

ÖKOLOGISCH UND TECHNISCH VERBESSERTE BETONE DURCH DEN EINSATZ ALTERNATIVER ZUSATZSTOFFE

THIENEL, K.-CH., BEUNTNER, N., UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR, MÜNCHEN, DEUTSCHLAND
SCHRENK, J., ROTEC GMBH & CO. KG, EISENBAHNSTR. 12, 56218 MÜLHEIM-KÄRLICH, DEUTSCHLAND

Beton ist weltweit der wichtigste Baustoff. Er setzt sich aus ca. 70 Vol.-% Gesteinskörnung, 20 Vol.-% Bindemittel, 10 Vol.-% Wasser und Zusatzmitteln zusammen. Die wichtigste Bindemittelkomponente ist nach wie vor Zement. Dieser bestimmt entscheidend die Energiebilanz und die CO₂-Emission des Baustoffs Beton [1].

Ein Ansatz zur ökologischen und ökonomischen Optimierung von Beton ist die teilweise Substitution von Zement durch puzzolanisch reaktive oder latent hydraulische Betonzusatzstoffe vom Typ II wie Steinkohlenflugasche, Hüttensand oder Silicastaub.

ALTERNATIVE BETONZUSATZSTOFFE

Stoffliche Alternativen für den Einsatz als Bestandteil des Bindemittels in Beton müssen sich durch mehrere Eigenschaften auszeichnen. Sie müssen in ausreichender Menge zur Verfügung stehen, Vorteile für die Reduktion des CO₂-Ausstoßes bieten, puzzolanisch reaktiv sein, die Eigenschaften des Betons wie Festigkeit und Dauerhaftigkeit nicht beeinträchtigen und sollten darüber hinaus natürlich noch ökonomisch möglichst attraktiv sein.

CALCINIERTER TON

Calcinierte Tone sind global verfügbar. Sie weisen wegen des fehlenden oder nur geringen Kalkgehalts beim Brennen eine niedrige CO₂-Emission auf und sind daher nachhaltig und umweltfreundlich. Daher stellen sie eine attraktive Alternative zu herkömmlichen Zusatzstoffen dar [2]. Bisherige Arbeiten [2-4] konzentrierten sich auf die Wirkungsweise von Tonen, die vorrangig aus dem Schichtsilikat Kaolinit oder Illit oder Montmorillonit bestehen.

METAKAOLIN/GLAS-GEMISCH

Metakaolin entsteht üblicherweise durch das gezielte Calcinieren von Kaolin. Als Nebenprodukt fällt ein glashaltiges Metakaolin bei der Herstellung eines Blähglases an und wird separat unter dem Namen „Metapor“ vermarktet.

BIMSMEHL

Bims ist ein vulkanischer Glasschaum, der vornehmlich als leichte Gesteinskörnung eingesetzt wird. Im Zuge einer mehrstufigen Aufbereitung fallen auch sehr feine Stäube mit Korngrößen von maximal 90 µm an. Die Abbildung 1 zeigt das ternäre Phasendiagramm des Bimsmehlens und die Nähe seiner chemischen Zusammensetzung zu anderen puzzolanisch wirksamen Stoffen, die Abbildung 2 eine REM-Aufnahme bei 2000facher Vergrößerung. Es besitzt keine röntgenografisch nachweisbaren kristallinen Anteile, seine Struktur kann als glasartig amorph beschrieben werden.

Das Produkt wird von der Fa. Rotec GmbH & Co. KG unter dem Handelsnamen „Rotobase“ vertrieben. Derart feines Bimsmehl weist puzzolanische Eigenschaften auf [5-7]. Bims hat eine sehr vorteilhafte Ökobilanz, weil CO₂-Emissionen nur durch den Abbau, die Aufbereitung und den Transport verursacht werden [1]. Zudem existiert eine EPD (Environmental Product Declaration) des Produkts, in der alle relevanten ökologischen Kennwerte beschrieben werden.

ROTOBASE[®] im Dreistoffdiagramm

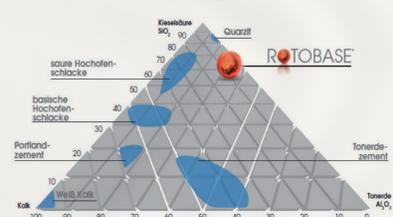


Abbildung 1: Ternäres Phasendiagramm des Bimsmehlens Rotobase

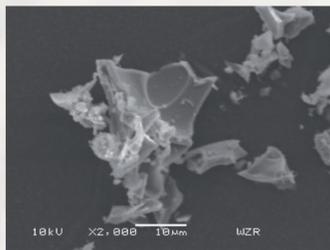


Abbildung 2: REM Aufnahme des Bimsmehlens Rotobase bei 2000facher Vergrößerung

GLASSCHLEIFSTAUB

Feine, glasig-amorphe Stäube entstehen beim Konfektionieren von Blähglas-Akustikplatten. Der anfallende Schleif- und Sägestaub ist gröber als die zuvor genannten Stoffe, weist allerdings ebenso wie andere feine Glasstäube prinzipiell puzzolanische Eigenschaften auf [8] und hat als Reststoff eine günstige Ökobilanz.

CHARAKTERISIERUNG DER UNTERSUCHTEN ALTERNATIVEN BETONZUSATZSTOFFE

Chemischer Bestandteil	Zement CEM I 42,5 R	Calcierter Ton	Metakaolin mit Glasanteil	Glas-Schleifstaub	Bimsmehl
SiO ₂	20,4	54,0	64,0	71,0	56,0
Al ₂ O ₃	5,0	22,0	19,0	2,0	22,0
Fe ₂ O ₃	3,1	10,0	0,9	0,5	3,0
CaO	60,8	4,0	3,1	8,0	2,0
MgO	1,8	2,0	0,8	2,0	1,0
SO ₂	3,2	1,0	0,1	0,1	0,0
Na ₂ O	0,6	0,4	8,8	13,0	12,0
K ₂ O	0,6	3,0	2,1	1,0	12,0
TiO ₂	0,1	1,0	1,0	0,1	0,5

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der alternativen Betonzusatzstoffe im Vergleich zu Zement

Kennwert	Zement CEM I 42,5 R	Calcierter Ton	Metakaolin mit Glasanteil	Glas-Schleifstaub	Bimsmehl
Wasseranspruch [M%]	23	38	61		28
Reindichte [g/cm ³]	3,14	2,63	2,29	2,42	2,43
BET-Oberfläche [m ² /g]		5,5	4,1	0,4	7,6
d50 [µm]		13,3	12,3	45,6	12,0

Tabelle 2: Physikalische Kennwerte

FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN

Zur Verbesserung der Ökobilanz werden möglichst hohe Austauschraten von Zement gegen alternative Betonzusatzstoffe angestrebt. Die untersuchten alternativen Betonzusatzstoffe haben zum Teil einen deutlich höheren Wasseranspruch als die verschiedenen Zemente. Die Auswirkungen auf die rheologischen Eigenschaften werden für die baupraktisch relevante Konsistenz in Abbildung 3 verdeutlicht.

Mit drei unterschiedlichen Zementen wurde eine annähernd lineare Abnahme der Ausgangskonsistenz mit steigendem Gehalt der alternativen Betonzusatzstoffe festgestellt (Abbildung 3), wobei der Rückgang der Konsistenz durch das Metakaolin/Glas-Gemisch ausgeprägter war. Das Verhalten der Bindemittelgemische aus Zement und alternativen Betonzusatzstoffen lässt sich demnach anhand des Wasseranspruchs gut prognostizieren.

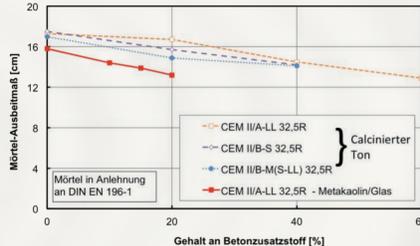


Abbildung 3: Auswirkung des Gehalts an alternativen Betonzusatzstoffen auf die Konsistenz

Ein hoher Wasseranspruch der alternativen Betonzusatzstoffe verbessert unter anderem deutlich die Sedimentationsstabilität. Als Kriterium wird hier die Wasserabsonderung des Frischbetons herangezogen, die auch als „Bluten“ bezeichnet wird.

FESTIGKEITSENTWICKLUNG

Der Beitrag puzzolanischer Stoffe zur Entwicklung der Festigkeit beruht auf physikalischen und chemischen Effekten. Der physikalische Effekt basiert auf einer Füllwirkung, wie sie auch von inerten Betonzusatzstoffen (Typ I) geboten wird. Die chemische Wirkung geht primär zurück auf die reaktionsfähige Kieselsäure (SiO₂), die bei Wasserzugabe mit dem Calciumhydroxyd, das bei der Hydratation der Zemente freigesetzt wird, zu Calcium-Silikat-Hydraten (CSH) reagiert. Die zudem aus den puzzolanischen Stoffen freigesetzten Aluminiumionen bilden zusammen mit den Siliciumionen und dem Calciumhydroxyd Calcium-Aluminat-Silikat-Hydrate (CASH).

Für die verschiedenen alternativen Betonzusatzstoffe wurde die Festigkeitsentwicklung bis zu einem Alter von 90 Tagen untersucht. Als Kriterium zum Unterscheiden zwischen physikalischem und chemischem Festigkeitsbeitrag kann der Aktivitätsindex AI herangezogen werden. Er vergleicht für das jeweilige Prüfmörtel die Druckfestigkeit eines Mörtels, der mit einer Bindemittelkombination aus Zement und alternativem Betonzusatzstoff hergestellt wurde mit der eines gleichartigen Mörtels, der ausschließlich mit dem betreffenden Zement hergestellt wurde. Da inerte Betonzusatzstoffe den Zement quasi verdünnen, ist ein Aktivitätsindex in der Größe des Austauschverhältnisses zu erwarten, während die puzzolanische Reaktion zu höheren Aktivitätsindices führt. Hierbei zeichnen sich insbesondere die Bindemittelgemische mit dem Metakaolin/Glas-Gemisch, dem calcinierten Ton und dem Bimsmehl Rotobase durch eine höhere Leistungsfähigkeit als der Referenzzement aus.

DAUERHAFTIGKEIT

Der Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden in das Betongefüge ist eine wichtige Eigenschaft für die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen. Abgesehen vom Glasschleifstaub können die Chloridmigrationskoeffizienten durch den partiellen Austausch des Zements gegen alternative Betonzusatzstoffe drastisch gesenkt werden und so der Korrosionsschutz für die eingebettete Bewehrung deutlich verbessert werden.

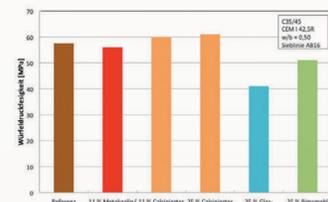


Abbildung 6: Wirkung alternativer Betonzusatzstoffe auf die Druckfestigkeit von Beton nach 28 Tagen

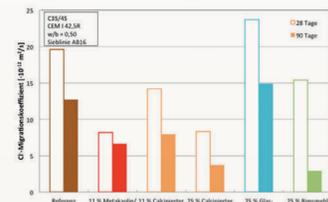


Abbildung 7: Chloridmigrationskoeffizienten von Beton mit und ohne alternative Betonzusatzstoffe im Alter von 28 und 90 Tagen

ÖKOLOGISCHE VORTEILE

Die ökologischen Vorteile der alternativen Betonzusatzstoffe gegenüber Zement sollen am Beispiel des Bimsmehlens Rotobase aufgezeigt werden. Die Tabelle 4 zeigt den Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie, die zur Herstellung von Portlandzement (CEM I), den Compositzementen CEM II/B-M und CEM III/A und des Bimsmehlens Rotobase erforderlich sind.

Parameter	Einheit	ROTOBASE	
		A1-A3	
Erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	74,6	
Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0,00E+00	
Total erneuerbare Primärenergie	[MJ]	74,6	
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger	[MJ]	786	
Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	[MJ]	0,00E+00	
Total nicht erneuerbare Primärenergie	[MJ]	786	
Einsatz von Sekundärstoffen	[kg]	0,00E+00	
Erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0,01	
Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe	[MJ]	0,02	
Einsatz von Süßwasserressourcen	[m ³]	1,5	

Tabelle 3: Umwelttechnische Kenndaten

Je niedriger der Klinkeranteil des jeweiligen Zements ist, desto niedriger ist naturgemäß auch der Bedarf an nicht erneuerbarer Primärenergie, die zur Herstellung aufgewandt werden muss. Trotzdem liegt das Bimsmehl Rotobase noch weit darunter, auch die anderen relevanten umwelttechnischen Kenndaten sind außerordentlich günstig.

Die mögliche einzusparende Quantität an nicht erneuerbarer Primärenergie und CO₂-Emission je m³ Beton hängt ganz entscheidend von der Leistungsfähigkeit der Betonzusatzstoffe und damit ihrer Anrechnung auf den Zementgehalt ab. Diese Anrechenbarkeit wird für puzzolanische Betonzusatzstoffe (Typ II) über den erreichbaren k-Wert ausgedrückt. Für die gängigen Betonzusatzstoffe von Typ II liegen die k-Werte bei 0,4 (Steinkohlenflugasche), 0,6 (Hüttensand) und 1,0 (Silicastaub).

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass mit dem Bimsmehl Rotobase Festigkeiten zu erzielen sind, die nur ca. 10% unter denen einer reinen Zementmischung liegen. Geht man also davon aus, dass man bis zu 50 kg Zement in einer gängigen Betonrezeptur ersetzen kann, ohne die Eignung für die jeweiligen Expositionsclassen zu verlieren, ergibt sich eine Einsparung an nicht erneuerbarer Primärenergie pro m³ Beton gegenüber den einzelnen Zementarten, die die Tabelle 4 zeigt.

	Nicht-erneuerbare Primärenergie (Mittelwert) (MJ/t)	Nicht-erneuerbare Primärenergie 50kg Einsatzmenge	Einsparungspotential (MJ)
CEM I	4355	217,75	178,45
CEM II / B-M	3220	161	121,7
CEM III / A	2156	107,8	68,5
Rotobase	786	39,3	

Tabelle 4: Einsparungspotential

FAZIT

Die untersuchten alternativen Betonzusatzstoffe bieten die Möglichkeit, ökologisch und technisch verbesserte Betone herzustellen. Die vorliegenden und zukünftige Untersuchungen zielen darauf ab, diese Stoffe im Rahmen der durch den Produktionsprozess vorgegebenen Rahmenbedingungen weiter zu optimieren und die Einsatzgebiete zu identifizieren, in denen die alternativen Betonzusatzstoffe ihre Eigenschaften optimal zu Geltung bringen können. Die rückläufigen Mengen der Steinkohlenflugasche werden die vorgestellten alternativen Betonzusatzstoffe nur partiell ersetzen können. Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung ist es daher auch zukünftig geboten, weiter im Bereich der innovativen Alternativen als Bestandteil des Bindemittels im Beton zu forschen.

Literaturverzeichnis:

- Eyerer P.; Reinhardt H-W. Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden. Basel: Birkhäuser Verlag; 2000. 233 p.
- Schulze E., Ricker J. Pozzolanic Activity of Calcined Clays. In: Holland TC, Gupta PR, Malhotra VM, editors. Proceedings of the 12th International Conference on Recent Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues; 30.10.-01.11. 2012 Prag, Chelsea, Michigan; Sheridan Books; 2012. p. 277-88.
- Fernandez R., Martirena F., Scrivener K.L. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. Cement Concrete Res. 2011;41(1):113-22.
- He C, Osbaeck B, Makovsky E. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects. Cement Concrete Res. 1995;25(8):1691-702.
- Trümer A., Ludwig H.-M. Calcined clays as supplementary cementitious material. In: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, editor. Tagungsband zur 18 Internationalen Baustofftagung; 12.-15.09. 2012 Weimar. Weimar: Eigenverlag; 2012. p. 0627-34.
- Beuntner N. Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementären Systemen. Innovationen in Beton - Jahrestagung und 54. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton; 7./8. November 2013; Bochum: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 2013.
- Bagheri A., Saneei M.J., Zanganeh H., Alizadeh H. Comparing the performance of natural pozzolan (pumice) and fly ash on improving durability of high performance concretes containing ternary cement. In: Justnes H., Jacobsen S., editors. International Congress on Durability of Concrete (ICDC); 18-21 June 2012; Trondheim 2012. p. B5-4.
- Schwarz N., Neithalath N. Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration. Cement Concrete Res. 2008;38(4):429-36.