton mit CEM I und quarzitischer Gesteinskörnung (Kies/Sand).



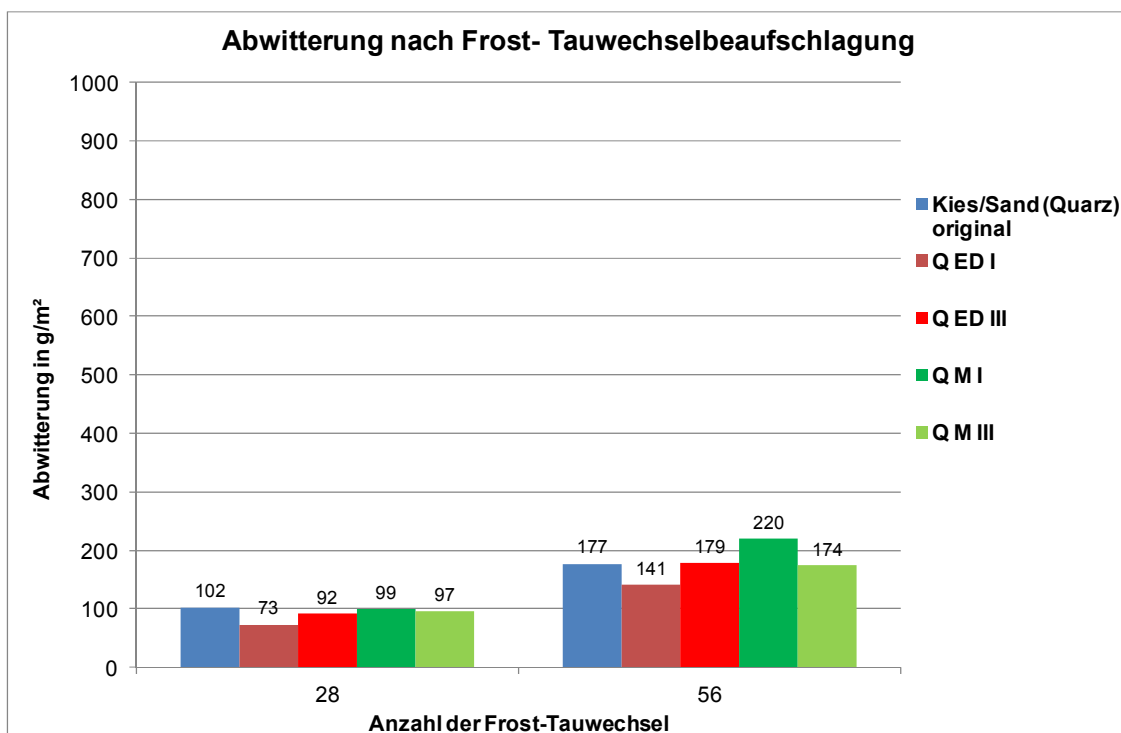
**Abb. 42:** Festigkeitsentwicklung der Vergleichsbetone mit quarzitischem Sand/Kies.



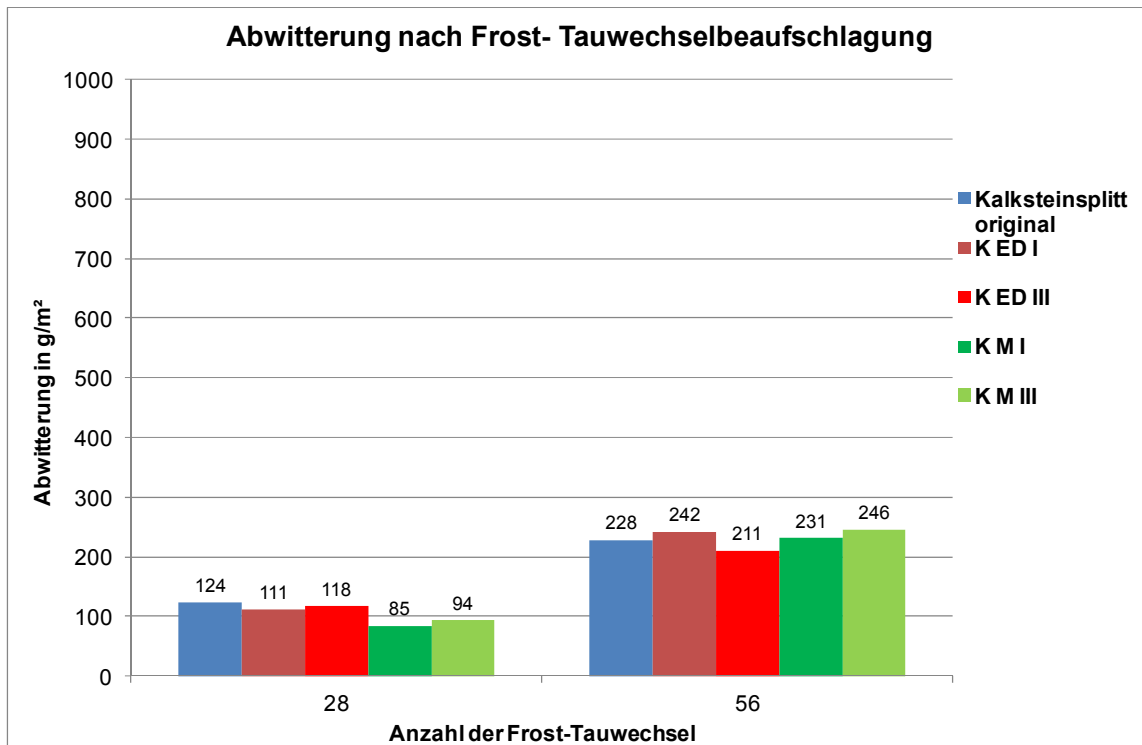
**Abb. 43:** Festigkeitsentwicklung der Vergleichsbetone mit Kalksteinsplitt.



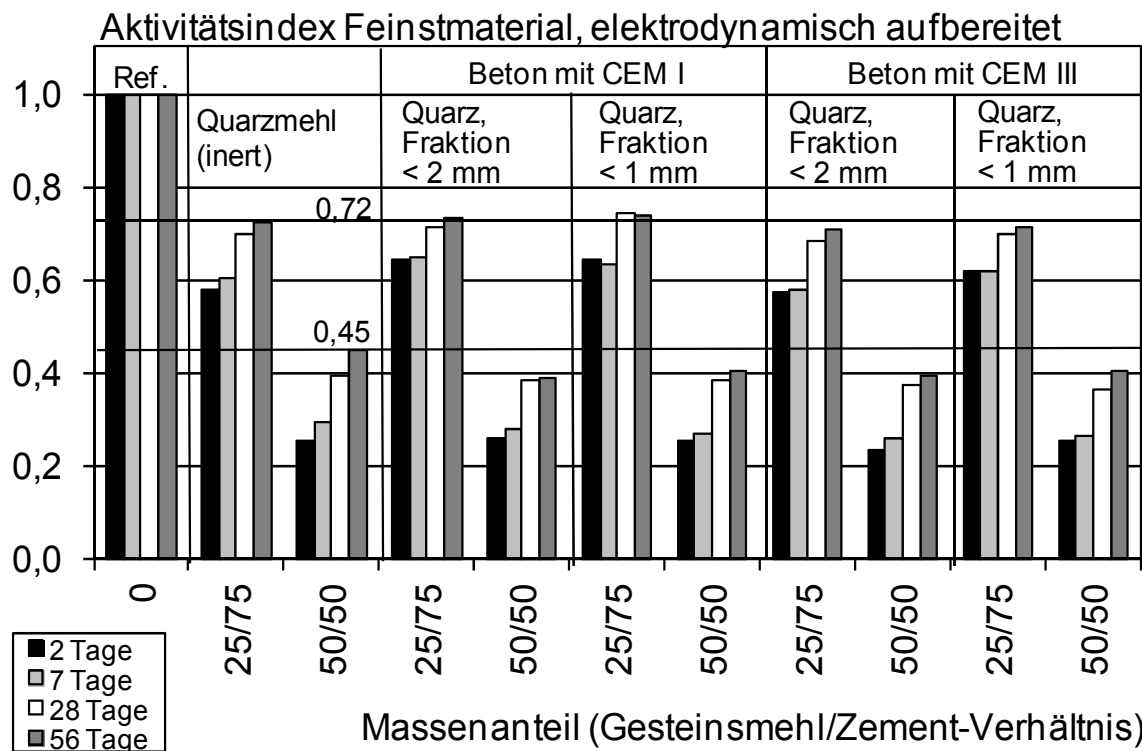
**Abb. 44:** Chloridmigrationskoeffizienten der Vergleichsbetone.



**Abb. 45:** Abwitterung nach Frost- Tauwechselbeaufschlagung, Betone mit quarzitischem Sand/Kies.

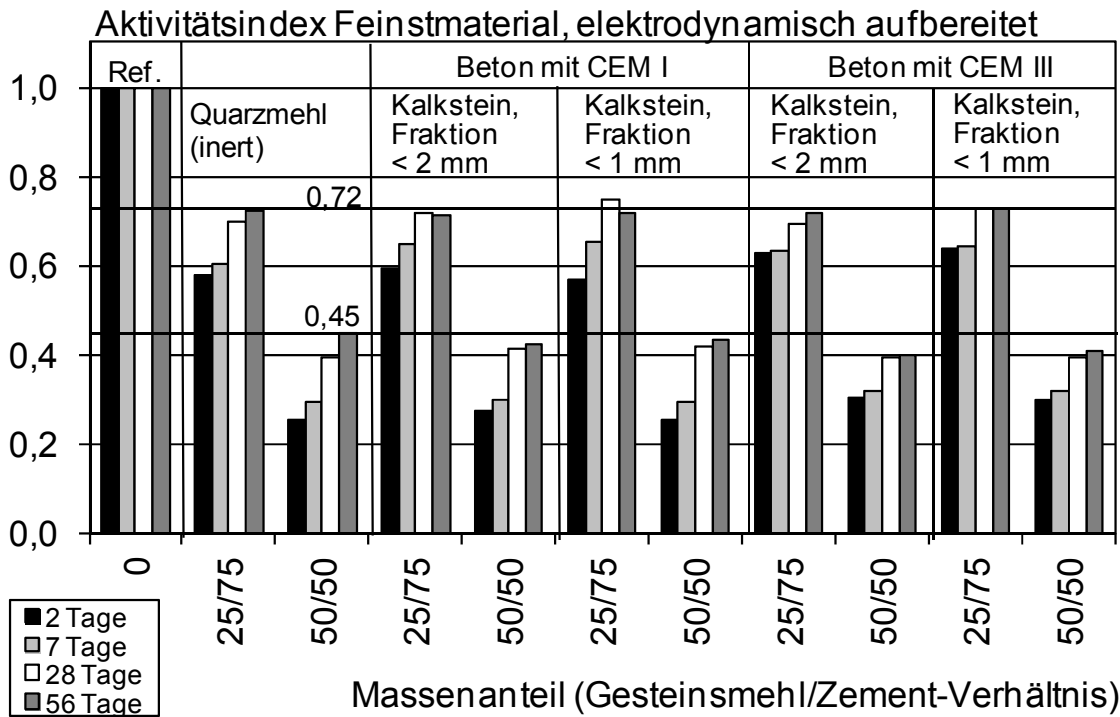


**Abb. 46:** Abwitterung nach Frost- Tauwechselbeaufschlagung, Betone mit Kalksteinsplitt.

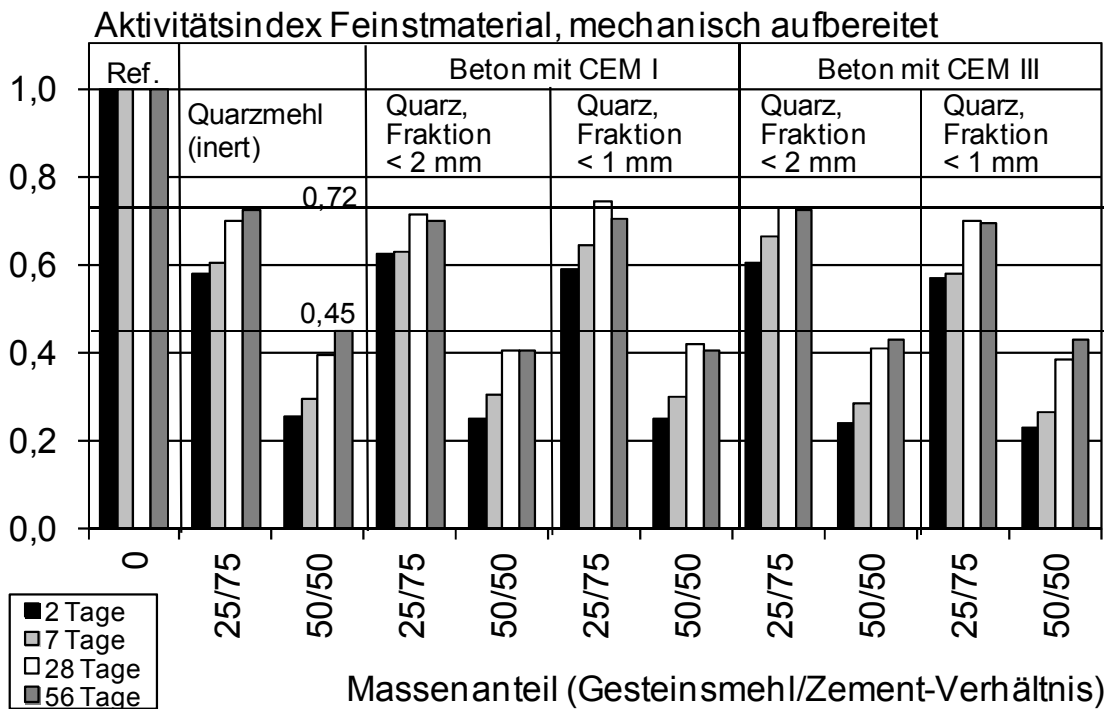


**Abb. 47:** Gegenüberstellung Aktivitätsindizes der Gesteinsmehle aus den Betonen mit Kies/Sand, elektrodynamisch aufbereitet.

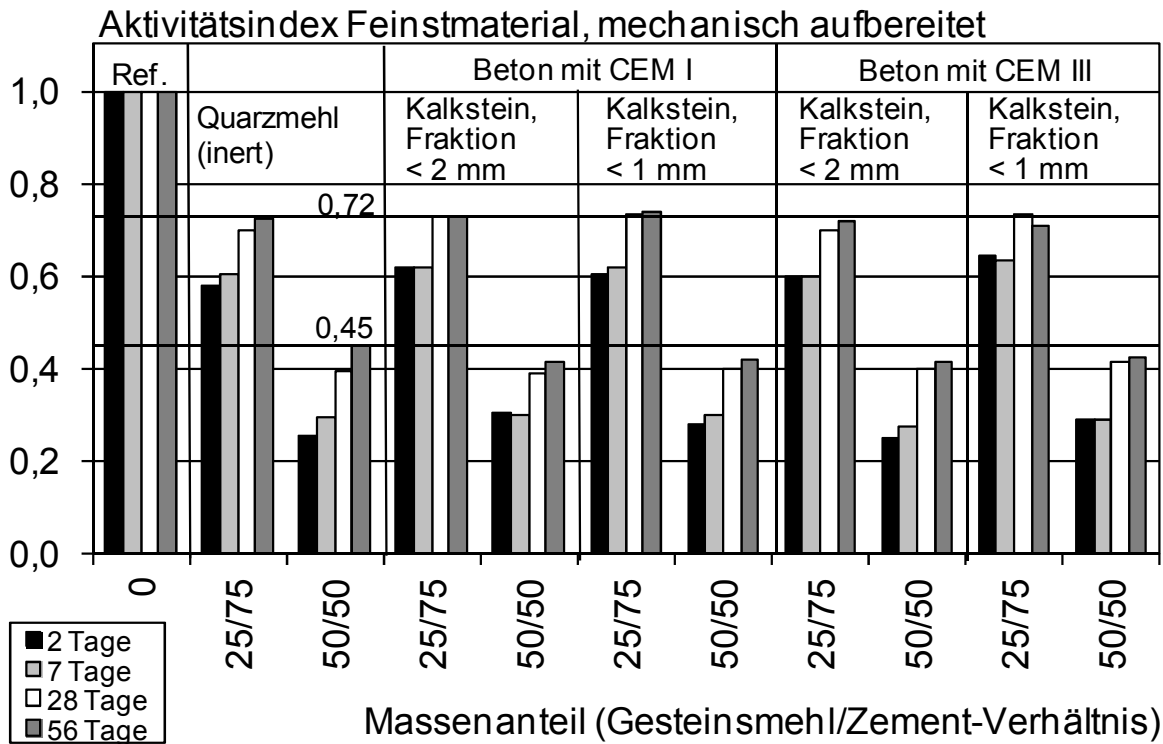




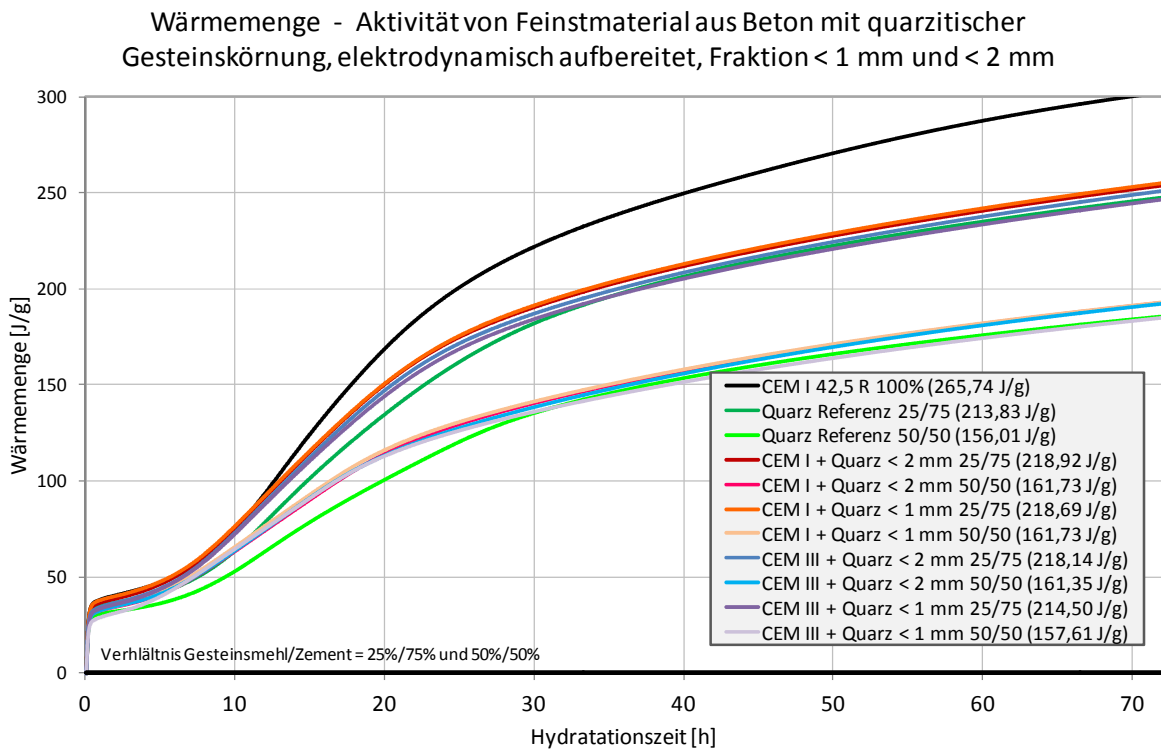
**Abb. 48:** Gegenüberstellung Aktivitätsindizes der Gesteinsmehle aus den Betonen mit Kalksteinsplitt, elektrodynamisch aufbereitet.



**Abb. 49:** Gegenüberstellung Aktivitätsindizes der Gesteinsmehle aus den Betonen mit Kies/Sand, mechanisch aufbereitet.

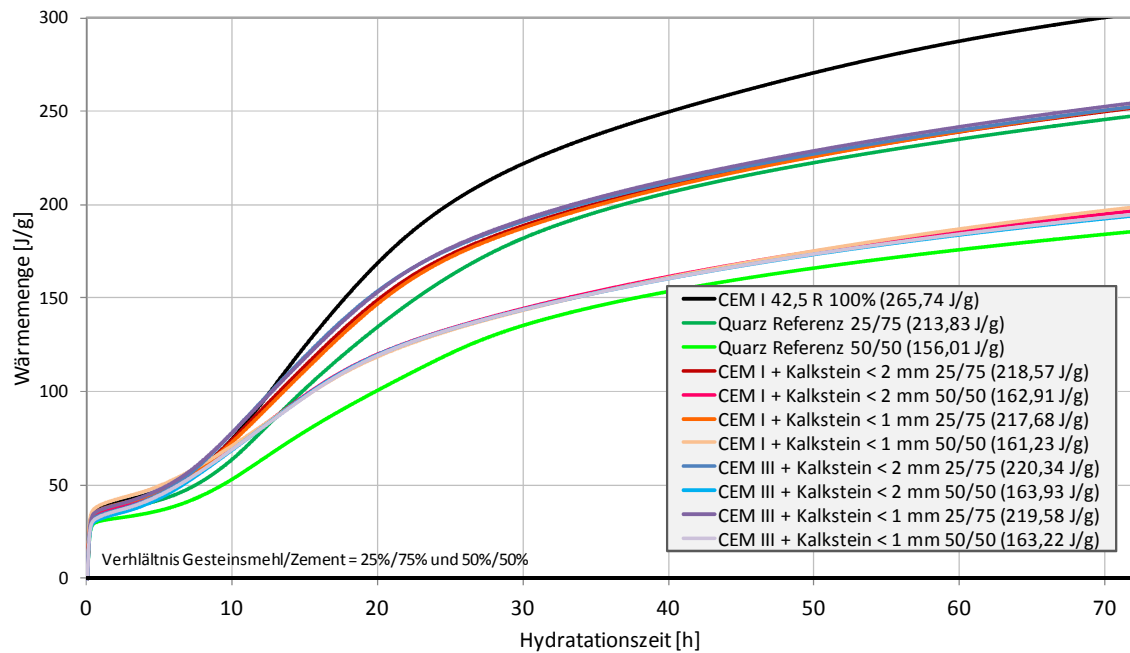


**Abb. 50:** Gegenüberstellung Aktivitätsindizes der Gesteinsmehle aus den Betonen mit Kalksteinsplitt, mechanisch aufbereitet.



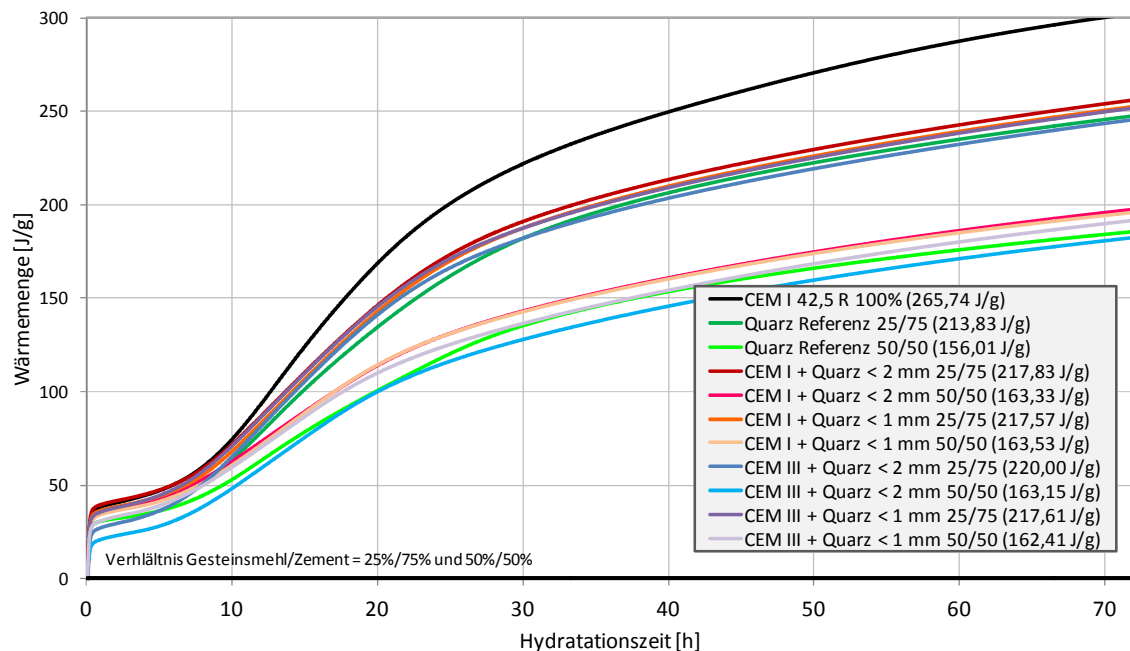
**Abb. 51:** Darstellung Wärmemenge, Feinfraktion aus Kies/Sand (elektrodynamisch aufbereitet).

Wärmemenge - Aktivität von Feinstmaterial aus Beton mit Kalkstein, elektrodynamisch aufbereitet, Fraktion < 1 mm und < 2 mm



**Abb. 52:** Darstellung Wärmemenge, Feinfraktion aus Kalksteinsplitt (elektrodynamisch aufbereitet).

Wärmemenge - Aktivität von Feinstmaterial aus Beton mit quarzitischer Gesteinskörnung, mechanisch aufbereitet, Fraktion < 1 mm und < 2 mm



**Abb. 53:** Darstellung Wärmemenge, Feinfraktion aus Kies/Sand (mechanisch aufbereitet).

Wärmemenge - Aktivität von Feinstmaterial aus Beton mit Kalkstein,  
mechanisch aufbereitet, Fraktion < 1 mm und < 2 mm

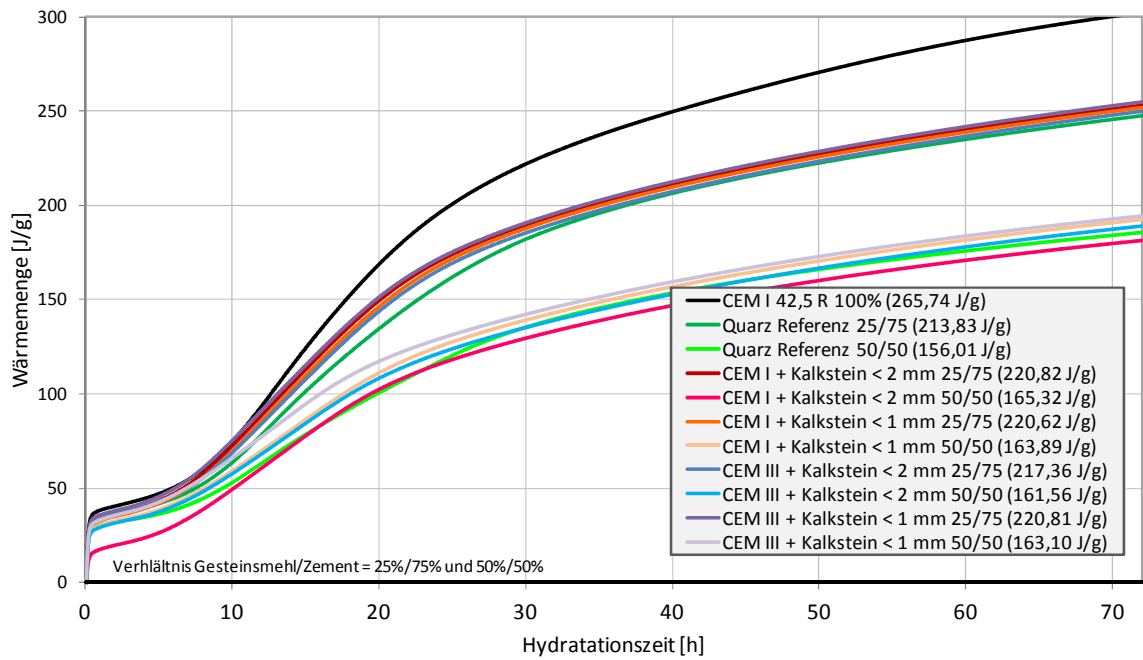


Abb. 54: Darstellung Wärmemenge, Feinfraktion aus Kalksteinsplitt (mechanisch aufbereitet).

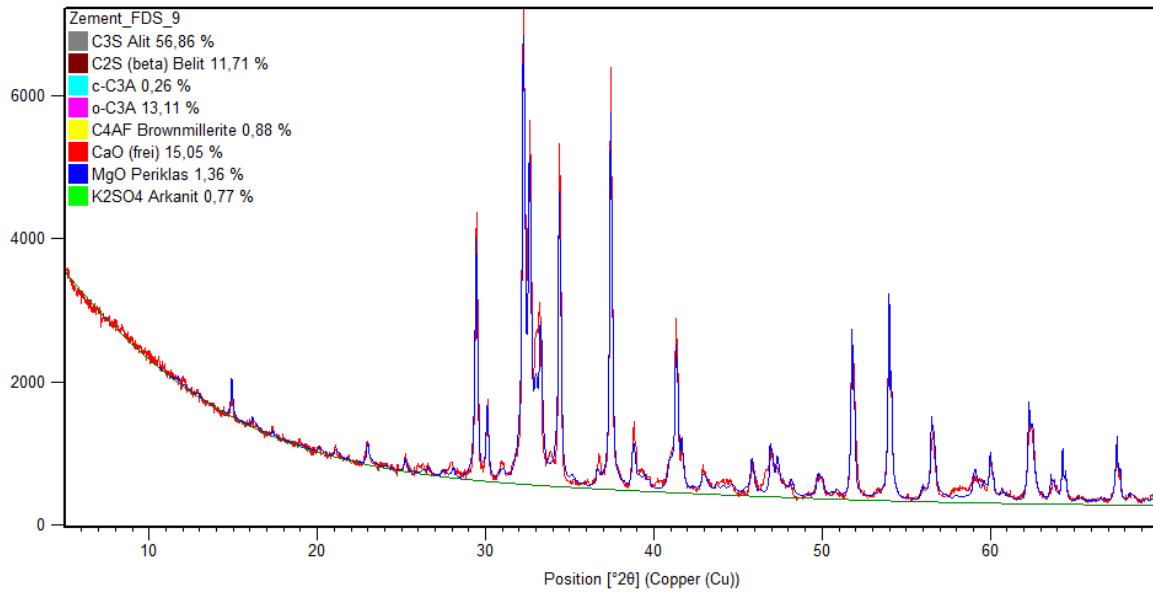
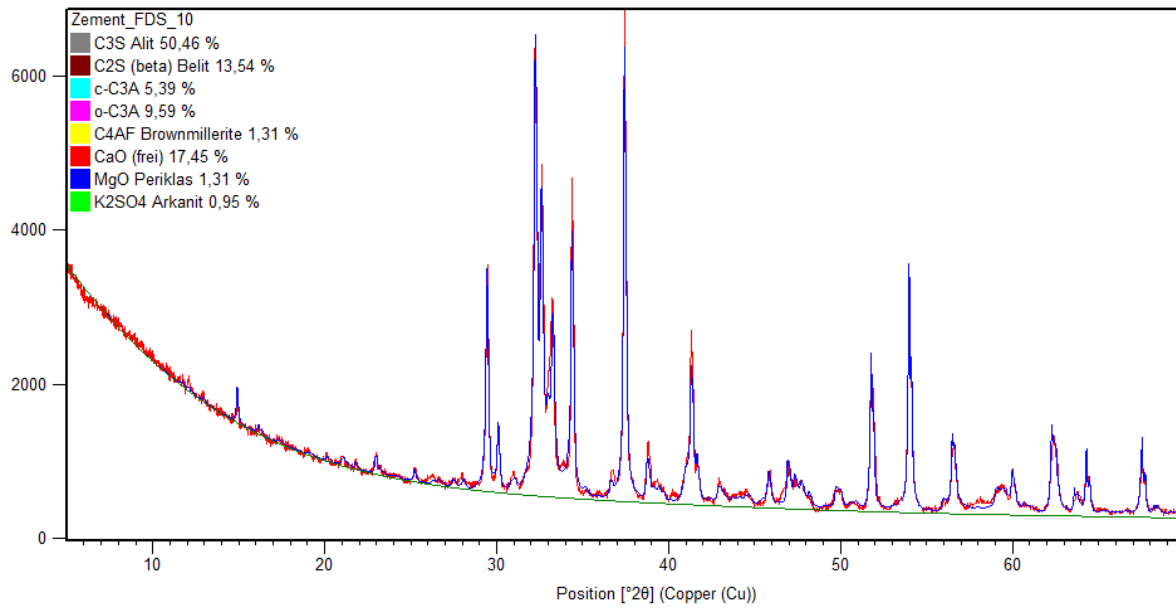
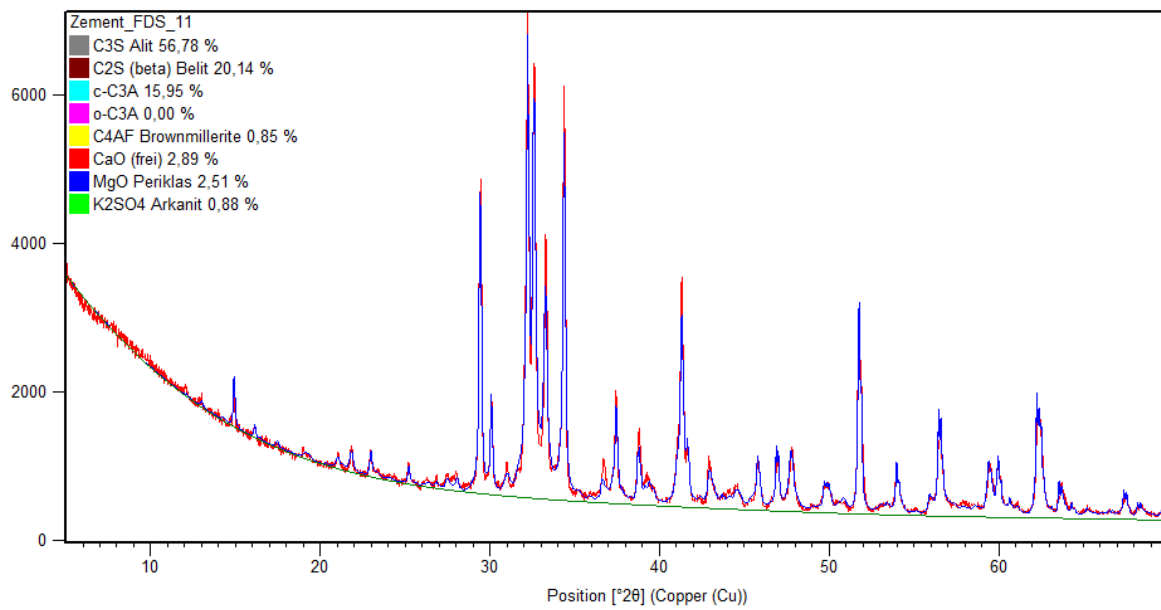


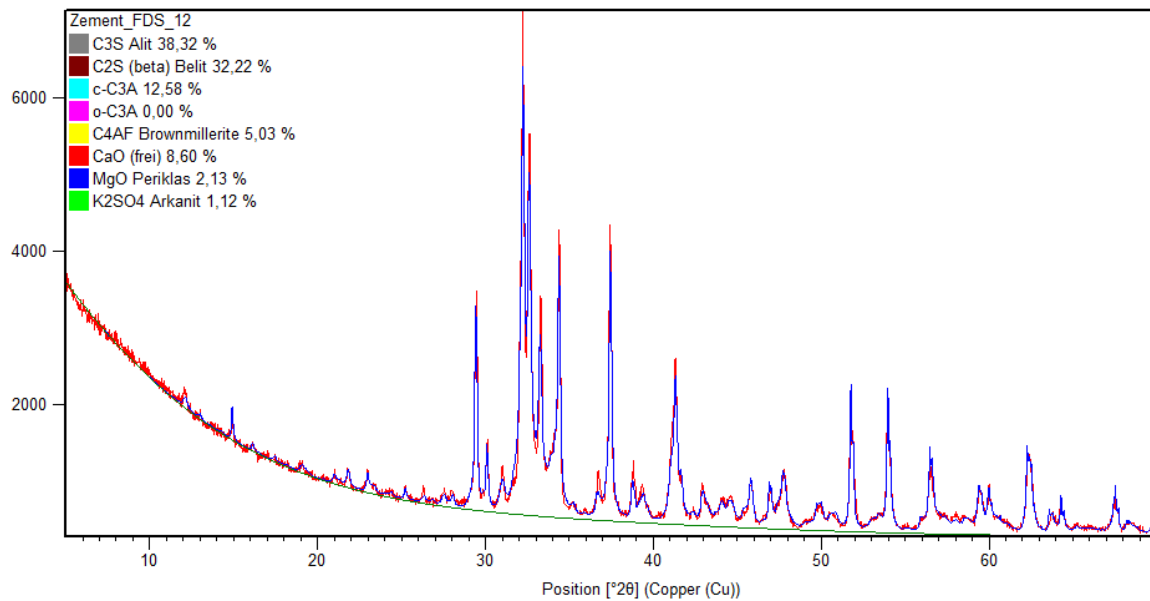
Abb. 55: XRD-file mit Phasenauswertung, Klinker 1 aus CEM I und Quarz < 2 mm.



**Abb. 56:** XRD-file mit Phasenauswertung, Klinker 2 aus CEM I und Quarz – Filterpresse.



**Abb. 57:** XRD-file mit Phasenauswertung, Klinker 3 aus CEM I und Kalkstein < 2 mm.



**Abb. 58:** XRD-file mit Phasenauswertung, Klinker 4 aus CEM I und Kalkstein – Filterpresse.

### Literaturverzeichnis

- [1] Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung, Eigenschaften, Prüfung von Andreas W. Momber, Rolf-Rainer Schulz in Technology & Engineering (2005)
- [2] DIN EN 12350-5:2009-08, Prüfung von Frischbeton,- Teil 5: Ausbreitmaß
- [3] DIN EN 12390-2:2009, Prüfung von Festbeton,- Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen
- [4] DIN EN 12390-3:2009, Prüfung von Festbeton,- Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
- [5] DIN 1048-5:1991, Prüfverfahren für Beton: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper
- [6] L. Tang and L. Nilsson, Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Chloride by Applying an Electrical Field, ACI Materials Journal, Vol.89, No.1, pp. 49-53, 1992.
- [7] DIN EN 14630:2006, Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung
- [8] CEN/TS 12390-9:2006-08, Prüfung von Festbeton, Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand, Abwitterung
- [9] BAW-Merkblatt "Frostprüfungen von Beton": Bundesanstalt für Wasserbau – Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau, Dez. 2004
- [10] DIN EN 450-1:2005, Flugasche für Beton – Teil 1: Definition, Anforderung und Konformitätskriterien
- [11] DIN EN 196-1:2005, Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit

- [12] Zement-Taschenbuch 2008, 51. Ausgabe: Verein Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf, Verlag Bau und Technik GmbH 2008, ISBN 978-3-7640-0499-6, S. 64-65
- [13] **DIN EN ISO 14040** (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.
- [14] **DIN EN ISO 14044** (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.
- [15] **LBP-GaBi; PE International (1992-2014)**: GaBi 6.3 Softwaresystem und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung; Version 6.3; Echterdingen/Stuttgart; online verfügbar unter: [www.gabi-software.com](http://www.gabi-software.com).

#### Veröffentlichungen:

- Artikel in Fraunhofer-Magazin „weiter.vorn“ in März 2012
- Artikel in Fraunhofer-Magazin „weiter.vorn“ in englischer Version, Jan. 2013
- Artikel in „Forschung kompakt“ Okt. 2012
- „Technisch Weekblad“ Den Haag (10.10.12)
- Presstext (11.10.12): <http://www.presstext.com/news/20121011004>
- Weser Kurier (09.10.12)
- TreeHugger: (11.10.12)  
„Lightning Bolts could make concrete recycling viable“
- DVICE (10.10.12)  
„Scientists ape Zeus, experiment with lightning to recycle concrete“
- Deutsches Baublatt (15.11.12)
- TV-Beitrag in Bayerischer Rundfunk, Abendschau (29.11.12)
- V. Thome „*Recycling waste concrete with lightning bolts*“, in AWE International, BAY Publishing, June 2013

#### Präsentationen:

- Landeskongress „Ressourceneffizienz-Bau und Infrastruktur“ Baden-Württemberg, ZKM Karlsruhe (27.-28.09.12), „*Elektrodynamische Fragmentierung von Abfallstoffen am Beispiel von Altbeton und Müllverbrennungsschlacken*“
- 19. Int. IFF-Fachtagung in Weimar (13.-14.11. 12), „*Recycling von Altbeton durch eine elektrodynamische Fragmentierung*“
- Messe Bau, 14.-18. 01. 2013, Vorführung der elektrodynamischen Fragmentierung
- V. Thome „*Concrete recycling by lightning*“, at Totally Concrete Expo, Johannesburg (SAF), 3. - 6. June 2013

Projekt „ELDYNTON“ wird Bundessieger im Wettbewerb „Land der Ideen“ (2014).



[http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse\\_und\\_Medien/Presseinformationen/pm-27-01-2014-fragmentierung-land-der-ideen.html](http://www.ibp.fraunhofer.de/de/Presse_und_Medien/Presseinformationen/pm-27-01-2014-fragmentierung-land-der-ideen.html)

#### **TV**

Fernsehbeitrag des IBP in ARD „Ratgeber Bau“ zu Betonrecycling am 20.05. 2012

Podcast zu Betonrecycling unter: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/audio.html>

Sat 1 München - Regionalnachrichten - 27.01.2014 17:40

Sat.1 BAYERN „Schutt ist kein Schrott“ - 27.01.2014

[http://www.sat1bayern.de/news/20140127/schutt-ist-keinschrott/?](http://www.sat1bayern.de/news/20140127/schutt-ist-keinschrott/?pk_campaign=rss&pk_kwd=schutt-ist-kein-schrott)

[pk\\_campaign=rss&pk\\_kwd=schutt-ist-kein-schrott](http://www.sat1bayern.de/news/20140127/schutt-ist-keinschrott/?pk_campaign=rss&pk_kwd=schutt-ist-kein-schrott)

#### **Radio**

BR - Bayern 1 am 27.01.2014

Sendezeiten: 08:03, 08:31, 09:02, 09:30, 12:39, 13:48, 14:03, 14:31, 15:03, 15:10, 15:31

<http://www.br.de/nachrichten/oberbayern/regionalnachrichten-oberbayern-100.html>

BR - Bayern 2 am 27.01.2014, 13.48 Uhr

BR - Bayern 5 am 27.01.2014, 09:09 Uhr

Antenne Bayern Radio am 27.01.2014, 11:03 Uhr

Bayern Plus am 27.01.2014, 09:31, 14:46 Uhr

#### **Internet**

Recyclingtechnologie mit Potenzial



[Informationsdienst Wissenschaft (idw) - 27.01.2014]

<http://idw-online.de/pages/de/news570890>

Recyclingtechnologie mit Potenzial

[wissenschaft24.info - 27.01.2014]

[http://www.wissenschaft24.info/aus\\_instituten.php4?news=362141](http://www.wissenschaft24.info/aus_instituten.php4?news=362141)

Recyclingtechnologie mit Potenzial

Fraunhofer-Institut Valley Auszeichnung für's Betonrecycling

<http://www.br.de/nachrichten/oberbayern/auszeichnung-fraunhofer-institut-valley-100.html>

Recyclingtechnologie mit Potenzial

[uni online - 28.01.2014]

<http://www.uni-protokolle.de/nachrichten/id/271999/>

Aus den Terminplänen von Bayerns Wirtschaftsministerin Aigner und Bayerns

Wirtschaftsstaatssekretär Pschierer für die 5. Kalenderwoche, [Bayern.de am 28.01.2014]

<http://www.bayern.de/Pressemitteilungen-.1255.10488264/index.htm>

## **Zeitung**

Bochumer Zeitung (28.01.14)

<http://www.bochumer-zeitung.net/aktuell/vermishtes/67219284-recyclingtechnologie-mitpotenzial>

Oberbayerisches Volksblatt (28.01.14)

Starnberger Merkur (28.01.14)

Münchner Merkur (28.01.14)

Holzkirchner Merkur (28.01.14)

Freisinger Merkur (28.01.14)

## Links:

<http://www.baulinks.de/webplugin/baulinks.xml>

[http://twitter.com/baulinks\\_de](http://twitter.com/baulinks_de)

<http://www.facebook.de/baunachrichten>

## **Masterarbeiten / Bachelorarbeiten:**

Bachelorarbeit Martina Gräber:

*„Untersuchungen zum Einfluss von salzhaltigen Lösungen auf elektrische Unterwasserentladungen am Beispiel von Anhydrit und Steinsalz“*, TU München [2013]

Masterarbeit Anna-Lena Höhn:

„Verwendung von aufbereitetem Altbeton zur Porenbetonherstellung“, LMU München [2014]

## X „Kurzfassung“ (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Konstruktion einer elektrodynamischen Aufbereitungsanlage für Altbeton zur Rückgewinnung von Rohstoffen für die Zementindustrie“	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Thome, Volker Rasch, Stefan Leiblein, Christian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.09.2014
	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation Unveröffentlichter Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Fraunhofer IBP Fraunhoferstr. 10 83626 Valley  Schwenk Zement KG Laudenbacher Weg 5 97753 Karlstadt  Leiblein GmbH Adolf-Seeber Str. 2 74736 Hardheim	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 033R076C
	11. Seitenzahl 67
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 15
	14. Tabellen 2
	15. Abbildungen 63
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	

18. Kurzfassung

Aufgrund des weltweit steigenden Bedarfs an Beton und den damit benötigten Ressourcen an Kalk, Ton und Gesteinskörnungen, existiert bereits jetzt in manchen Ländern ein Sandmangel, z. B. in Schweden. Daher gewinnt ein effizientes Recycling von Altbeton immer mehr an Bedeutung. Die Aufbereitung von Altbeton mit Hilfe von mechanischen Methoden führt jedoch zu einem Downcycling, d.h. die erhaltenen Produkte besitzen nicht die gleichen Qualitätsmerkmale wie die Ausgangsstoffe. Mechanisch hergestellte Gesteinskörnungen werden vorwiegend im Straßenbau als Ersatz für Gesteinskörnungen eingesetzt, dürfen aber aufgrund ihrer verringerten mechanischen Eigenschaften nicht für tragende Betonteile verwendet werden.

Das Projekt ELDYNTON beschäftigte sich mit der Fragestellung, inwieweit man Altbeton mit Hilfe der sog. „elektrodynamischen Fragmentierung“ wieder aufbereiten kann, um daraus hochwertige Rohstoffe für die Betonherstellung zu gewinnen. Bei dieser Methode werden unter Wasser ultrakurze Hochleistungsimpulse auf das Material appliziert. Dabei wandern die Blitze bevorzugt entlang von Kornoberflächen durch den Festkörper und legen dabei die Einzelbestandteile des Verbundwerkstoffes frei. Es war bekannt, dass während der Fragmentierung von Altbeton durch freigesetzte Salze die Prozesswassereigenschaften negativ beeinflusst werden, sodass die Fragmentierung zum Erliegen kommt. Deshalb sollte in ELDYNTON ein geeignetes Wasseraufbereitungsverfahren für die Fragmentierung von Altbeton entwickelt und mit der Fragmentierung kombiniert werden. Zunächst wurden vier verschiedene Betone hergestellt, bestehend aus CEM I bzw. CEM III/A Zementen, kombiniert mit quarzitischer Gesteinskörnung bzw. Kalksteinsplitt. Nach einer mechanischen bzw. elektrodynamischen Aufbereitung der vier Betonproben, wurden die Produkte hinsichtlich ihrer Wiederverwertbarkeit miteinander verglichen. Bei der Behandlung von Altbeton mit Hochleistungsimpulsen erhält man drei verschiedene Fraktionen: eine Grobfraction > 2 mm, eine Middlingsfraction < 2mm, bestehend aus einem Gemenge aus feinem Sand und zerkleinertem Zementstein und das Filtrat aus dem Prozesswasser, welches hauptsächlich aus gefällten Schwebstoffen besteht. Die Grobfraction aus dem fragmentierten Altbeton wurde wieder als Gesteinskörnung im Frischbeton eingesetzt und es konnten durch betontechnologische Tests bewiesen werden, dass dies im Vergleich zu mechanisch hergestellten Gesteinskörnungen zu keiner Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften in den Betonproben führt. Die Middlingsfraction eignet sich aufgrund der fehlenden hydraulischen Aktivität nicht als Zementzumahlstoff, lässt sich aber direkt als Rohstoff für die Herstellung von porösen Baustoffen verwenden. Aus dem Filtrat der Betonproben, welche als Gesteinskörnung Kalksteinsplitt enthielten, konnte wieder ein hydraulisch aktiver Zement gebrannt werden. Damit konnte in ELDYNTON erstmals bewiesen werden, dass sich Beton zu beinahe 100 % wieder recyceln lässt, d. h. man erhält durch die Fragmentierung nicht nur hochwertige Gesteinskörnungen, sondern auch wieder Rohstoffe für die Zementherstellung. Damit kann in Zukunft ein großer Beitrag zur Ressourcenschonung, aber auch zur Verminderung von CO<sub>2</sub> Emissionen geleistet werden. Als nächsten Schritt soll dieses Verfahren für einen industriellen Einsatz mit Durchsatzraten von ca. 20 t / h weiterentwickelt werden.

19. Schlagwörter

Beton, Recycling, Fragmentierung, mechanische Aufbereitung

20. Verlag

21. Preis