

# Ökobilanzielle Betrachtung von leichten Sandwichelementen aus Beton

**Michael Frenzel, Alexander Kahnt**

*Institut für Massivbau,  
TU Dresden,  
George-Bähr-Str. 1, 01069 Dresden,  
Deutschland*

*Fakultät Bauwesen,  
HTWK Leipzig,  
Karl-Liebknecht Straße 132, 04277 Leipzig,  
Deutschland*

## Zusammenfassung

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogrammes 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ werden leichte, tragfähige, dreischichtige Sandwichplatten aus Stahlbeton mit dem Ziel, die genutzten Materialien möglichst effizient und ressourcensparend einzusetzen, entwickelt und untersucht. Dazu werden verschiedene Betonsorten, wie z. B. Normalbeton, konstruktiver Leichtbeton und Porenleichtbeton, miteinander kombiniert. Der vorliegende Beitrag stellt eine ökobilanzielle Betrachtung verschiedener gewichtsoptimierter ein- und mehrschichtiger Plattenelemente gleicher Tragfähigkeit am Beispiel eines Einfeldträgers vor. Der Artikel zeigt, dass der Einsatz von Leichtbetonen zwar zu einer Gewichtsreduzierung, aber nur bedingt zu Ressourcenersparnissen führt.

## 1 Einleitung

Deckenplatten von Gebäuden werden üblicherweise in Ortbeton oder mit Fertigteilen mit Ortbetonergänzung ausgeführt. Dabei kommen hauptsächlich Voll- oder Plattenbalkenquerschnitte mit konstanter Höhe zur Anwendung, da sie schnell und wirtschaftlich umgesetzt werden können. Aus statischer Sicht ist diese Ausführung jedoch ineffizient, da die Tragfähigkeit des bewehrten Betons nur an wenigen Stellen sowohl über die Querschnittshöhe als auch in Längsrichtung voll ausgenutzt ist. Mit einer gleichmäßigeren Ausnutzung der Materialien könnten natürliche Ressourcen und Gewicht gespart werden. Dies wird im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Schwerpunktprogrammes 1542 „Leicht Bauen mit Beton – Grundlagen für das Bauen der Zukunft mit bionischen und mathematischen Entwurfsprinzipien“ [1] für einachsige gespannte Deckenplatten seit Juli 2011 am Institut für Massivbau der TU Dresden untersucht. Es werden zwei Ansätze verfolgt:

- Trennung der Materialien im Querschnitt: höherfeste, dünne Betonschichten werden in besonders druckbeanspruchten und – zur Verbundsicherung mit der Haupttragbewehrung – in zugbeanspruchten Bereichen eingesetzt. Leichte und gering tragfähige Materialien werden an Stellen mit niedrigen Zug- und Druckbeanspruchungen angeordnet. Dies führt zu einem dreischichtigen, sandwichartigen Deckenaufbau. Damit Schubkräfte – wie üblich bei Deckenplatten – ohne Querkraftbewehrung abgetragen werden können, muss ein guter Verbund zwischen den Materialschichten gewährleistet sein.
- Formfindung in der Haupttragrichtung: Aus funktionalen Gründen bleibt die Plattenoberseite eben, die Unterseite kann entsprechend des Kraftflusses in Plattenlängsrichtung angepasst werden. Dies führt zu einer veränderlichen Querschnittshöhe in Haupttragrichtung.

Der vorliegende Beitrag zeigt beispielhaft das Optimierungspotential eines herkömmlichen Stahlbetoneinfeldträgers hinsichtlich möglicher Gewichts- und Ressourcenersparnis. Hier wird der Fokus exemplarisch auf den Primärenergieverbrauch gelegt. Dafür wird nicht die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks berücksichtigt, sondern die Bilanzgrenze vor dem Mischvorgang im Betonwerk gesetzt. Damit ist die Betrachtung frei von herstellerepezifischen Festlegungen und der Plattenausführung (in Ortbeton oder als Fertigteillement).

## 2 Gewichtsoptimierung eines Einfeldträgers

### 2.1 Statisches System und Belastung

Der untersuchte Einfeldträger hat eine Spannweite  $l$  von 5,0 m und eine Breite von 1,0 m. Er soll neben seinem Eigengewicht eine charakteristische Verkehrslast von  $4 \text{ kN/m}^2$  abtragen. Bei Einsatz ver-

Tab. 1 Charakteristische Lasten, Sicherheits- und Kombinationsbeiwerte

	Last		Einheit	Wert	GZG	GZG	GZT	GZT
					$\gamma_{Last}/\gamma_{glob}$	$\Psi_2$	$\gamma_{Last}/\gamma_{glob}$	$\Psi_0$
1	Eigengewicht	$g_{k,S}$	kN/m	variable	1,0/1,0	1,0	1,35/1,27	1,0
2	Ausbaulast	$g_{k,A}$	kN/m	1,0	1,0/1,0	1,0	1,35/1,27	1,0
3	Veränderliche Last	$q_{k,l}$	kN/m	4,0	1,0/1,0	0,6	1,50/1,27	1,0

schiedener Materialien werden die Bauteilhöhe und die Bewehrungsmenge auf der Trägerunterseite so bestimmt, dass die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und der Tragfähigkeit (GZT) für die quasi-ständige und Grundkombination nach EC 2 [2] erfüllt sind. Im GZG wird eine zulässige Verschiebung  $f$  in Trägermitte  $f \leq l/500 = 10$  mm (statt  $f \leq l/250$ ) definiert, da Langzeitverformungen z. B. durch Kriechen in den folgenden Berechnungen unberücksichtigt bleiben. Die verwendeten charakteristischen Lasten, Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Zudem wurde ein globaler Material Sicherheitsfaktor von 1,27 nach dem MODEL CODE 2010 [3] für die Nachweise im GZT gewählt und der Last zugewiesen, um die Platten numerisch berechnen zu können. Für die Nachweise im GZG ergibt sich eine Last von 3,4 kN/m und im GZT von 9,3 kN/m (Abb. 1) zusätzlich zum Platteneigengewicht.

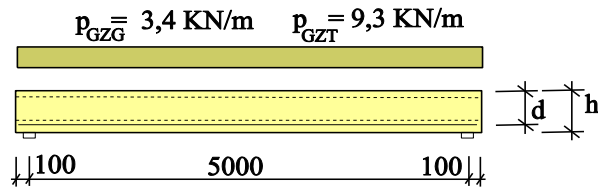


Abb. 1 Belastung und Lagerung des untersuchten parallelgurtigen Einfeldträgers

## 2.2 Materialkennwerte und Berechnung

Nachfolgend werden fünf Einfeldträger berechnet, die unter Gebrauchslast die zulässige Verformung von 10 mm einhalten und die geforderte Traglast bei optimaler Ausnutzung des Bewehrungsstahls (plastifiziert) aufnehmen. Für folgende Platten werden die erforderliche Trägerhöhe  $h$ , und Bewehrungsmenge  $a_s$  bestimmt:

- parallelgurtig, mit einem Beton der Güte C 20/25 (Referenzplatte, Nr. 1)
- parallelgurtig, mit einem konstruktiven Leichtbeton der Güte LC 20/22 (Nr. 2)
- parallelgurtig, dreischichtig, aus den Leichtbetonen LC 20/22 und Infraleichtbeton (ILC, Nr. 3)
- formoptimierter, dreischichtiger Aufbau aus den Leichtbetonen LC 20/22 und ILC (Nr. 4)
- formoptimierter, dreischichtiger Aufbau aus C 20/25 und einem Porenleichtbeton (PLB), (Nr. 5)

Die numerische Berechnung wurde mit dem Programm Atena 2D<sup>1</sup> nach FRENZEL [4] durchgeführt. Die maßgebenden Materialkennwerte für die verschiedenen Betonsorten zeigt Tabelle 2. Die Parameter für die Betone der Güte C 20/25 und LC 20/22 sind dem EC 2 [2] und die des Infraleichtbetons EL ZAREEF [5] entnommen. Die Werte für den aufgeführten Porenleichtbeton lieferten Betonprüfungen am Institut für Massivbau der TU Dresden. Die Stahlkennwerte sind durch den EC 2 [2] und der DIN 488-1 [6] festgelegt.

Tab. 2 Materialkennwerte der verschiedenen Betonsorten und des Bewehrungsstahls

Material	$f_{cm}/f_{ck}/f_{ctk,0,05}/E_{cm}^a$	Einheit	$\epsilon_{cl}^a$	Einheit	$\rho_{tr}/\rho_{calc}$	Einheit
C 20/25	28,0 / 20,0 / 1,8 / 31000	N/mm <sup>2</sup>	2,0	‰	2,1/2,2	t/m <sup>3</sup>
LC 20/22	28,0 / 20,0 / 1,1 / 10500	N/mm <sup>2</sup>	2,7	‰	1,3/1,4	t/m <sup>3</sup>
ILC	6,9 / 6,0 / 0,55 / 4000	N/mm <sup>2</sup>	1,7	‰	0,8/0,95	t/m <sup>3</sup>
PLB	5,3 / - / 0,4 / 2600	N/mm <sup>2</sup>	2,1	‰	0,9/1,0	t/m <sup>3</sup>
Material	$f_{y,k}/f_{t,k}/E_s^a$	Einheit	$\epsilon_y^a$	Einheit	$\rho_{calc}$	Einheit
BSt 500	500 / 525 / 200000	N/mm <sup>2</sup>	2,5	‰	7,85	t/m <sup>3</sup>

<sup>a</sup> ...Definition der Symbole siehe [2],  $\rho_{tr}$ ...Trockenrohddichte,  $\rho_{calc}$ ...rechnerische Dichte, kursiv...angenommene Werte

<sup>1</sup> Atena 2D, Version 4.2.2.0, Červenka Consulting Ltd., Prag, Tschechische Republik

## 2.3 Ergebnisse

Abbildung 2 veranschaulicht die Momenten-Durchbiegungsverläufe der fünf numerisch berechneten Platten in Trägermitte. Die Momente aus Eigengewicht, Gebrauchs- und Traglast sind durch Symbole gekennzeichnet. Ihr Verlauf kann in drei Bereiche eingeteilt werden. Abschnitt ① zeigt das Verformungsverhalten des ungerissenen Trägers. Bereich ② ist durch einen flacheren Kurvenanstieg (Querschnittsschwächung durch Rissbildung) gekennzeichnet. Der Abschnitt ③ zeigt einen nahezu horizontalen Graphenverlauf. Er wird durch das Plastifizieren des Bewehrungsstahls hervorgerufen.

Die Referenzplatte (Nr. 1) erfüllt die geforderten Nachweise im GZG und GZT mit einer Plattenhöhe  $h$  von 210 mm und mit einer Bewehrungsmenge  $a_s$  von  $5,61 \text{ cm}^2/\text{m}$ . Bei einer Betondeckung von 20 mm und Bewehrungsseisen mit einem Durchmesser von 10 mm ergibt sich eine statische Höhe von 185 mm (Tabelle 3). Die Platte Nr. 2 aus konstruktiven Leichtbeton gleicher Güte wie Nr. 1 benötigt eine statische Höhe von 210 mm und damit 25 mm mehr als die Referenzplatte, da sie etwa nur 1/3 der elastischen Steifigkeit aufweist. Zudem wurde nach EC 2 [2] eine um 5 mm größere Betondeckung für konstruktive Leichtbetone zur Sicherung des Verbundes und Brandschutzes berücksichtigt. Damit ergibt sich für Platte Nr. 2 eine Gesamthöhe von 240 mm. Das Sandwichelement Nr. 3 besteht aus einer 15 mm starken Druck- und 45 mm dicken Zugzone. Im Kernbereich kann mit dem Infralichtbeton weiteres Gewicht gespart werden. Im Vergleich zur Referenzplatte weist die Platte nur 59 % des Gewichtes bei einer Höhe von 260 mm auf. Die erforderliche Bewehrungsmenge reduziert sich auf 67 % (siehe Tabelle 3). Die Platte Nr. 4 (siehe Abbildung 3) zeigt, dass neben der Optimierung im Querschnitt auch durch eine veränderliche Querschnittshöhe in Tragrichtung Gewicht gespart werden kann. Die formoptimierte, dreischichtige Platte erfüllt die geforderten Nachweise bei einer Trägerhöhe in Feldmitte von 310 mm. Das Plattengewicht reduziert sich auf 51 %, die Bewehrungsmenge mit  $3,27 \text{ cm}^2/\text{m}$  auf 58 % der Referenzplatte. Bei einer Plattenhöhe von 310 mm erfüllt auch die Materialkombination C20/25 – PLB (Nr. 5) die Nachweise. Daraus ergibt sich eine Gewichtsreduktion auf 62 % der Referenzplatte.

## 3 Ökobilanzielle Betrachtung

Zur Bilanzierung des Primärenergiebedarfes (PE) der berechneten Platten wurden die Ökobilanzdatensätze aus der Software GaBi 4 PE INTERNATIONAL [7] verwendet. Die Primärenergie beschreibt die graue (gebundene) Energie, die für die Herstellung des Baustoffes oder Bauproduktes notwendig ist KAHNT & HÜLSMEIER [8]. Für die nachstehende Betrachtung erbringen die in Tabelle 4 aufgeführten Rezepturen die in Tabelle 2 hinterlegten Festig- und Steifigkeiten. Bei der folgenden Bilanzierung wird nicht zwischen schnell und langsam erhärtenden Zementen (einer Festigkeitsklasse) unterschieden.

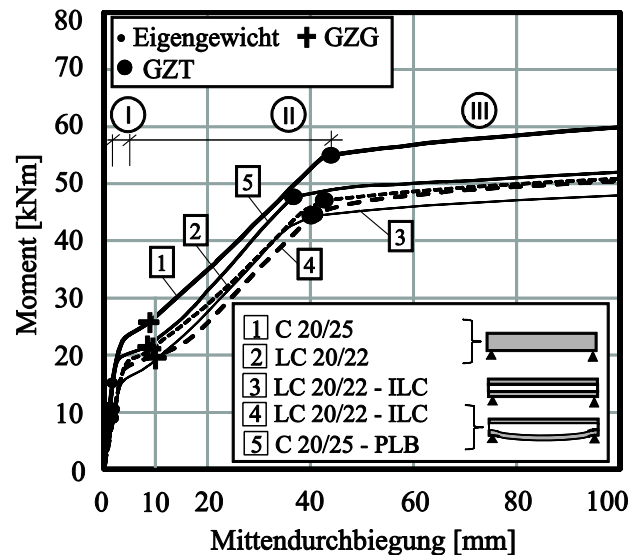


Abb. 2 Momenten-Durchbiegungsverläufe

Tab. 3 Ergebnisse

Nr.	$h/d$ [mm]	$a_s$ [ $\text{cm}^2/\text{m}$ ]	$a_s$ [%]	$g$ [t/m]	$g$ [%]
1	210/185	5,61	100	2,40	100
2	240/210	4,36	78	1,74	73
3	260/230	3,74	67	1,42	59
4	310/280	3,27	58	1,23	51
5	310/285	3,27	58	1,49	62

g...Eigengewicht pro m Plattenbreite

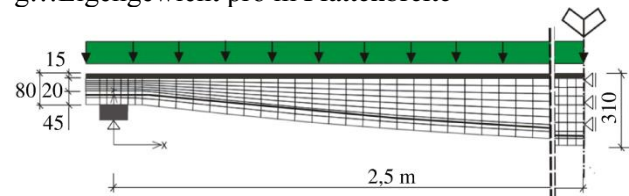


Abb. 3 formoptimierte, geschichtete Platte

Tab. 4 Betonbestandteile in kg/m<sup>3</sup>

	Beton	Zuschläge	Zement	MS <sup>1</sup>	FA <sup>2</sup>	Wasser	FM <sup>3</sup>
A	C 20/25	Sand <sup>4</sup> : 977, Kies <sup>4</sup> : 800	CEM I 32,5R: 285	-	-	143	-
B	LC 20/22	Sand <sup>5</sup> : 661	CEM I 42,5R: 450	45	180	200	4,5
C	ILC <sup>8</sup> [5]	Sand <sup>5</sup> : 225, Kies <sup>6</sup> : 170	CEM III-A 32,5 N: 330	-	-	165	-
D	PLB <sup>8</sup>	-	CEM I 52,5R-NA/HS: 393	-	393	302	-

<sup>1</sup>...Mikrosilika (pulvrig), <sup>2</sup>... Steinkohleflugasche, <sup>3</sup>...Fließmittel, <sup>4</sup>...erdfeuchter Natursand 0/2 und Naturkies 2/8, <sup>5</sup>...Blähton sand 0/4 bzw. 0/2, <sup>6</sup>... Blähtonkies 1/4 und 2/8, <sup>5,6</sup>...Eigenfeuchte und Saugwasser sowie Schaum- und Luftporenbildner für <sup>8</sup> werden nicht berücksichtigt.

### 3.1 Bindemittel und Zuschläge

Abbildung 4 zeigt den Primärenergiebedarf unterschiedlicher Bindemittel und Betonzuschläge pro Kilogramm. Bilanziert wird der Rohstoffabbau inklusive Aufbereitung der Materialien.

Der CEM I besteht zu 95 bis 100 % aus Portlandzementklinker. Da er in einem sehr energieintensiven Prozess gewonnen wird, entsteht ein relativ großer Anteil an grauer Energie. Vergleicht man die unterschiedlichen Festigkeitsklassen (CEM I 32,5/CEM I 42,5/CEM I 52,5), wird ersichtlich, dass aufgrund zunehmender Mahlfeinheit die graue Energie steigt. Gegenüber CEM I 32,5 benötigt die Herstellung von CEM I 52,5 etwa 18 % mehr Primärenergie [7].

Abbildung 4 demonstriert auch den Vergleich des PE-Bedarfs der Zementarten CEM I, II und III gleicher Festigkeit (32,5). Bei Portlandkomposit- und Hochofenzementen wird die graue Energie durch den Ersatz des Zementklinkers mit z. B. Hüttensand erheblich reduziert. Der mengenmäßig große Einsatz von Hüttensand (36 bis 80 M.-%) kann den Primärenergiebedarf beim CEM III 32,5 im Vergleich zum CEM I 32,5 bis auf 49 % reduzieren.

Als Zementklinkerersatz ist auch Flugasche geeignet. Sie wird entweder als emissionsfreier Abfallstoff bewertet oder der für ihre Herstellung notwendige Verbrennungsvorgang der Kohle wird teilweise mitbilanziert, HAIST [9]. Da ein Kohlekraftwerk sowohl Strom als auch Flugasche produziert, können die Umweltwirkungen an die gesamte Wertschöpfung durch den Kraftwerksprozess gekoppelt werden. Dabei hat Flugasche einen Anteil von ca. 1 % des Kraftwerkprozesses, HAIST [9]. Die beiden Primärenergien für Flugasche sind in Abbildung 4 gegenüber gestellt. Die gleiche Betrachtungsmöglichkeit gilt auch für Hüttensand. Es ist beachtlich, dass nicht wertfreie Flugasche einen größeren PE-Wert als alle Zementsorten hat. Der Stoff kann bei dieser Betrachtung aus ökologischer Sicht nicht mehr als sinnvoller Ersatz für Zement angesehen werden. Es muss daher geklärt werden, wie zukünftig mit der Bilanzierung von Ersatzstoffen umgegangen werden soll. In den weiteren Betrachtungen werden Flugasche und Hüttensand als Abfallstoffe gewertet und gehen damit emissionsfrei in die Berechnung ein. Der angesetzte CEM III 32,5 ist dadurch primärenergetisch besonders günstig.

Als weiteres Bindemittel hat sich Mikrosilika etabliert. Es weist einen ähnlich hohen PE-Bedarf wie nicht wertfreie Flugasche auf. Da Mikrosilika in der vorliegenden GaBi-Datenbank nicht vorhanden ist, wird der Datensatz Quarzmehl verwendet.

Zu den herkömmlichen Betonzuschlägen gehören Sand und Kies. Sie werden aus regionalen Kiesgruben gefördert. Da sie bereits in der für die Verarbeitung notwendigen Form erdfeucht vorliegen, sind sie primärenergetisch sehr günstig (siehe Abb. 4). Eventuell nötige Trocknungsprozesse wirken sich negativ auf die Energiebilanz aus.

Zu den leichten Gesteinskörnungen (Kornrohichte unter 2000 kg/m<sup>3</sup>) gehören die Zuschläge aus z. B. Blähton. Bei seiner Herstellung wird kalkarmer Ton gemahlen, granuliert und bei ca. 1200 °C gebrannt, BRAMESHUBER & VOLLPRACHT [10]. Dies führt zu einem Primärenergieverbrauch von über 180 % gegenüber dem CEM I 32,5 bzw. ca. 5500 % gegenüber erdfeuchten Sand und Kies.

Für die Herstellung eines Kilogrammes herkömmlichen Baustahls BSt 500 werden 10,2 MJ benötigt. Das sind 343 % des Zementes CEM I 32,5, PE INTERNATIONAL [7].

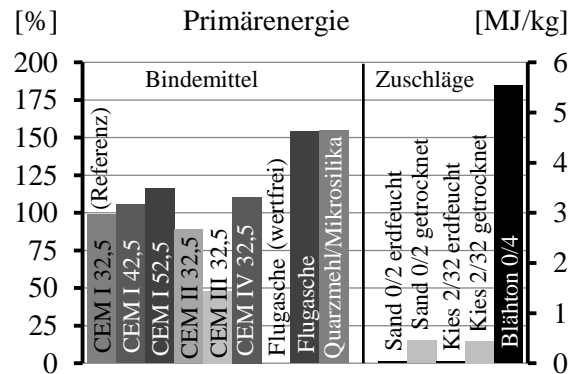


Abb. 4 PE unterschiedlicher Bindemittel und Betonzuschläge

### 3.2 Anwendung der Ökobilanzdaten auf die gewählten Betonmischungen

Abbildung 5 zeigt den Primärenergiebedarf der in Tabelle 4 dargestellten Betonmischungen unter Berücksichtigung der Daten aus Abbildung 4. In der Bilanz wird in diesem Schritt der Transport der Einzelbestandteile (100 km mit einem 22-t-LKW, HAUKER ET AL. [11]) in das Betonwerk berücksichtigt. Der Mischprozess im Betonwerk bleibt ohne Wertung.

Für die Herstellung des Normalbetons C 20/25 ist sehr wenig Primärenergie notwendig, da eine große Menge erdfeuchter Sand und Kies sowie vergleichsweise wenig Zement ( $285 \text{ kg/m}^3$ ) benötigt werden. Die Abbildung 5 zeigt, dass für die Herstellung der Leichtbetonmischung LC 20/22 398 % und der Infraleichtbetonmischung (ILC) 151 % der Primärenergie des C 20/25 aufgebracht werden muss, da der Blähton sehr energieintensiv ist. Dieser Zuschlag ist für 37 % beim LC 20/22 und sogar für 80 % beim ILC der gesamten Primärenergie verantwortlich. Unter den drei Leichtbetonsorten ist für die Herstellung des Porenleichtbetons die geringste Energiemenge nötig. Die Matrix besteht nur aus Zement CEM I 52,5, Flugasche und Luftporenbildner. Diese Mischung liegt primärenergetisch und auch bei den Emissionen nur wenige Prozent über dem Normalbeton.

Der Energieeinsatz liegt bei allen Leichtbetonmischungen über dem von Normalbeton C 20/25 jedoch sind sie erheblich leichter (im Schnitt 50 %). Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die Dichte in Hinblick auf die Ressourcenschonung ebenfalls berücksichtigt. Ressourcenschonung bedeutet nicht nur Primärenergie einzusparen, sondern auch Rohstoffe. Daher wurde der Primärenergieeinsatz  $[\text{MJ/m}^3]$  mit der Trockenrohdichte  $[\text{t/m}^3]$  multipliziert. In Abbildung 5, rechts, wird deutlich, dass der Infraleichtbeton (ILC) und der Porenleichtbeton (PLB) bei diesem Ansatz ökologisch günstiger sind als der Normalbeton (C 20/25).

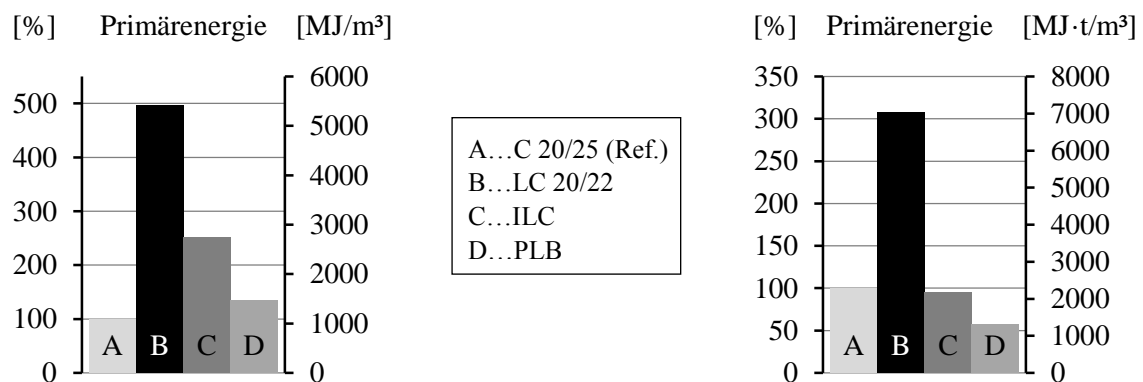


Abb. 5 PE unterschiedlicher Betonmischungen

### 3.4 Anwendung der Betonmischungen auf die bemessenen Einfeldträger

Abbildung 6 zeigt den Primärenergiebedarf der berechneten Einfeldträger unter Berücksichtigung der verschiedenen Volumen und Bewehrungsmengen. Der Wert der Normalbetonplatte C 20/25 (Nr. 1) liegen unter denen der Leichtbetonplatten. Die Vollplatten stehen in einem ähnlichen Verhältnis zueinander wie die beiden Betone C 20/25 und LC 20/22 in Abbildung 5 (ca. 490/100). Durch den dreischichtigen Aufbau der Elemente kann weiter Energie gespart werden. So reduziert sich der Primären-

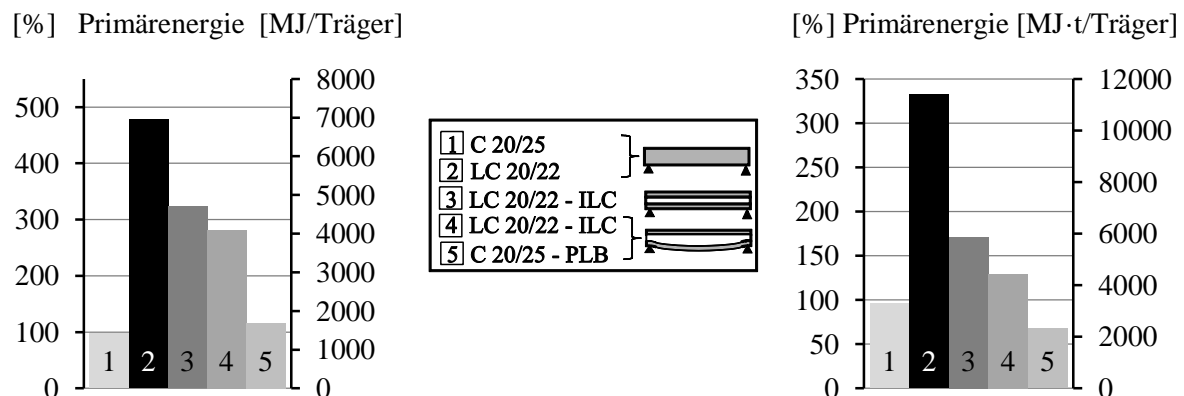


Abb. 6 PE unterschiedlicher Einfeldträger

ergiebedarf von ca. 490 % der Vollplatte (Nr. 2) auf 280 % der formoptimierten Platte aus LC 20/22–ILC (Nr. 3). Die Formoptimierung (Nr. 4) reduziert den PE-Bedarf im Vergleich zum parallelgurtigen, geschichteten Element etwa um 13 %. Primärenergetisch günstiger ist die Kombination von Normalbeton mit Porenleichtbeton (Nr. 5). Die formoptimierte Platte verursacht lediglich 10 % mehr graue Energie als die Normalbetonplatte. Sie wiegt dagegen allerdings auch 38 % weniger. Wird der Primärenergieverbrauch dagegen mit dem Plattengewicht multipliziert (Rohstoffverbrauch), so liegt das formoptimierte Sandwichelement aus LC 20/22–ILC (Nr. 4) nur noch 28 % über und die Ausbildung mit Porenleichtbeton (Nr. 5) sogar 35 % unter der Referenzplatte (Abbildung 6, rechts).

#### 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Untersuchungen zeigen, dass mit konstruktiven Leichtbetonen, aufgrund ihres günstigen Festigkeit-Gewichtsverhältnisses, besonders leichtgewichtige, geschichtete Deckenelemente realisiert werden können. Die Ergebnisse der ökologischen Betrachtung (Primärenergie) zeigen jedoch, dass die konstruktiven Leichtbetone mit großen Mengen an Blähton energetisch ungünstig sind. Hier lässt sich ein großes Optimierungspotential in der Auswahl der Bindemittel und Zuschläge finden. In den folgenden Untersuchungen wird daher neben dem Gewicht und der Festigkeit der Betonmischungen auch nach ökologischen Gesichtspunkten optimiert. Weitere ökobilanzielle Faktoren, wie z. B. das Treibhaus- und Versauerungspotential werden zusätzlich zur Primärenergie betrachtet. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein geringerer Zementanteil, mehr natürliche Gesteinskörnungen (ohne Aufbereitung) und eine formoptimierte, leichte Bauweise zu nachhaltigeren Konstruktionen führen.

#### 5 Danksagung

Das Institut für Massivbau der TU Dresden bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung und finanzielle Unterstützung des Schwerpunktprogrammes 1542, bei dem Architekturinstitut der Fakultät Bauwesen der HTWK Leipzig für die Mit- und Zuarbeit zu dieser Veröffentlichung und der Firma BCS Natur- und Spezialbaustoffe GmbH, Dresden für das Bereitstellen einer leistungsfähigen Porenleichtbetonmischung.

#### Literatur

- [1] SPP 1542. <http://spp1542.tu-dresden.de/> (31.07.2013)
- [2] EN 1992-1-1 (EC2): Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings; German version EN 1992-1-1: 2004 + AC: 2010, 2011
- [3] CEB-FIP Comité Euro-International du Béton (ed.): CEB-FIP Model Code 2010 - First complete draft, CEB Bulletin No. 55. 1. ed. Lausanne : International Federation for Structural Concrete (fib), 2010. – ISBN 978-2-88394-095-6
- [4] FRENZEL, M.: *Numerical simulation of single-span lightweight concrete sandwich slabs*. In: Müller, H. S.; Haist, M.; Acosta, F. (Hrsg.): Proceedings of the 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering : Karlsruhe Institute of Technology (KIT) vom 22.-25. Juli 2012 in Karlsruhe, S. 309-315, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012
- [5] El Zareef, M.: *Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete*. Dissertation, TU Berlin, 2010.
- [6] DIN 488-1: Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung, 2009
- [7] PE INTERNATIONAL GMBH (Hrsg.): *GaBi Software Systems and Life Cycle Databases for Engineering*. LBP und PE, Stuttgart und Leinefelde Echerdingen, 2011
- [8] KAHNT, A.; HÜLSMEIER, F.: *Umweltindikatoren von Fassadenbekleidungen*. VDI-Nachrichten. Ausgabe 2011(1): S. 15, Jähmig, Leipzig, 2011
- [9] HAIST, M.; MÜLLER, H. S.: *Nachhaltiger Beton – Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit*. In: Müller, H. S. (Hrsg.) Tagungsband zur Veranstaltung Nachhaltiger Beton - Werkstoff, Konstruktion und Nutzung: 9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung vom 15. März 2012; S. 29 – 52, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2012
- [10] BRAMESHUBER, W.; VOLLPRACHT, A.: *Erarbeiten eines Grundsatzpapiers zur Feststellung der Umweltverträglichkeit von genormten Betonausgangsstoffen*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2003
- [11] HAUKER, B.; ET AL.: *Nachhaltig Bauen mit Beton*. Beuth, Berlin, 2011