

## **Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Beton**

**J.-M. Obrecht<sup>1</sup>, R. Gälli<sup>1</sup>, P. Zimmermann<sup>1</sup> und F. Fallscheer<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> BMG Engineering AG, Ifangstrasse 11, 8952 Schlieren

<sup>2</sup> Institut für Verfahrens- und Kältetechnik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich

### **Zusammenfassung**

Ein Vergleich der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz zweier verschiedener Betonrezepturen mit gleichen bautechnischen Eigenschaften bei der Herstellung – einmal mit und einmal ohne Hochleistungs-Betonverflüssiger (HBV) – ergab für die Variante mit HBV die günstigeren Ergebnisse: sowohl der Energieaufwand als auch der CO<sub>2</sub>-Ausstoss lagen leicht tiefer. Grund dafür ist der geringere Zementanteil in der Rezeptur mit HBV. Betrachtet man jedoch den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes, dürften Kriterien wie beispielsweise die Dauerhaftigkeit und die Instandhaltung einen weit grösseren Einfluss auf die Gesamtökobilanz ausüben als die geringen Unterschiede im Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei der Herstellung unterschiedlicher Betonrezepturen.

Stichwörter: Ökobilanz, Betonverflüssiger, Energiebilanz, CO<sub>2</sub>-Bilanz

### ***Influence of superplasticizers on the energy- and CO<sub>2</sub>-balance of concrete***

#### ***Summary***

*The energy consumption and the CO<sub>2</sub> emissions during the production of two different concrete mixes with identical concrete properties were compared. The two concrete samples were prepared with and without the addition of a superplasticizer. Less energy was consumed and less CO<sub>2</sub> was emitted for the case of concrete production including a superplasticizer as compared to the case of concrete production without a superplasticizer. This is due to the fact, that when a superplasticizer is used, less cement is needed to produce concrete with the same properties as those of concrete without superplasticizers. However, the relatively small diffe-*

*rences in the energy consumption and in the CO<sub>2</sub> emissions become insignificant, if the entire life cycle of a building is considered. Effects like durability and the need for maintenance are expected to have a much higher influence on the life cycle assessment of concrete buildings.*

**Keywords:** *Life cycle assessment, superplasticizer, energy balance, CO<sub>2</sub>-Balanca*



**Jean-Marc Obrecht**, Ausbildung: dipl. Kulturingenieur ETH (Umweltgenieur) (1995). Seit 1995 Mitarbeiter bei der BMG Engineering AG im Bereich Boden und Altlasten. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit liegt zurzeit neben der Erstellung von Stoff- und Energiebilanzen bei der Bodenkartierung und der bodenkundlichen Begleitung von Tiefbauprojekten.



**René Gälli**, Ausbildung: dipl. Chemiker HTL Winterthur (1978); dipl. Naturwissenschaftler ETH Zürich (1981), Dr. Sc. nat. ETH Zürich (1985). 1985-1988 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Mikrobiologischen Institut der ETH Zürich und am Department of Civil Engineering der Stanford University (USA). Seit 1989 Leiter der Umweltlabors der BMG Engineering AG. Seine Haupttätigkeitsgebiete sind die ökologische Beurteilung von Produkten sowie die chemische Risikoberwertung von mit Schadstoffen belasteten Böden.



**Peter Zimmermann**, Ausbildung: dipl. Kulturingenieur ETH (Umweltgenieur) (1995). 1995-1996 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Energietechnik. Seit 1997 Mitarbeiter bei der BMG Engineering AG im Bereich betrieblicher Umweltschutz. Seine Haupttätigkeitsgebiete sind die Erstellung von Stoff-, Energie- und Ökobilanzen, von ökologischen Produktbeurteilungen sowie die ganzheitliche Bilanzierung von Systemen.



**Frieder Fallscheer**, Ausbildung: dipl. chem. Ing. ETH (1992); 1993-1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Systems Engineering Group des Laboratoriums für technische Chemie der ETH. 1995-1996 Doktorand am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik der ETH. Seit 1997 Oberassistent am Institut für Verfahrens- und Kältetechnik. Seine Haupttätigkeitsgebiete sind die Erstellung von Ökobilanzen der Schweizer Papierwirtschaft und die Koordination der Ökobilanzierungsmethodik mit dem europäischen Ausland.

## 1 Einleitung

Die Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln wurde in letzter Zeit verschiedentlich diskutiert. Einerseits wurde die Umweltverträglichkeit bei der Verwendung kritisch hinterfragt. Eine im Auftrag des Fachverbandes der Schweizerischen Hersteller von Betonzusatzmitteln (FSHBZ) durchgeführte Studie kam zum Schluss, dass die Umweltverträglichkeit bei korrekter Handhabung gegeben ist [3] [4]. Andererseits wurde vermutet, dass sich der Einsatz von Hochleistungsverflüssigern vor allem negativ auf den Energieverbrauch und den CO<sub>2</sub>-Ausstoss von Beton auswirkt.

Die am häufigsten eingesetzten Betonzusatzmittel sind die Hochleistungsverflüssiger (HBV). HBV sind organische Polymere, welche – in sehr kleinen Konzentrationen eingesetzt – die Dispergierung des Zementes verbessern und gleichzeitig den inneren Zusammenhalt des Betons erhöhen. Dadurch wird der Beton geschmeidiger und besser verarbeitbar. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei durchgeführter Wasserreduktion mittels eines HBV trotz reduziertem Zementgehalt mit vergleichbaren Betoneigenschaften gerechnet werden kann.

## 2 Methodik, Systemgrenzen und Annahmen

Da die Herstellung von HBV aus energetischer Sicht aufwendig ist, stellte sich die Frage, wie deren Einsatz die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz von Beton beeinflusst. Weitere Aspekte wie Emissionen von NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> wurden nicht betrachtet, da deren Anteil bei der Verwendung von HBV vergleichsweise gering ist. Dementsprechend handelt es sich bei der vorliegenden Arbeit nicht um eine vollständige Ökobilanz.

Entsprechend dem Grundsatz der Ökobilanzierung, gleichwertige Produkte miteinander zu vergleichen (gleiche funktionale Einheit), wurden zwei Betone A und B mit denselben Eigenschaften bezüglich Verarbeitbarkeit und Festigkeit einander gegenübergestellt. Beton A enthält HBV, während Beton B ohne HBV hergestellt wird. Die genauen Rezepturen sind aus Tabelle 1 ersichtlich. Um tatsächlich gleiche Eigenschaften zu erhalten, wurde beim Beton A der Zementgehalt leicht reduziert (ca. 14 %).

Für den Vergleich der beiden betrachteten Betone wurden folgende Prozesse berücksichtigt (Abbildung 1):

- Bereitstellung der Energie
- Gewinnung und Aufbereitung der Rohstoffe Kalkstein, Mergel, Kies und Sand sowie der petrochemischen Grundstoffe

Tab. 1: Dosierung der Betoninhaltsstoffe und einige Eigenschaften der beiden Betone - Variante A und B. Variante A enthält, bezogen auf den Zementgehalt, 1 % einer 20-prozentigen, wässrigen Lösung eines modernen HBV (schriftliche Mitteilung FSHBZ)

Beton	Variante A: Beton mit HBV			Variante B: Beton ohne HBV		
Zementgehalt CEM I 42.5	300 kg/m <sup>3</sup>			350 kg/m <sup>3</sup>		
Wasser/Zement- Wert SIA 162/1 Nr.19	0.47			0.49		
Betonzusatzmittel SIA 162 Anhang A1	1.0% HBV			keine		
Frischbetonkon- sistenz (Ausbreitmass nach DIN 1048)	44 cm			46 cm		
Frischbetonroh- dichte (am fertig verdichteten Beton)	2439 kg/m <sup>3</sup>			2413 kg/m <sup>3</sup>		
Würfeldruck- festigkeiten (15/15/15 cm in N/mm <sup>2</sup> )						
1 Tag	27 N/mm <sup>2</sup>			25 N/mm <sup>2</sup>		
7 Tage	43 N/mm <sup>2</sup>			42 N/mm <sup>2</sup>		
28 Tage	49 N/mm <sup>2</sup>			47 N/mm <sup>2</sup>		
	Volumen- anteil [l/m <sup>3</sup> ]	Massen- anteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Massen- anteil [%]	Volumen- anteil [l/m <sup>3</sup> ]	Massen- anteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Massen- anteil [%]
<b>Zement</b>	95.2	300	12.4	111.1	350	14.6
<b>Betonkies</b>	746.3	1978	81.6	706.9	1873	78.2
<b>HBV (Feststoff)</b>	2.5	3	0.025	0.	0	0
<b>Wasser</b>	141	141	5.9	172.0	172	7.2
<b>Luft</b>	15.0	0.019	0.	10.0	0.013	0.
<b>Total</b>	1000.	2422	100.	1000.	2395	100.

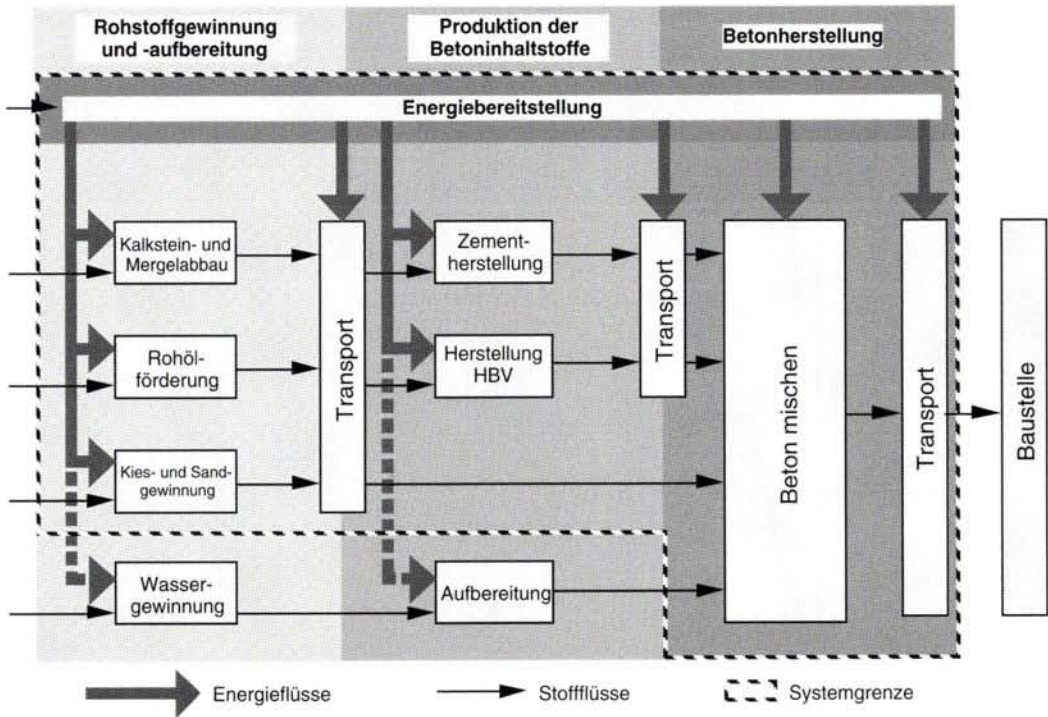


Abb. 1: System Betonherstellung

- Herstellung der Betoninhaltsstoffe (inkl. Betonzusatzmittel)
- Mischen des Betons
- Transport der Zwischen- und Endprodukte bis zur Baustelle

Hingegen wurden die Gewinnung und Aufbereitung des Wassers sowie der eigentliche Bauvorgang nicht berücksichtigt.

Sowohl die Energie- als auch die  $\text{CO}_2$ -Daten enthalten neben der Prozessenergie bei der Herstellung der Produkte und der Transportenergie auch die Materialenergie (Feedstockenergie), welche v. a. beim HBV (einer organischen Verbindung) ins Gewicht fällt. Diese Materialenergie wurde mit eingerechnet, da eine spätere Verbrennung und ein damit verbundener Energiegewinn wegen der Vermischung mit dem nicht brennbaren Beton nicht in Frage kommt.

Die genauen Rezepturen sowie die Frisch- und Festbetondaten der verglichenen Betone sind in Tabelle 1 wiedergegeben (schriftliche Mitteilung FSHBZ).

Für die Bilanzierung der Variante A wurde ein moderner HBV auf der Basis eines Vinylcopolymers gewählt. Für diese Wahl sprechen zwei Gründe:



- Der betreffende HBV entspricht dem Stand der Technik;
- Für das gewählte Produkt stehen eine Vielzahl von Daten für verschiedene Betonrezepturen zur Verfügung.

Da für den betrachteten HBV noch keine Produktionsdaten verfügbar sind, wurden die Daten von Vinylacetat verwendet [3].

Für die Berechnung der Transportenergie wurde der Extremfall angenommen, nämlich dass es sich bei der Variante A (mit HBV) um Transportbeton, bei der Variante B um Ortsbeton handle. In Tat und Wahrheit ist heute der weitaus überwiegende Teil der gesamten Betonproduktion Transportbeton. Die angenommenen Transportdistanzen sind in Abb. 2 dargestellt. Sie entsprechen den schweizerischen, eher kleinräumigen Verhältnissen.

Die Energie- und CO<sub>2</sub>-Daten für Zement, Sand und Kies sowie für den fertigen Beton (Mischen) und den Transport der Rohstoffe, Zwischen- und Endprodukte wurden aus [2] übernommen. Für Vinylacetat (HBV) wurden die Angaben aus [3] verwendet.

Die Berechnung der Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanzen erfolgte mit einem Tabellenkalkulationsprogramm.

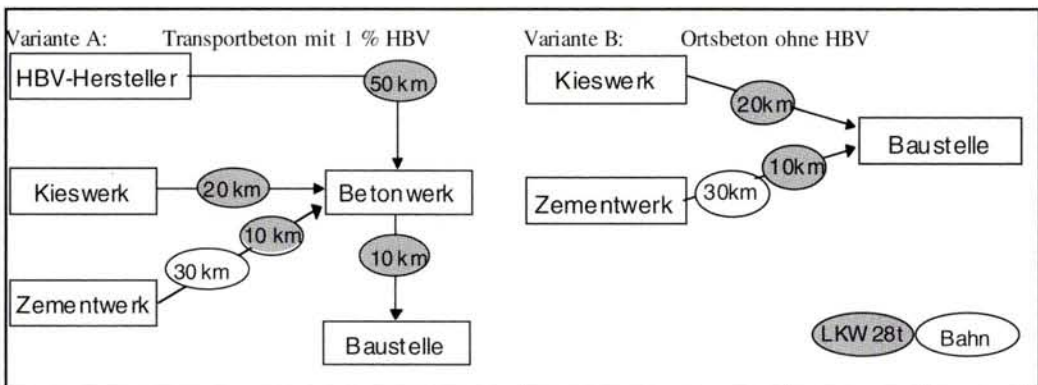


Abb. 2: Transportdistanzen für die Varianten A (Transportbeton mit HBV) und B (Ortsbeton ohne HBV)

### 3 Resultate

Für die Herstellung eines Kubikmeters Beton müssen in Variante A (mit HBV) 2201 MJ Energie aufgewendet werden, in Variante B sind es 2340 MJ (Abb. 3). Der Energieverbrauch liegt also bei Beton mit HBV um knapp 140 MJ/m<sup>3</sup> oder

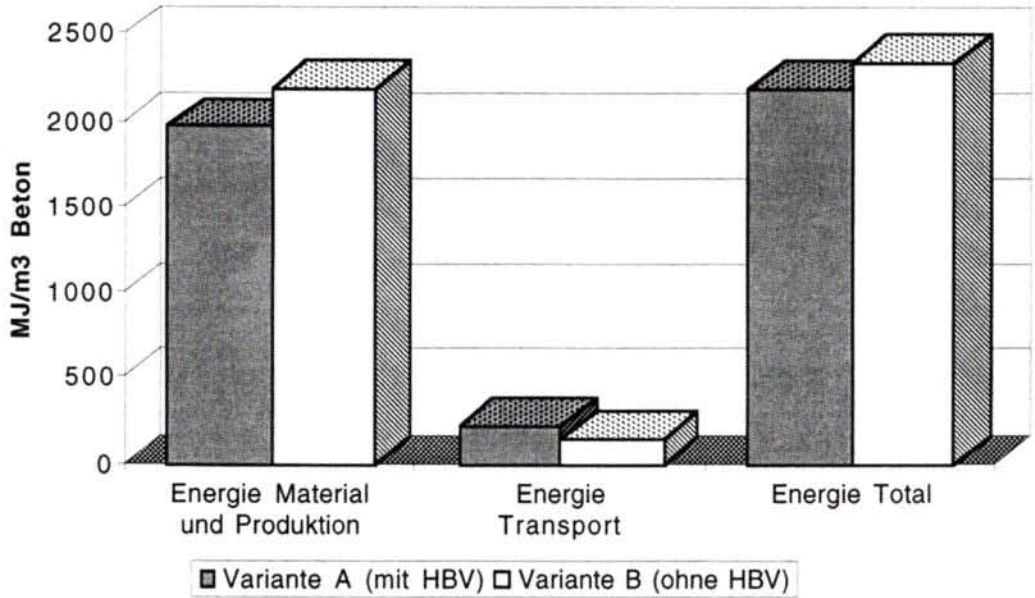


Abb. 3: Energiebilanz von Material, Produktion und Transport der Betone - Variante A und B

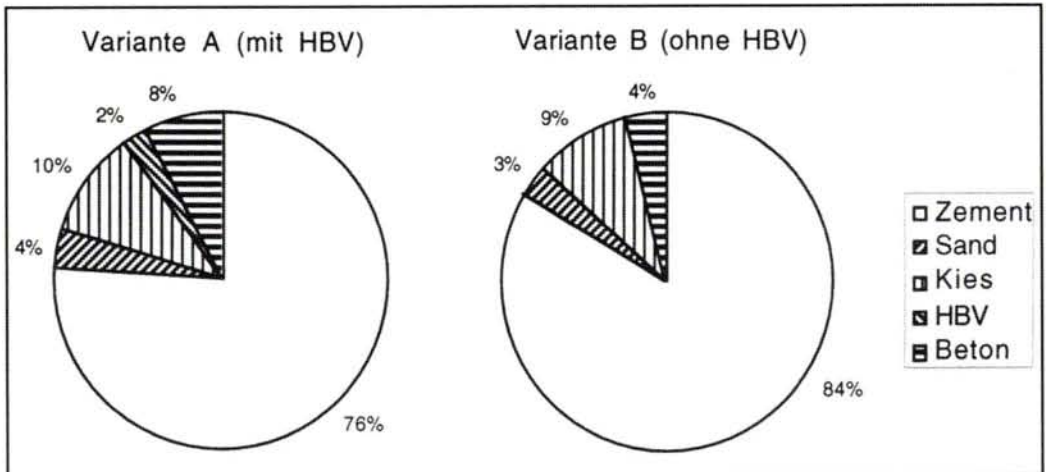


Abb. 4: Prozentuale Anteile der verschiedenen Betoninhaltsstoffe am Gesamtenergiebedarf für die Herstellung der Betone - Variante A und B

6 % tiefer, obwohl der HBV sowohl in der Erzeugung als auch im Hinblick auf die Materialenergie sehr energieintensiv ist und für die Variante A auch der Energiebedarf für den Transport deutlich höher ausfällt. Grund für diese günstigere Energiebilanz der Variante A ist der Minderverbrauch an Zement, welcher die anderen Einflüsse mehr als kompensiert.

Abbildung 4 gibt die Verteilung des gesamten Energieaufwandes auf die verschiedenen Betoninhaltsstoffe wieder. Dabei wird deutlich, dass der überwiegende Teil der benötigten Energie in die Zementherstellung fließt. Der Hochleistungs-Betonverflüssiger schlägt mit 2 % des Gesamtenergieaufwandes zu Buche.

Auch bei der CO<sub>2</sub>-Bilanz schneidet die Variante A (mit HBV) mit einem gesamthaften CO<sub>2</sub>-Ausstoss von 321 kg/m<sup>3</sup> Beton besser ab als die Variante B mit 360 kg/m<sup>3</sup>. Die Differenz beträgt 39 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> Beton oder 11 %. Auch hier wirkt sich also der Minderverbrauch an Zement stärker aus als der Einsatz des HBV (Abb. 5).

Abb. 6 gibt die Verteilung des gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstosses auf die verschiedenen Betoninhaltsstoffe wieder.

Wie beim Energieverbrauch entsteht in beiden Varianten der weitaus grösste Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Zementherstellung, während der HBV in der Variante A gerade mit 1 % zum gesamten CO<sub>2</sub>-Ausstoss beiträgt.

Mit den vorhandenen Daten wurden noch weitere denkbare Szenarien durchgerechnet, indem die Annahmen bezüglich Dosierungen und Transportdistanzen variiert wurden. Nachfolgend einige Resultate. Es sind jeweils die Abweichungen gegenüber der Variante B (Ortsbeton ohne HBV) angegeben:

- Variante A (mit HBV), jedoch als Ortsbeton: dieser Fall trifft auf zahlreiche Grossbaustellen zu (Energie: -9.2 %, CO<sub>2</sub>: -12.2 %);
- Variante A, jedoch mit geringerer Zementeinsparung bei höherer HBV-Dosierung: dieser Fall entspricht dem Einsatz älterer HBV (Energie: +2.0 %, CO<sub>2</sub>: -3.6 %);
- Variante A, jedoch ohne Zementeinsparung: dabei handelt es sich um einen hochwertigen Qualitätsbeton für Spezialanwendungen; hier kann deshalb die Frage nach dem Energieverbrauch nicht unabhängig von



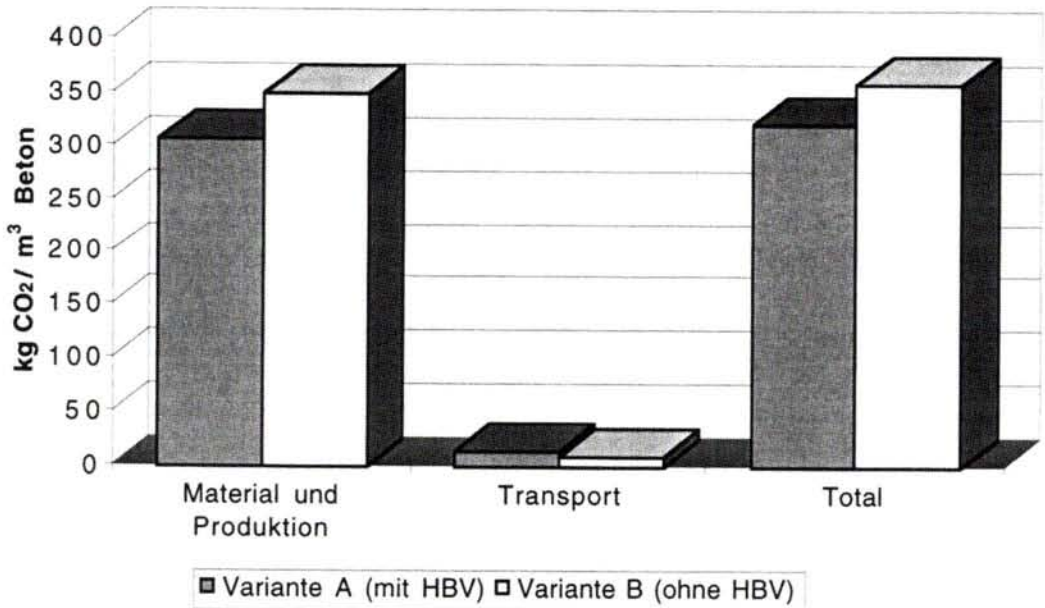


Abb. 5: CO<sub>2</sub>-Bilanz von Material, Produktion und Transport der Betone Variante A und B

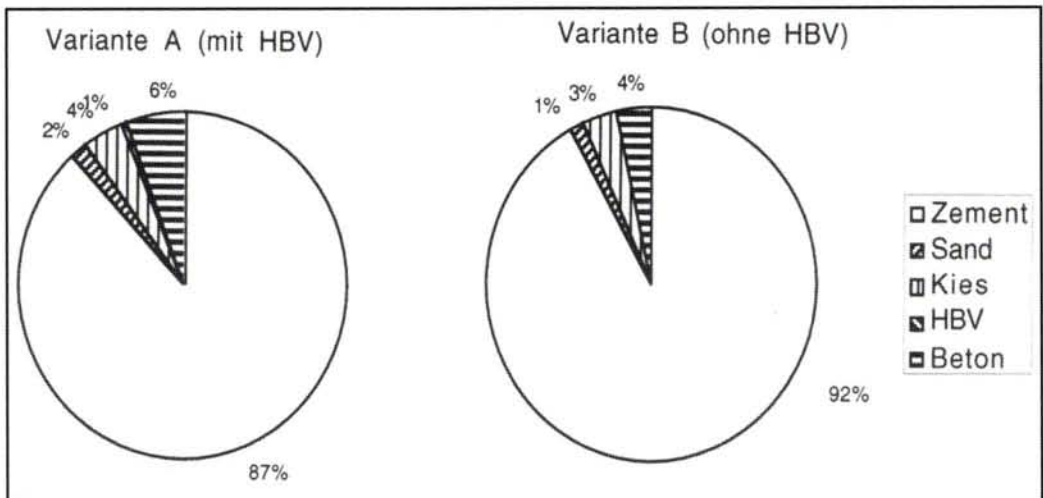


Abb. 6: Prozentuale Anteile der verschiedenen Betoninhaltsstoffe am Gesamt-CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei der Herstellung der Betone - Variante A und B

den Qualitätsanforderungen beurteilt werden (Energie: +5.7 %, CO<sub>2</sub>: +2.2 %);

- Variante B, jedoch als Transportbeton: dies entspricht heute für einen grossen Teil des Betons ohne HBV der Realität (Energie: +3.2 %, CO<sub>2</sub>: +1.4 %).

#### 4 Diskussion

Zusammenfassend kann die Bedeutung von HBV hinsichtlich des CO<sub>2</sub>-Ausstosses und des Energieverbrauchs bei der Betonherstellung folgendermassen beurteilt werden:

- Der Einfluss des HBV auf die Gesamtenergiebilanz ist gering. Unter den hier angenommenen Umständen wird der Bonus der Variante A aus dem Minderverbrauch an Zement erst durch eine mehr als dreifache Dosierung des HBV kompensiert.
- Bei den hier angenommenen Transportdistanzen trägt der Transport 6 % (Ortsbeton) bzw. mit 10 % (Transportbeton) zum Gesamtenergieverbrauch bei. Wenn jedoch im Falle des Transportbetons das Betonwerk neben der Kiesaufbereitungsanlage steht, nähert sich der Energieverbrauch der Variante Ortsbeton. Die Transportdistanzen sind für Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz relevant.
- Werden die Grenzen des Systems ausgeweitet und im Sinne einer gesamthaften Betrachtung auch der Bauvorgang und die Lebensdauer in die Bilanzierung einbezogen, so wird die Differenz bezüglich Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz zwischen den beiden Betonen unbedeutend. Dadurch treten andere Kriterien wie Dauerhaftigkeit, Verarbeitbarkeit, Karbonatisierungswiderstand und die Lebensdauer des Betons in den Vordergrund. Die Bedeutung dieser Faktoren, welche in der gewählten funktionalen Einheit nicht enthalten sind, können eine entscheidende Rolle spielen auf die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerkes [5].
- Die Tatsache, dass bei der Zementherstellung vermehrt nachwachsende Rohstoffe und Abfälle als Energiequellen verwendet und im Zementwerk bzw. Betonwerk immer öfter energiearme Zusatzstoffe beige-

mischt werden, dürfte dazu führen, dass die Unterschiede zukünftig noch geringer ausfallen werden.

- Die Wahl von Vinylacetat als Vinylcopolymer ist vertretbar, da Vinylacetat in diversen neueren Produkten bereits eingesetzt wird. Zudem hat diese Wahl keinen entscheidenden Einfluss auf das Resultat.
- Die Untersuchungen der Studie [6] zeigen, dass die Verwendung von Hochleistungsverflüssigern bei der Betonverarbeitung keine negativen Umwelteinflüsse bezüglich der Human- und Ökotoxizität hervorrufen. Da die Herstellung der Hochleistungsverflüssiger kein aufwendiger Prozess ist, sollten weder andere gravierende Umwelteinflüsse verursacht werden, noch sollten diese eine Rolle in der Gesamtbetrachtung spielen.

## Literatur

- 1 BUWAL (Hrsg.), *Vergleichende ökologische Bewertung von Anstrichstoffen im Baubereich*, Band 2: Daten; Schriftenreihe Umwelt Nr. 232, BUWAL, Bern (1995)
- 2 Frischknecht R., Hofstetter P., Knoepfel I., Dones R., und Zollinger E. et al., *Ökoinventare für Energiesysteme*, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern, 2. Auflage (1995)
- 3 FSHBZ: *Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln*. Herausgeber: Fachverband der Schweizerischen Hersteller von Betonzusatzmitteln, bearbeitet und zusammengestellt von BMG (1995)
- 4 Gälli R., Ochs M. und Mäder U., *Beurteilung der Umweltverträglichkeit von Betonzusatzmitteln – Betonverflüssiger kaum umweltbelastend*, Schweizer Baublatt, **6**, 30-32 (1996)
- 5 Haag, C., Gerdes, A., Künniger, T., Richter, K., Wittmann, F.H., 1997: *Ökologische Betrachtungen zur Dauerhaftigkeit eines Stahlbetonbauteils*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, **3**, 167 - 191.
- 6 Gälli, R., Kiayias, G., 1996: *Environmental Impact of Superplasticizers*. Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen, **2**, 427 - 448.

