



Betonfeinteile als Zumahlstoff

In Zeiten des Klimawandels und Rohstoffengpässen wird ein ressourcen- und umweltschonender Ansatz auch in der Bauwirtschaft immer wichtiger. Beton-Recyclingfeinanteile bestanden in diesem Projekt erfolgreich die Prüfung für die Eignung als Zumahlstoff für die Zementproduktion.

TEXT UND ABBILDUNGEN: STEFAN KRISPEL, STEFANIE KLACKL, NICOLE ROSZA
FOTO: RM

Im Fokus des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft geförderten Forschungsprojekts „LeptoCalc“ (FFG Nr. 877664) war die Beurteilung der grundsätzlichen Eignung von Feinstoffen aus Betonrecyclinganlagen für den Einsatz als Zementbestandteil. Die Bearbeitung der Fragestellung erfolgte gemeinschaftlich durch ein Forschungskonsortium bestehend aus österreichischen, deutschen und belgischen Partnern. Eine Voraussetzung in der Arbeit mit Recyclingmaterialien ist die Kenntnis der Materialeigenschaften, zudem ist die Sicherstellung einer gleichbleibenden Qualität in der Versorgung essenziell.

Im Rahmen des Projekts wurden zunächst Feinanteile aus recyceltem Beton untersucht, wobei insbesondere die Analyse der Restreaktivität von großem Interesse war. Für eine Gesamtbeurteilung wurden umfassende Mörtel- und Betonprüfungen durchgeführt, wobei mit drei Konzentrationen (10, 20 und 35 Masseprozent) an Recyclinganteilen gearbeitet wurde. Für die Probennahme wurden in Österreich vier Recyclinganlagen ausgewählt, wobei mobile Brecheranlagen am häufigsten vorkommen. Das Recyclingmaterial wurde fein gemahlen, da bei zukünftigen potenziellen Anwendungen in der Zementherstellung ebenfalls die Feinfraktion

herangezogen wird. Weiters wurden, als Vergleich zur Abschätzung der Restreaktivität, im Labor Zementmörtelproben unter Verwendung von CEM I 52,5 R, CEM II/B-LL und CEM III/A hergestellt. An diesen Probenmaterialien wurde, nach Feinmahlung, ebenfalls die Restreaktivität ermittelt.

Bestimmung der Restreaktivität

In der Bestimmung der Restreaktivität der recycelten Proben konnte in Österreich eine neue Schnellanalyseverfahren, basierend auf einer Versuchsreihe mit einer Schwerelösung,

entwickelt werden. Hierbei wurde ein Probenaliquot von 1 g mit 10 ml Natriumpolywolframat umgesetzt. Die Hitzeentwicklung der angesetzten Probe korreliert mit der Restreaktivität. Je höher der Temperaturanstieg (D₀, siehe Tabelle 1), desto höher die Restreaktivität. Es wurden zudem Versuche durchgeführt, wie die Restreaktivität der Recyclingproben allgemein erhöht werden könnte. Dazu wurden sowohl die Recycling- als auch die Referenzproben für eine Stunde bei 600 °C getempert. Es konnte jedoch kein positiver Effekt durch die Temperaturbehandlung festgestellt werden, siehe Tabelle 1.

Untersuchungen an hergestellten Proben

Zur Herstellung der Zementmischungen wurde einerseits Betonfein-Recyclingmaterial aus den Recyclinganlagen und andererseits, als Referenz, gemahlenes Feinmaterial der hergestellten Zementmörtelproben verwendet. Hierbei wurden einem CEM I 52,5 R jeweils Anteile von 10, 20 und 35 Prozent beigegeben. Weiters wurden für die Versuche sowohl ein CEM I 52,5 R als auch ein im Labor hergestellter CEM II / B-LL (Anteil LL: 35 Prozent) ohne weitere Zugabe von Betonfein-Recyclingmaterial eingesetzt. Mit den gewonnenen Materialien (Feinanteile aus der Betonaufbereitung) wurden Zementmischungen hergestellt und diese gemäß dem nachstehenden Untersuchungsprogramm beurteilt.

Das Untersuchungsprogramm umfasste nachfolgend aufgelistete Nachweisverfahren:

- Bestimmung der Druckfestigkeit gemäß ÖNORM EN 196-1 [1]
- Bestimmung der Wärmeentwicklung nach Langavant (ÖNORM EN 196-6 [2])
- Bestimmung der Erstarrungszeit nach Vicat (ÖNORM EN 196-3 [3])
- Bestimmung des säurelöslichen Chlorids und Sulfats (ÖNORM EN 196-2 [4])
- Quecksilberdruckporosimetrie und Bestimmung des chemisch gebundenen Wassers
- Bestimmung des Blaine-Werts (ÖNORM EN 196-6 [2])

Exemplarisch sind in Abbildung 2 die Ergebnisse der Druckfestigkeitsbestimmungen nach ÖNORM EN 196-1 [1] dargestellt (Z1, Z2 und Z3: gemahlenes Feinmaterial der Zementmörtelproben; Z4, Z5 und Z6: Betonfein-Recyclingmaterial der Aufbereitungsanlagen). Dabei konnte festgestellt werden, dass Proben, welche mit Zementen mit einem niedrigeren Substitutionsgrad an Betonfein-Recyclingmaterial hergestellt wurden, höhere Mörteldruckfestigkeiten erzielen konnten.

| | D ₀ nicht getempert | D ₀ getempert |
|-----------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Feinmaterial (CEM II/B-LL) | 2.5 | 1.5 |
| Feinmaterial (CEM I 52,5 R) | 3.5 | 2.5 |
| Feinmaterial (CEM III/A) | 2.0 | 1.5 |
| Recyclingmaterial Nr. 1 | 1.0 | 0.3 |
| Recyclingmaterial Nr. 2 | 0.5 | 0.3 |
| Recyclingmaterial Nr. 3 | 1.5 | 0.0 |
| Recyclingmaterial Nr. 4 | 1.5 | 0.3 |

Tabelle 1: Vergleich der Restreaktivität von getemperten und nicht-getemperten Proben

| Beton | Zementgehalt (kg/m ³) | W/B | Luftgehalt (%) |
|-------|-----------------------------------|------|----------------|
| C-1 | 350 | 0,50 | - |
| C-2 | 340 | 0,45 | 5 ± 2 |

Tabelle 2: Untersuchte Betonzusammensetzungen

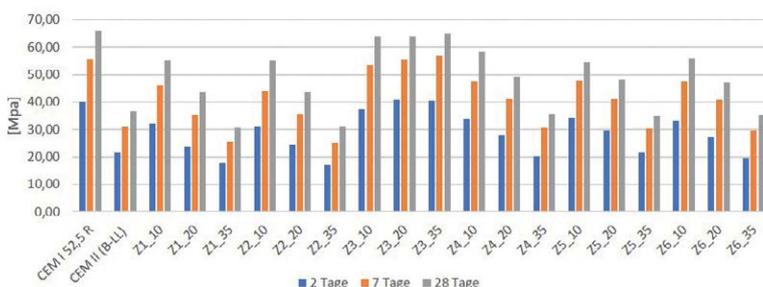


Abbildung 2: Übersicht der Druckfestigkeit der Mörtelproben nach 2, 7 bzw. 28 Tagen.

| | Rohdichte ₁₀ (kg/m ³) | Ausbreitmaß ₁₀ (cm) | Luftgehalt ₁₀ (%) | Temperatur ₁₀ (°C) | Fließmittel (m% Zement) |
|-----------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| MV1 (CEM I 52,5 R); Ref. | 2465 | 52 | 2,3 | 24,0 | 0,24 |
| MV2 (CEM II/B-LL); Ref. | 2448 | 53 | 2,3 | 20,7 | 0,22 |
| MV3 (Probe Z4; 20 % Anteil) | 2442 | 51 | 2,6 | 23,6 | 0,22 |
| MV4 (Probe Z4; 35 % Anteil) | 2424 | 51 | 2,8 | 22,6 | 0,25 |
| MV5 (Probe Z5; 20 % Anteil) | 2459 | 52 | 2,1 | 21,4 | 0,15 |
| MV6 (Probe Z5; 35 % Anteil) | 2448 | 52 | 2,2 | 20,5 | 0,12 |
| MV7 (Probe Z6; 20 % Anteil) | 2444 | 52 | 2,2 | 21,9 | 0,08 |
| MV8 (Probe Z6; 35 % Anteil) | 2444 | 51 | 2,1 | 20,0 | 0,06 |

Tabelle 3: Übersicht Frischbetonkennwerte, Betonrezeptur C-1 (MV = Mischungsverhältnis)

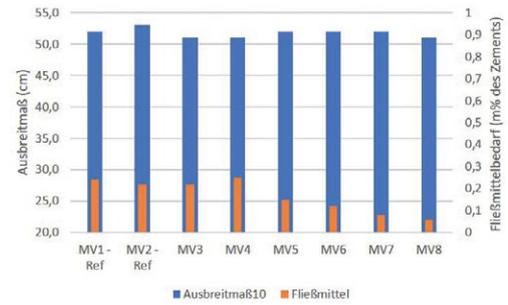


Abbildung 3: Ausbreitmaß und Fließmittelbedarf der Betonrezeptur C-1

| | Rohdichte ₁₀ (kg/m ³) | Ausbreitmaß ₁₀ (cm) | Luftgehalt ₁₀ (%) | Temperatur ₁₀ (°C) | Fließmittel (m% Zement) |
|------------------------------|---|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| MV9 (CEM I 52,5 R); Ref. | 2391 | 52 | 5,5 | 24,4 | 0,40 |
| MV10 (CEM II/B-LL); Ref. | 2378 | 53 | 4,9 | 23,8 | 0,29 |
| MV11 (Probe Z4; 20 % Anteil) | 2426 | 52 | 4,7 | 22,7 | 0,76 |
| MV12 (Probe Z4; 35 % Anteil) | 2419 | 53 | 4,7 | 21,0 | 0,65 |
| MV13 (Probe Z5; 20 % Anteil) | 2435 | 53 | 4,4 | 21,0 | 0,56 |
| MV14 (Probe Z5; 35 % Anteil) | 2384 | 52 | 6,0 | 23,6 | 0,64 |
| MV15 (Probe Z6; 20 % Anteil) | 2401 | 53 | 5,5 | 22,3 | 0,74 |
| MV16 (Probe Z6; 35 % Anteil) | 2386 | 52 | 5,5 | 22,6 | 0,71 |

Tabelle 4: Übersicht Frischbetonkennwerte, Betonrezeptur C-2 (MV = Mischungsverhältnis)

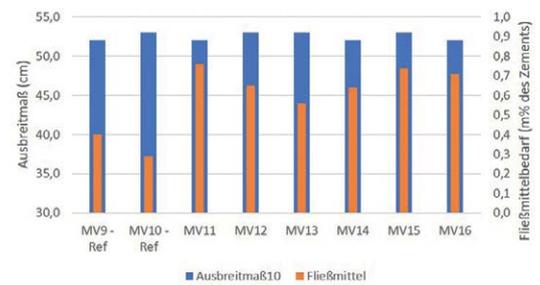


Abbildung 4: Ausbreitmaß und Fließmittelbedarf der Betonrezeptur C-2

Betonuntersuchungen

Für die Untersuchungen am Beton wurden zwei verschiedene Rezepturen unter Verwendung des Betonfein-Recyclingmaterial der Aufbereitungsanlagen verwendet. Die jeweiligen Zusammensetzungen sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

An den angeführten Betonzusammensetzungen wurden nachstehende Nachweise durchgeführt:

- Bestimmung der Frischbetonkennwerte (ONR 23303 [5])
- Bestimmung der Druckfestigkeiten und des E-Moduls (ONR 23303 [5])
- Bestimmung der Wassereindringtiefe unter Druck (ONR 23303 [5])
- Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands (ÖNORM EN 12390-12 [6])
- Bestimmung der Frostbeständigkeit (ONR 23303 [5])
- Bestimmung des Chloridwiderstands (ÖNORM EN 12390-11 [7])
- Auslaugversuche an Betonprobekörpern (CEN/TS 16637-2 [8])

Mit den durchgeführten Untersuchungen konnte der Einfluss der verschiedenen Ausgangsstoffe (Betonfeinanteile) bzw. der damit hergestellten Betonrezepturen gut nachgewiesen werden. Beispielsweise zeigten sich deutliche Unterschiede im Fließmittelbedarf zwischen den beiden Betonrezepturen, siehe Tabellen 3 und 4 sowie Abbildung 3

und 4. Bei Rezeptur C-1 benötigten die Recyclingproben im Allgemeinen weniger Fließmittel als die Referenzzemente (Bedarf zwischen 0,06 und 0,24 Masseprozent Zement), bei Rezeptur C-2 kehrte sich der Trend um (Bedarf zwischen 0,29 und 0,74 Masseprozent Zement).

Die Betone, hergestellt mit Zementbestandteil „Betonfeinanteile“, weisen vergleichbare Werte wie der Referenzbeton hergestellt mit CEM II/B-LL auf. Ein höherer Substitutionsgrad an beigegebenen Betonfeinanteilen resultiert in etwas geringeren Druckfestigkeiten bzw. niedrigeren Elastizitätsmoduli.

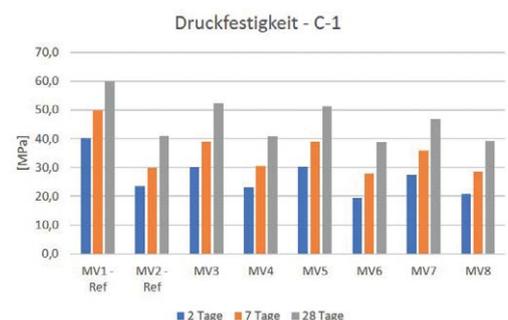


Abbildung 5: Übersicht der Druckfestigkeit der Betonproben der Betonrezeptur C-1 nach 2, 7 bzw. 28 Tagen

| C-1 | Druckfestigkeit (MPa) | | | stat. E-Modul (MPa) |
|-----------------------------|-----------------------|------|------|---------------------|
| | 2d | 7d | 28d | 28d |
| MV1 (CEM I 52,5 R); Ref. | 40,2 | 50,0 | 59,9 | 33000 |
| MV2 (CEM II/B-LL); Ref. | 23,6 | 29,9 | 41,0 | 27500 |
| MV3 (Probe Z4; 20 % Anteil) | 30,1 | 39,1 | 52,3 | 30000 |
| MV4 (Probe Z4; 35 % Anteil) | 23,1 | 30,5 | 40,8 | 28500 |
| MV5 (Probe Z5; 20 % Anteil) | 30,3 | 39,0 | 51,3 | 31000 |
| MV6 (Probe Z5; 35 % Anteil) | 19,4 | 28,0 | 38,8 | 28500 |
| MV7 (Probe Z6; 20 % Anteil) | 27,4 | 35,8 | 46,8 | 29000 |
| MV8 (Probe Z6; 35 % Anteil) | 20,9 | 28,7 | 39,3 | 27000 |

Tabelle 5: Übersicht der ermittelten Druckfestigkeiten und E-Moduli, Betonrezeptur C-1 (MV = Mischungsverhältnis)

| C-2 | Druckfestigkeit (MPa) | | |
|------------------------------|-----------------------|------|------|
| | 2d | 7d | 28d |
| MV9 (CEM I 52,5 R); Ref. | 37,8 | 42,9 | 57,0 |
| MV10 (CEM II/B-LL); Ref. | 21,6 | 27,2 | 36,5 |
| MV11 (Probe Z4; 20 % Anteil) | 37,1 | 45,2 | 57,7 |
| MV12 (Probe Z4; 35 % Anteil) | 27,9 | 35,4 | 46,6 |
| MV13 (Probe Z5; 20 % Anteil) | 33,3 | 40,0 | 51,3 |
| MV14 (Probe Z5; 35 % Anteil) | 23,3 | 29,1 | 39,5 |
| MV15 (Probe Z6; 20 % Anteil) | 34,1 | 38,4 | 52,6 |
| MV16 (Probe Z6; 35 % Anteil) | 24,9 | 31,4 | 41,3 |

Tabelle 6: Übersicht der ermittelten Druckfestigkeiten, Betonrezeptur C-2 (MV = Mischungsverhältnis)

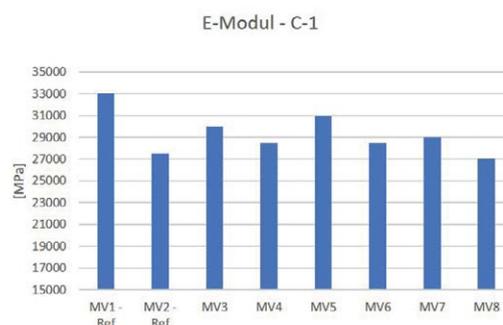


Abbildung 6: Übersicht des E-Moduls der Betonproben der Betonrezeptur C-1

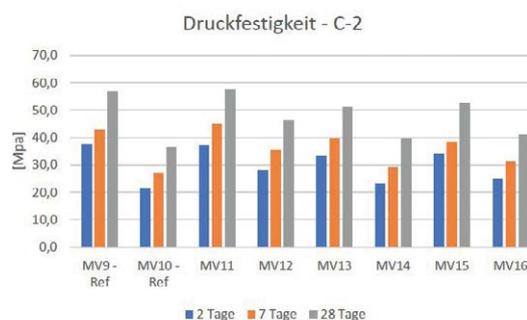


Abbildung 7: Übersicht der Druckfestigkeit der Betonproben der Betonrezeptur C-2 nach 2, 7 bzw. 28 Tagen

Ähnlich zu den Mörtelprüfungen, erzielen auch hier Proben, welche mit Zementen mit einem niedrigeren Substitutionsgrad hergestellt wurden, höhere Druckfestigkeiten. Die Festigkeiten des Referenzbetons mit CEM II/B-LL werden, bis auf die Zusammensetzungen MV6 und MV8, zu jedem Beurteilungsalter erreicht bzw. übertroffen. Zudem wurde im gegenständlichen Forschungsprojekt die Beständigkeit der Betonproben und ihr Umwelteinfluss untersucht. Der Karbonatisierungswiderstand wurde nach ÖNORM EN 12390-12 [6] bestimmt. Hierbei weisen die Betonzusammensetzungen unter Verwendung von Zement mit Betonfeinanteil höhere Werte als der mit CEM I 52,5 R hergestellte Referenzbeton und tendenziell etwas geringere Werte im Vergleich zu CEM II/B-LL auf. Die Beigabe von Recyclingfeinanteilen in der Zementherstellung hatte bei den untersuchten Betonzusammensetzungen teilweise ebenfalls einen positiven Effekt auf den Chloridwiderstand. Der Diffusionskoeffizient, bestimmt nach ÖNORM EN

12390-11 [7], war bei diesen Betonzusammensetzungen immer geringer als bei der Referenzrezeptur mit Verwendung von CEM II/B-LL. Der ökologische Aspekt wurde anhand von Auslaugungsmessungen von Schwermetallen nach CEN/TS 16637-2 [8] analysiert. Optimierungsbedarf besteht jedoch bei der Frost-Taumittelbeständigkeit. Die Frost-Tau-Beständigkeit war nach ONR 23303 [5] für die Klasse XF3 (Betonrezeptur C-1) überwiegend gegeben, für die Klasse XF4 (Frost-Taumittel-Beständigkeit, Betonrezeptur C-2) konnten die Grenzwerte nicht durchgehend eingehalten werden.

Erfolgreiches Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Eignung von Recyclingfeinanteilen als Zuschlagstoff in der Zementherstellung gegeben ist. Sowohl die Verarbeitbarkeit des Frischbetons, aber auch mechanische Parameter wie Druckfestigkeit zeigen gleichwertige Ergebnisse wie der Referenzzement CEM II/B-LL. Einzelne Parameter wie der Karbonatisierungswiderstand und der Chloridwiderstand zeigen bei den gegenständlichen Untersuchungen geringfügig verbesserte Eigenschaften im Vergleich zum Referenzzement CEM II/B-LL. Mit dem gegenständlichen Forschungsprojekt konnte einerseits die Eignung von Zementen unter Verwendung des Zuschlagstoffs „Betonfeinanteil“ grundlegend nachgewiesen werden und andererseits der Beitrag zur Ressourcenschonung bzw. Ressourcennutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft dargestellt werden.

Literatur

- [1] ÖNORM EN 196-1: Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit, 15. Oktober 2016.
- [2] ÖNORM EN 196-6: Prüfverfahren für Zement – Teil 6: Bestimmung der Mahlfineheit, 15. Februar 2019.
- [3] ÖNORM EN 196-3: Prüfverfahren für Zement – Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, 1. Jänner 2017.
- [4] ÖNORM EN 196-2: Prüfverfahren für Zement – Teil 2: Chemische Analyse von Zement, 1. Oktober 2020.
- [5] ONR 23303: Prüfverfahren Beton (PVB) – Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe, 1. September 2010.
- [6] ÖNORM EN 12390-12: Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren, 1. März 2020.
- [7] ÖNORM EN 12390-11: Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion, 1. Dezember 2015.
- [8] ONR CEN/TS 16637-2: Bauprodukte – Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen – Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung (CEN/TS 16637-2:2014), 1. Oktober 2014.