

9 Konstruktionsleichtbeton unter Verwendung von Luftporen

Dipl.-Ing. Julia Trautmann

Dipl.-Ing. Jens Uwe Pott

9.1 Einleitung

Konstruktionsleichtbetone nach bisherigem Stand sind gefügedichte Leichtbetone mit erhöhten Anforderungen an die Festigkeit, die unter Verwendung von Leichtzuschlag hergestellt werden. Rohdichte und Druckfestigkeit des Leichtbetons werden wesentlich von der Porosität des Leichtzuschlags und dessen Anteil an der Betonzusammensetzung beeinflusst. Durch eine geeignete Auswahl der Ausgangsstoffe kann das Verhältnis von Betonrohddichte zu Betonfestigkeit variiert und an vielfältige Bauaufgaben erfolgreich angepasst werden. Gemessen an seinem Leistungspotential wird Konstruktionsleichtbeton jedoch verhältnismäßig wenig verwendet.

Die im Vergleich zu Normalbeton anspruchsvollere Technologie sowie die noch nicht zufrieden stellende „technologische Sicherheit“ beim Umgang mit Konstruktionsleichtbeton bilden ein großes Hindernis für eine breitere Anwendung und größere Akzeptanz dieses Baustoffs. Die Mehrzahl aller Nachteile von Konstruktionsleichtbeton können im Frisch- und Festbetonzustand auf die Unterschiede von Korn und Matrix hinsichtlich Rohdichte, Festigkeit und Steifigkeit zurückgeführt werden. Ein Annähern der Matrix- an die Korneigenschaften führt demnach zu einer Verbesserung der Betoneigenschaften, was die Erschließung breiterer Anwendungsfelder ermöglicht.

9.2 Motivation

Das Forschungsprojekt basiert auf zwei wesentlichen Ansätzen zur Ertüchtigung des Baustoffs Konstruktionsleichtbeton durch Einführen von Mikroluftporen in die Betonmatrix.

9.2.1 Überschusswasser durch Luft ersetzen

Allgemein bekannt ist der Einfluss des Mengenverhältnisses von Wasser und Zement (w/z -Wert) auf die Festigkeit eines Betons. Zurückzuführen ist dieser Festigkeitseinfluss sowohl auf die chemisch erforderlichen Mengenanteile zur Sicherstellung einer vollständigen Hydratation, als auch auf den entstehenden (Kapillar-)Porenraum bei Zugabe größerer als der für die Hydratation erforderlichen Wassermengen. Bereits 1960 zeigte Wesche [Wesche-60], dass es möglich ist, die Festigkeit eines Betons besser abzuschätzen, wenn man neben dem w/z -Wert auch

noch den Luftporengehalt im Frischbeton quantifiziert und wie folgt in die Berechnung mit einfließen lässt:

$$f_c = f\left(\frac{w+l}{z}\right) \quad (9-1)$$

mit:

- $f()$ = mathematische Funktion
- f_c = Betonfestigkeit
- w = Wassergehalt [dm^3/m^3]
- l = Luftporenraum [dm^3/m^3]
- z = Zementgehalt [dm^3/m^3]

Da heute durch moderne Fließmittel die Möglichkeit besteht, den Wassergehalt einer Betonrezeptur deutlich zu verringern, könnten somit in dem gleichem Volumenumfang Luftporen in den Beton eingebracht werden, wie Wasser eingespart wird, ohne dabei gegenüber der Ausgangsrezeptur nennenswerte Einflüsse auf die Festigkeit erwarten zu müssen.

Für den Konstruktionsleichtbeton ergeben sich daraus Vorteile, die vor allem in einer Reduktion des Eigengewichts oder in einer Verminderung der Zugabe von Leichtzuschlägen liegen kann. Da die Luft mit vergleichsweise geringen Aufwand für Zusatzmittel und maschinelle Ausstattung in den Beton eingebracht werden kann, besteht hier ein deutliches Einsparpotenzial bei den Kosten für den Konstruktionsleichtbeton.

9.2.2 Abstimmung von Matrix- und Zuschlageigenschaften

Herkömmlicher Leichtbeton wird oftmals mit sehr ähnlichen Matrices hergestellt, wie sie auch für Normalbetone verwendet werden. Dennoch stellt sich bei Leichtbeton eine erheblich verminderte Festigkeit ein. Dieser Effekt beruht darauf, dass anders als beim Normalbeton, bei dem in der Regel der Zuschlag deutlich höhere Festigkeiten aufweist als die Matrix, bei Leichtbeton die Matrix meistens fester ist als der Leichtzuschlag. Das heißt, dass die Versagensmechanismen eines Leichtbetons oftmals ihren Anfang in den Leichtzuschlagkörnern nehmen. Dadurch wirken diese im Versagensfall wie Fehlstellen in der Matrix. Somit ist die Festigkeit des (vereinfacht betrachteten) 2-Stoff-Systems Leichtbeton vor allem durch die Leichtzuschlagfestigkeit begrenzt, während die Matrixfestigkeit oftmals nicht voll ausgenutzt wird.

Neben der Festigkeit ist allerdings auch das Steifigkeitsverhältnis zwischen Matrix und Leichtzuschlagkörnern von Bedeutung, da dieses wesentlich die Verteilung des Lastabtrags zwischen Zuschlag und Matrix bestimmt.

Diese Zusammenhänge wurden bereits 1983 von Käßner [Käßner-83] beschrieben (vgl. Bild 9.1).

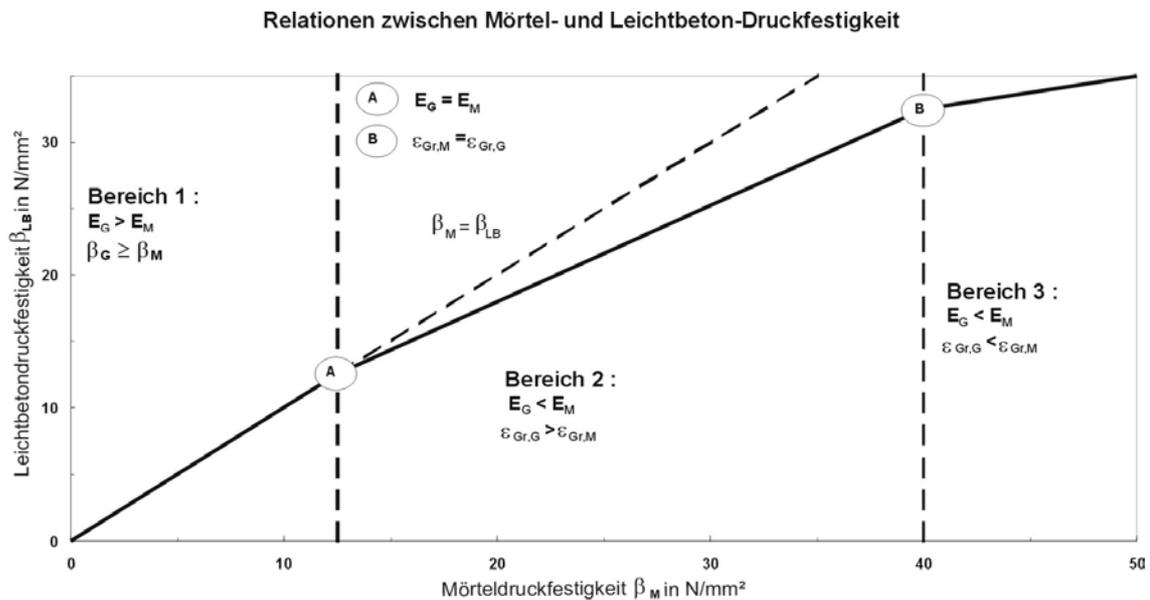


Bild 9.1: Relation zwischen Mörtel- und Leichtbeton- Druckfestigkeit [Käßner-83]

Darin sind:

- E = Steifigkeit von Matrix (M) und Zuschlag (G)
- β = Druckfestigkeit von Matrix (M), Zuschlag (G) und Leichtbeton (LB)
- ε_{Gr} = Bruchdehnung von Matrix (M) und Zuschlag (G)

- Bereich 1 (Zuschlagsteifigkeit $E_G > Matrixsteifigkeit E_M$)

Bereich 1 beschreibt das Verhalten, wenn $E_G > E_M$ vorliegt, wie es bei Normalbeton der Fall ist. Dort führt die Zunahme der Matrixfestigkeit zu einer entsprechenden Zunahme der Betonfestigkeit. Durch den Einsatz von Luftporen in diesem Bereich wird kein mechanischer Vorteil erzielt, da die Matrix bereits die schwächere Komponente ist. Die Luftporen würden hier nur zu einer Reduzierung der Betonrohddichte, aber auch gleichzeitig zu einer niedrigeren Festigkeit führen.

- Bereich 2 (Zuschlagsteifigkeit $E_G < Matrixsteifigkeit E_M$ und $\varepsilon_{Gr,G} > \varepsilon_{Gr,M}$)

Der Übergang zum Bereich 2 geschieht über das Erreichen der Grenzfestigkeit (Punkt A), wenn die Steifigkeiten der Matrix und des Zuschlags einander entsprechen. Die Grenzfestigkeit liegt noch deutlich unterhalb der Korneigenfestigkeit (Punkt B). Das bedeutet, dass trotz des gleichmäßigen Lastabtrags eine nennenswerte Tragfähigkeitsreserve des Leichtzuschlages ($\Delta\beta_G$; Bild 9.1) nicht ausgenutzt wird.

- Bereich 3 (Zuschlagsteifigkeit $E_G < Matrixsteifigkeit E_M$ und $\varepsilon_{Gr,G} < \varepsilon_{Gr,M}$)

Zum Erreichen einer Betonfestigkeit, die der Korneigenfestigkeit entspricht bzw. diese überschreitet, ist eine Matrixfestigkeit einzusetzen, die höher ist als die Korneigenfestigkeit. Da die Zuschlagfestigkeit ausgeschöpft ist, verhalten sich die Zuschlagkörner im Bereich 3 wie Schwachstellen in der härtesten Matrix. Zur Steigerung der Leichtbetondruckfestigkeit ist eine überproportionale Steigerung der Matrixfestigkeit erforderlich. Nach [Faust-03] ist der Proportionalitätsfaktor von der Kornvolumenkonzentration

abhängig und tendiert bei Kornvolumenkonzentrationen von 40 Vol.-% und mehr gegen null. D.h. auch eine deutliche Erhöhung der Matrixfestigkeit führt zu keiner nennenswerten Erhöhung der Leichtbetonfestigkeit.

An Hand der Bruchbilder von Leichtbetonen hat Grübl [Grübl-79] bereits 1979 ähnliche Bereiche beschrieben.

In den meisten Anwendungsfällen liegt das Verhältnis von Leichtzuschlag und Matrix im Bereich 3. Somit hat man eine Matrixfestigkeit, die zwar deutlich über der der Leichtzuschläge liegt, aber dennoch keine wesentliche Erhöhung der Leichtbetonfestigkeit bewirkt. Verwendet man nun im Vergleich zu üblichen Leichtbetonen für Konstruktionsleichtbeton eine Matrix mit deutlich höherer Ausgangsfestigkeit, liegt ein erhebliches ungenutztes Potential in der Matrix. Dieses kann eingesetzt werden, um durch eine planmäßige Schwächung der Matrix mit zusätzlich eingeführte Luftporen im Bruchzustand des Leichtbetons ein Optimum der Matrixfestigkeit im Bereich zwischen Grenzfestigkeit und Korneigenfestigkeit des Leichtzuschlags zu erreichen.

9.2.3 Angestrebtes Forschungsziel

Aus den vorgenannten theoretischen Erörterungen ergibt sich das Forschungsziel, die Komponenten Leichtzuschlag und Matrix eines Konstruktionsleichtbetons so aufeinander abzustimmen, dass beide möglichst gleichmäßig und optimal ausgenutzt werden. Die dafür notwendigen Matriceigenschaften sollen mit Hilfe von Mikroluftporen eingestellt werden. Die Festigkeit der höherfesten Matrix wird durch das Einbringen von Luftporen auf das gewünschte Niveau reduziert. Ein gleichmäßigerer Lastabtrag wird durch die ebenfalls geringere Steifigkeit der vorgeschäumten Matrix ermöglicht. In jedem Fall sollen sich Konstruktionsleichtbetone mit vorgeschäumter Matrix zwischen den Optima der Grenzfestigkeit und der Korneigenfestigkeit befinden. Das verringerte Matrixgewicht führt zu einem günstigeren Verhältnis zwischen Betonfestigkeit und Trockenrohddichte.

Die Matriceigenschaften sind so durch die Mikroluftporen einzustellen, dass im Bruchzustand das Korn und die höherfeste Matrix gleichzeitig versagen. So werden Matrix und Zuschlag voll ausgenutzt und gleichzeitig mit Hilfe der Mikroporen die Betonrohddichte reduziert.

9.3 Mischen und Lufteintrag in die Betonmatrix

In den Versuchen wurden unterschiedliche Methoden zum Lufteintrag in die Betonmatrix angewendet. Zum einen wurden mit sogenannten Schaumgeneratoren Schäume separat hergestellt, die dann unter die Betonmatrix gehoben wurden, zum anderen wurden durch Mischen des Leims in einem hochtourig laufenden Zwangsmischer unter Zugabe von Schaumbildnern Luftporen in den Beton eingeführt.

Von erheblicher Bedeutung für die erzielten Luftgehalte war neben der Dosierung der porenerzeugenden Zusatzmittel auch der jeweilige Mischprozess, mit dem der Schaum unter den Beton gehoben bzw. die Poren im Leim erzeugt wurden. Sowohl die Mischdauer als auch die Mischenergie und die verwendete Mischerkonfiguration

waren hier für erhebliche Unterschiede bei der Konsistenz, wie auch bei der Homogenität, der Porenbeschaffenheit und dem resultierenden Porenvolumen, verantwortlich.

9.3.1 Schaumherstellung mit Schaumgeneratoren



Bild 9.2: Proteinschaum aus Schaumgenerator

Die theoretische Erwägung, die die Verwendung separat hergestellter Schäume anderen Verfahren zum Lufteintrag überlegen macht, beruht auf der Annahme, durch die Erfassung von Volumen und Gewicht des zugegebenen Schaums sowie die zuvor beurteilbare Porenstruktur einen möglichst definierten Lufteintrag in die Matrix zu gewährleisten. Das setzt voraus, dass das Schaumvolumen sowie seine Eigenschaften mindestens für die Dauer der jeweiligen Verarbeitungsschritte an der Luft bzw. im Mörtel/Beton stabil ist.

Sowohl der verwendete Tensidschaum als auch ein Proteinschaum ließen sich mit einigen Voruntersuchungen [Thomsen-99, Oruc-00] so einstellen, dass sie an der Luft eine ausreichende, für die Verarbeitung erforderliche Stabilität aufwiesen, wobei der Proteinschaum (s. Bild 9.2) eine deutlich gleichmäßigere und festere Konsistenz hatte.



Bild 9.3: Mörtel mit untergemischtem Tensidschaum

Vorversuche an Normalbetonen haben zunächst gezeigt, dass ein zielsicheres Erreichen angestrebter Luftgehalte im Beton durch Zudosierung von separat hergestelltem Schaum mit geringen Schwankungsbreiten möglich ist.

Die Übertragung dieser Erkenntnis auf eine höherfeste Matrix als Grundlage für den Konstruktionsleichtbeton gestaltete sich jedoch schwierig. Je nach Konsis-

tenz der Ausgangsmatrix, Dosierung des Schaums und Bauart des verwendeten Mixers kam es zu erheblichen Veränderungen des tatsächlichen Luftgehalts gegenüber dem zugegebenen Schaumvolumen. Dabei sind sowohl ein Austreiben der Poren als auch ein Nachschäumen beobachtet worden. Die zuvor an Normalbeton erzielten guten Ergebnisse

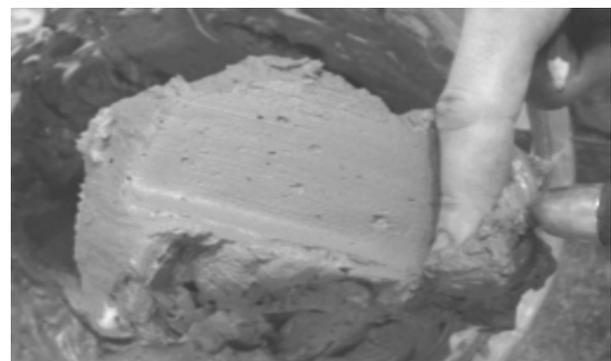


Bild 9.4: Grobe Luftporen in der Matrix nach Schaumzugabe

konnten nicht erreicht werden.

Ein zielsicheres Einstellen von Luftgehalten in Mörtel war daher nur mit erheblichem Aufwand möglich. Teilweise konnte auch eine deutliche Veränderung des Porengefüges beobachtet werden, so dass statt der angestrebten fein verteilten Mikroluftporen vereinzelte grobe Poren im Beton vorlagen (vgl. Bild 9.4).

9.3.2 Direktes Aufschäumen von Leimen im Mischprozess

Das direkte Aufschäumen des Zementleims erfolgte mit einem sehr hochtourig laufenden Zwangsmischer unter Zugabe von Schaum- oder LP-Bildner. Da aber speziell bei dem Eintrag hoher Mischenergien das Mischverfahren einen deutlichen Einfluss auf das Mischgut hat, wurden im Vorfeld Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Mischdauern und Mischintensitäten auf die Eigenschaften von Leimen und Mörteln durchgeführt. Mit den daraus resultierenden Ergebnissen wurde gezielt in dem für die Hauptversuche verwendeten Zwangsmischer durch Variation der Topfgeschwindigkeit, der Wirblergeschwindigkeit und der Drehrichtung des Wirblers für Leim- und Mörtelmischungen ein günstiges Mischprogramm ermittelt. Zur Bewertung der Mischungen wurden jeweils für Leim und Mörtel Rohdichte und Ausbreitmaß ermittelt und zusätzlich die Druck- und Biegezugfestigkeit an Mörtelprismen geprüft. Auch die visuelle Beurteilung der Porenstruktur wurde bei der Auswahl des Mischverfahrens berücksichtigt.

Da die Problematik des Nachschäumens erhebliche Schwierigkeiten bei der gezielten Betonherstellung aufwirft, wurde bereits für Leim und Mörtel ein möglichst hoher Luftgehalt bei konstanter Schaum-/ LP-Bildnerzugabe angestrebt, um deren Wirkungspotential möglichst optimal auszunutzen.

Bei identischen Rezepturen schwankten die Ergebnisse je nach Mischart in dem nachfolgend an Beispielen skizzierten Bereich.

Tabelle 9.1: Übersicht über verschiedene Mischarten

Mischart	Mischstufe				Mörtel		
	Leim		Mörtel		Ausbreitmaß [cm]	Rechn. LP-Geh. [Vol.-%]	7d-Druckfestigkeit [N/mm ²]
	Wirbler	Topf	Wirbler	Topf			
M1	1	1	1	1	14,72	31,51	10,51
M2	2	2	1	1	14,46	33,71	8,34
M3	2	2	2	2	10,65	18,67	23,13
M4	-1	1	-1	1	14,51	31,03	11,82
M5	-2	2	-1	1	14,34	31,34	10,46

Trotz der unterschiedlichen Mischarten ergab sich jedoch ein linearer Zusammenhang zwischen dem LP-Gehalt und der Druckfestigkeit (s. Bild 9.5).

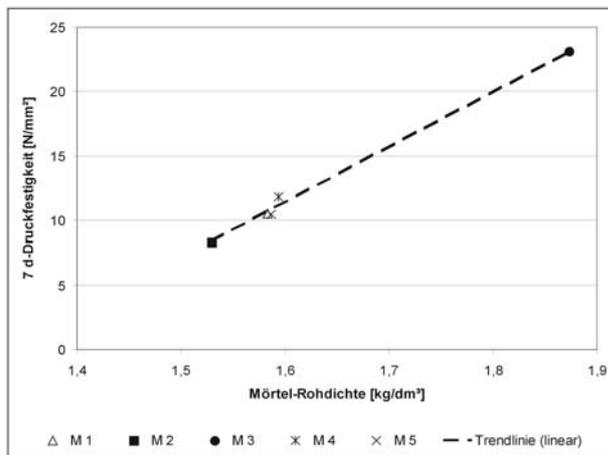


Bild 9.5: Relation von Rohdichte und Druckfestigkeit bei Mörtel mit unterschiedlichen Mischarten

Neben den Mischeinflüssen ist der zentrale Faktor für die Menge und Struktur der eingeführten Poren die Dosierung des Schaummittels. Hierzu wurden umfangreiche Versuche vorgenommen, um die erzielbaren Luftgehalte, die Reproduzierbarkeit der Mörtel Eigenschaften sowie die resultierenden Matrixfestigkeiten zu ermitteln.

Von besonderer Bedeutung für die späteren Betonversuche war es, einen Zusammenhang zwischen der Schaummitteldosierung und dem LP-Gehalt bzw. der Druckfestigkeit der Matrix herzustellen.

Bei den Versuchen konnte für die zwei verwendeten Schaumbildner auf Tensidbasis gezeigt werden, dass für den erreichten Luftgehalt bis zu einer Schaummittelmenge von 16 g/l Zugabewasser ein einfacher logarithmischer Zusammenhang besteht (vgl. Bild 9.6).

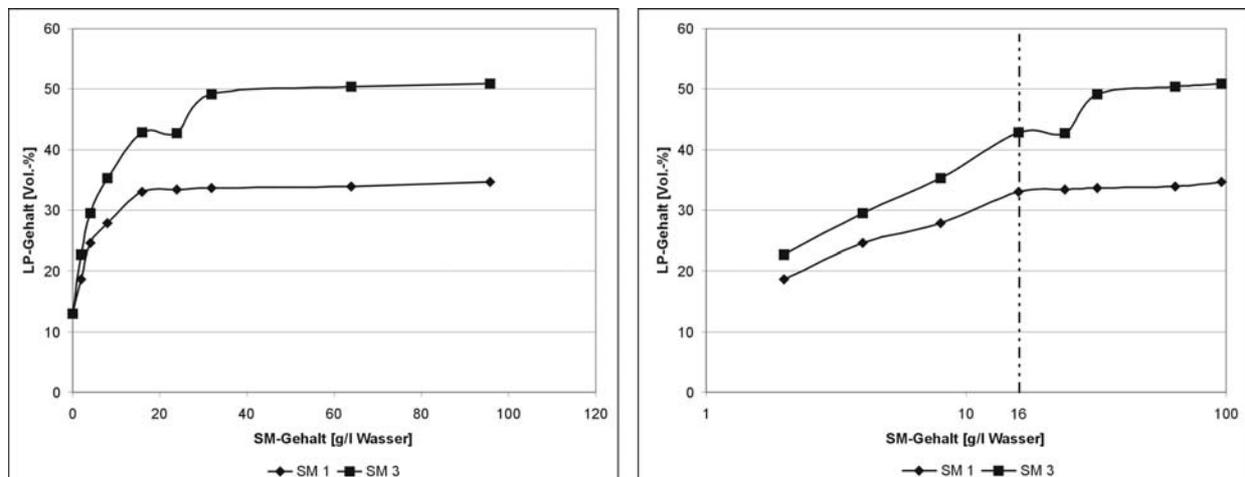


Bild 9.6: Zusammenhang zwischen Schaummitteldosierung und Mörtel-LP-Gehalt

Ein entsprechender Zusammenhang konnte auch für das Verhältnis zwischen Schaummitteldosierung und 7d-Druckfestigkeit gezeigt werden (Bild 9.7).

Mit der Möglichkeit, zielsicher Frischbeton-Luftgehalte von ca. 15 bis 40 Vol.-% einzustellen, sollte eine wesentliche Voraussetzung für die Herstellung von Konstruktionsleichtbetonen erfüllt sein, da so zu erwarten war, dass die Matrixeigenschaften auf die Korneigenschaften abgestimmt werden können.

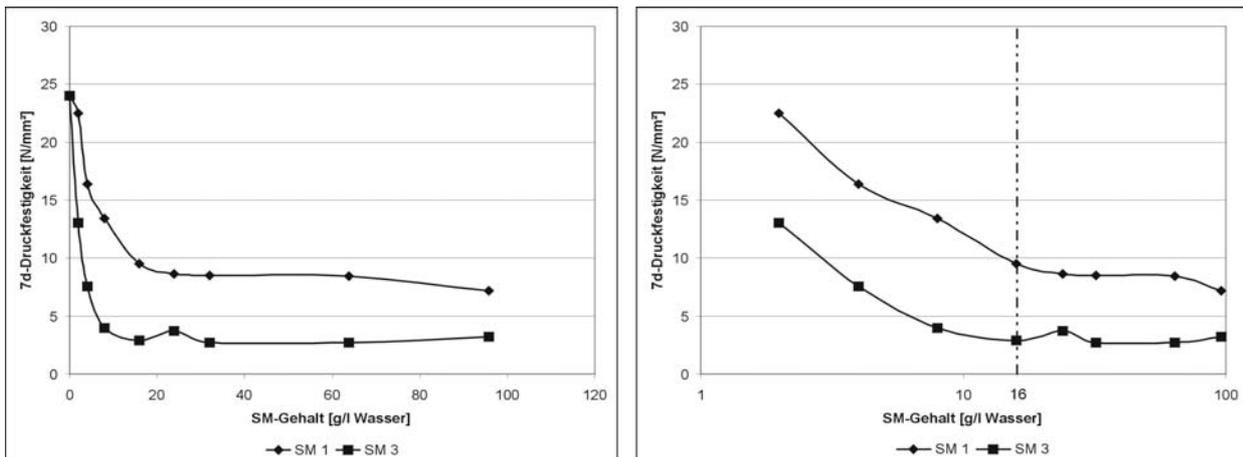


Bild 9.7: Zusammenhang zwischen Schaummitteldosierung und Mörtel-druckfestigkeit

9.4 Versuche zur Herstellung von Konstruktionsleichtbeton

9.4.1 Konstruktionsleichtbeton unter Zugabe separat hergestellter Schäume

Die bereits zuvor für die Matrix beschriebenen Schwierigkeiten, die sich bei Verwendung der separat hergestellten Schäume in Verbindung mit der höherfesten Matrix ergeben haben, wurden hier noch deutlich verstärkt. Bei Zugabe der vorgehästeten Leichtzuschläge zu der aufgeschäumten Matrix kam es zu Nachschäumeffekten, die sich nicht mehr zuverlässig beherrschen ließen. Vorgegebene Porenvolumina konnten also auf diesem Wege mit vertretbarem Aufwand und hinreichender Genauigkeit nicht erreicht werden.

Hier gibt es offensichtlich bisher nicht analysierte Wechselwirkungen zwischen den Frischmatrix- bzw. Frischbetoneigenschaften und dem Verhalten des Schaums, die zuvor bei Normalbetonrezepturen nicht gleichermaßen zu Tage getreten sind

9.4.2 Konstruktionsleichtbeton aus direkt aufgeschäumten Leimen

Bei den Betonversuchen wurden zunächst Matrices unterschiedlicher Rohdichten und somit Festigkeiten mit drei verschiedenen Blähton-Leichtzuschlägen mit ebenfalls unterschiedlichen Festigkeiten kombiniert. Dabei sollten für jeden der drei Zuschläge Relationen zwischen der Matrixfestigkeit und der Betonfestigkeit ermittelt werden (Bild 9.8). Da eine genaue Ermittlung der Matrixfestigkeiten im Festbeton nicht möglich war, wurden vor der Zugabe

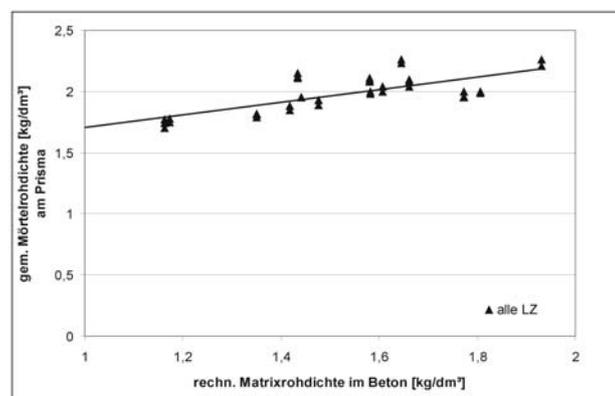


Bild 9.8: Relation zwischen rechnerischer Matrixrohddichte am Beton und gemessener Mörtelrohddichte am Prisma

des Leichtzuschlags von jeder Matrix gesonderte Probekörper hergestellt. Dieses Vorgehen hat allerdings den Nachteil, dass eine Veränderung der Matrix (z.B. Luftgehalt, etc.) durch die Zugabe des Leichtzuschlags und weiteres Mischen nicht berücksichtigt werden kann. Zur Plausibilitätskontrolle wurden daher zu jeder Leichtbetonmischung aus der Frischbetonrohddichte und dem vorgegebenen Volumenverhältnis zwischen Matrix und Leichtzuschlag (66:34 Vol.-%) eine Frischmatrixrohddichte errechnet, die mit der zuvor bestimmten Mörtelrohddichte verglichen werden konnte. Zwar traten dabei erhebliche Streuungen auf, prinzipiell war jedoch für jede Zuschlagart ein linearer Verlauf zu erkennen (vgl. Bild 9.8).

Betrachtet man nun die schon angesprochene Relation zwischen Matrix- bzw. Mörtelfestigkeit und Betonfestigkeit, erscheint zunächst kein Zusammenhang erkennbar (vgl. Bild 9.9).

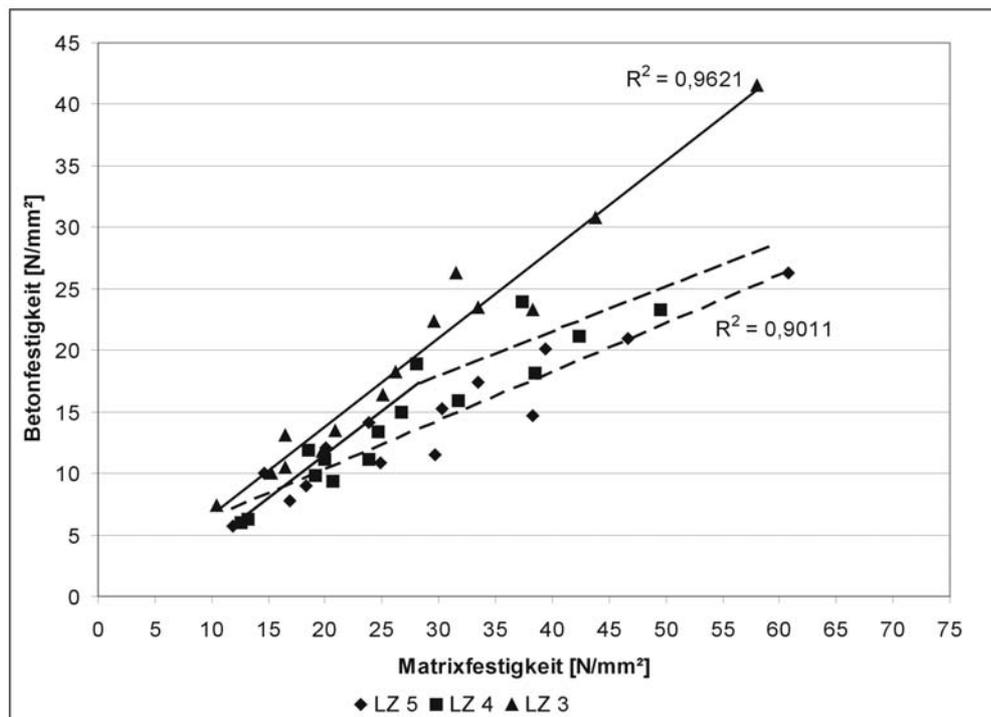
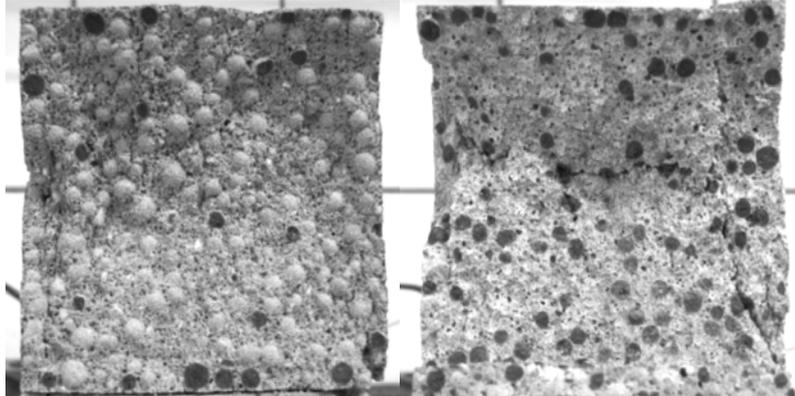


Bild 9.9: Relation zwischen der Mörtel- und der Betonrohddichte

Berücksichtigt man zusätzlich zu den vorliegenden Zahlenwerten auch die Bruchbilder der jeweiligen Probekörper, lassen sich deutliche Unterschiede im Versagensmechanismus des Konstruktionsleichtbetons feststellen. So weisen alle Proben aus dem relativ festen Leichtzuschlag LZ 3 ausnahmslos ein Matrix- bzw. Verbundversagen auf. Die Kornfestigkeit wird also in keinem Fall erreicht, so dass die Matrixfestigkeit die allein bestimmende Größe für die Betonfestigkeit ist. Daraus ergibt sich, dass die Probekörper dem Bereich 1 (vgl. Bild 9.1) zuzuordnen sind. Es liegt also ein linearer Zusammenhang vor (vgl. Bild 9.9).

Im Gegensatz dazu, weisen die Probekörper mit LZ 5 mit Ausnahme der schwächsten verwendeten Matrix immer ein Kornversagen auf. Dieses deutet darauf hin, dass auch für diese Testergebnisse ein linearer Zusammenhang besteht, jedoch mit deutlich geringerer Steigung (Bereich 2/3 aus Bild 9.1).

Weniger eindeutig sind die Bruchbilder bei LZ 4. Hier treten sowohl Matrixversagen bei den weniger festen Matrices als auch Kornversagen bei den festeren Matrices auf (vgl. Bild 9.10). Eine genauere Analyse der Bruchbilder ergibt, dass für Matrixfestigkeiten in der Größenordnung von 28 N/mm² (10er Würfel) ein indifferentes Bruchbild vorliegt (vgl. Bild 9.11), das sowohl Kornversagen als auch ein Verbund-/Matrixversagen aufweist.



*Bild 9.10: Probekörper mit LZ 4
links: Matrixversagen bei geringer Mörtelrohichte
rechts: Kornversagen bei hoher Mörtelrohichte*

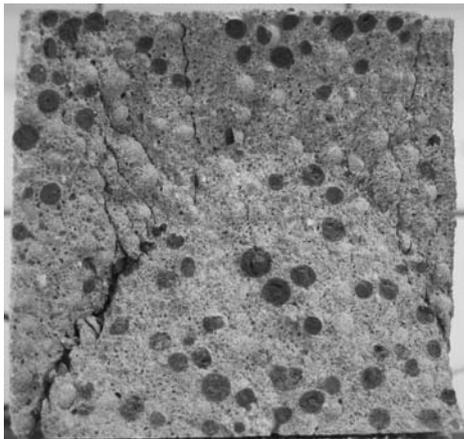


Bild 9.11: Probekörper mit LZ 4, Korn- u. Matrix-/ Verbundversagen

Diese Ergebnisse legen einen bilinearen Verlauf der Relation von Matrix- und Leichtbetonfestigkeit nahe (vgl. Bild 9.9). Diese These wird gestützt durch Ergebnisse aus anderen Untersuchungen an herkömmlichen Leichtbetonen [Schütz-70].

Die in den eigenen Untersuchungen auftretende zuschlagabhängige Parallelverschiebung der Gerade in Bereich 1 (vgl. Bilder 9.1 und 9.9) ist auf die Veränderungen der Matrix gegenüber dem geprüften Mörtel zurückzuführen, die sich bei Zugabe des Leichtzuschlages ergibt. Wie im folgenden Kapitel geschildert, kommt es dabei zu unterschiedlichen Beeinflussungen des Luftgehaltes, die auch z. T. für die vorliegenden Streuungen verantwortlich sind.

Wertet man die Grafik 9.9 im Hinblick auf die Ziele des Forschungsvorhabens aus, sind die eingeführten Luftgehalte für LZ 3 in allen Fällen zu hoch. Die Tatsache, dass in jedem Fall ein Matrixversagen stattfindet zeigt, dass die Matrix zu stark geschwächt wurde. Leichtzuschläge solch hoher Festigkeiten sind also für den gewählten Ansatz nicht günstig. Bei leichteren und damit weniger festen Leichtzuschlägen ist es durchaus möglich, über den Luftgehalt der Matrix den Versagensmechanismus des Konstruktionsleichtbetons zu steuern. Die bislang genutzten Verfahren zum Lufteintrag waren allerdings noch nicht geeignet, in Verbindung mit Leichtzuschlägen die erforderlichen Luftgehalte und Porenstrukturen in der Matrix einfach, zuverlässig und mit hinreichender Genauigkeit zu erreichen.

9.5 Aufgetretene Probleme

Ein Kernproblem besteht darin, dass die Matrixfestigkeiten trotz einer höherfesten Ausgangsrezeptur schon bei einem Porenvolumen von 10 – 15 Vol.-% deutlich stärkere Festigkeitseinbußen erfahren als angenommen. Da sich außerdem Schwierigkeiten bei der zielsicheren Einstellung von Luftgehalten und Porenstrukturen im Konstruktionsleichtbeton ergeben, reduziert dieser sehr rapide Festigkeitsabfall nicht nur die erwarteten technischen Vorteile, sondern führt auch zu einer großen Streuung in den Ergebnissen.

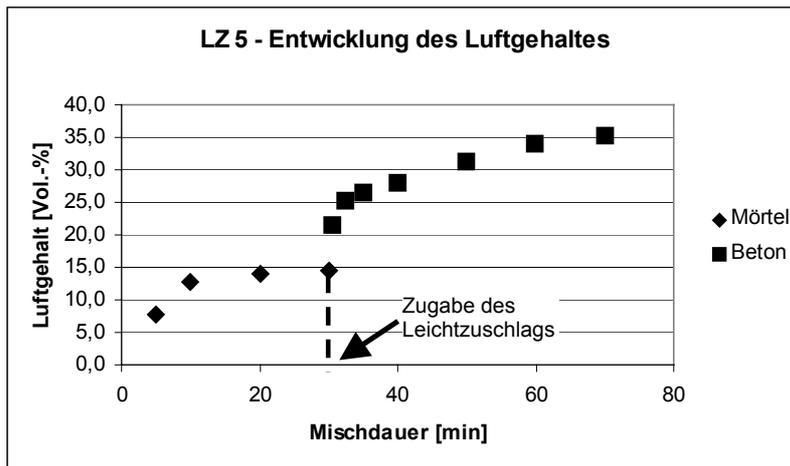


Bild 9.12: Nachschäumeffekte bei Zugabe von Leichtzuschlag

aufgeschäumten Leimen bzw. Mörteln in Verbindung mit Leichtzuschlägen beobachtet wurden. Um den Einfluss zu verdeutlichen, wurde in einzelnen Versuchen die Mischzeit deutlich verlängert und in regelmäßigen Abständen der Luftgehalt bestimmt. Das exemplarische Ergebnis eines solchen Versuches ist in Bild 9.12 wiedergegeben. Versuche unter Zugabe eines anderen Fließmittels (Naphthalinsulfonat statt Polycarboxylatether) haben bezüglich des Nachschäumens deutlich günstigere Ergebnisse geliefert. Allerdings führte dieses FM zu einer steiferen Konsistenz bzw. erforderte eine höhere FM-Dosierung.

Im Rahmen der Untersuchungen ist aufgefallen, dass sich Luftporen oftmals verstärkt an der Grenzflächen zwischen Zuschlagkörnern und Matrix ansiedeln (vgl. Bild 9.13). Bei genaueren Betrachtung der Probekörper stellte sich heraus, dass speziell die Unterseiten der Zuschlagkörner (bezogen auf die Lage der Probekörper beim Betonieren) gehäuft solche Porenansammlungen aufwiesen. Auch bei der Analyse der Bruchflächen konnte festgestellt werden, dass Bruchflächen senkrecht zur Einfüllrichtung des Betons erheblich häufiger Matrixversagen aufwiesen als solche mit anderer Orientierung

Während sich für den Leim alleine relativ präzise Luftgehalte einstellen und die Mörteluntersuchungen ebenfalls praktikable Ergebnisse liefern, führt die Zugabe von Leichtzuschlag zum Teil zu erheblichen Veränderungen des Luftgehalts. In der Regel handelt es sich hier um Nachschäumeffekte, die sowohl bei der Verwendung von separat hergestellten Schäumen als auch bei direkt

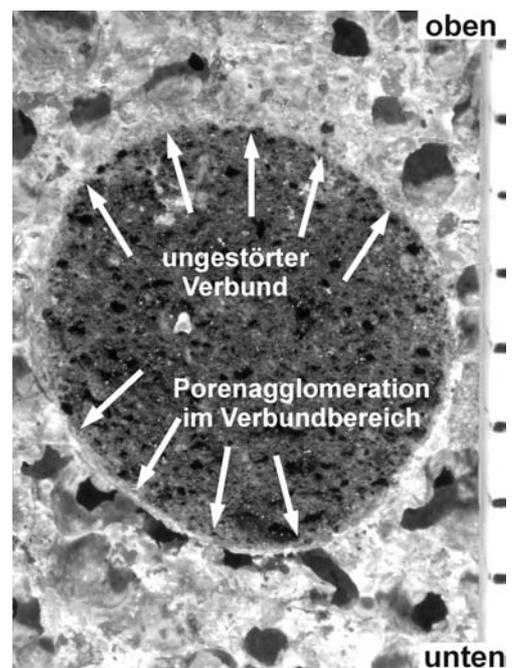


Bild 9.13: Porenagglomeration an einer Korngrenze

(vgl. Bild 9.14). Das deutet darauf hin, dass trotz der angestrebten und erreichten Frischbetoneigenschaften (kein Luftverlust, guter Zusammenhalt, kaum Entmischungen), offensichtlich in der ersten Zeit nach dem Betonieren in geringem Maße Luftporen in der Matrix aufsteigen bis sie auf die Unterseite eines Zuschlagkorns treffen. Die daraus resultierenden Porenagglomerationen bewirken eine Verbundschwächung an der Unterseite der Leichtzuschlagkörner. Dieser Effekt führt zu einer Entlastung des Korns und zu einer höheren Matrixbelastung, weshalb die Matrix früher versagt.

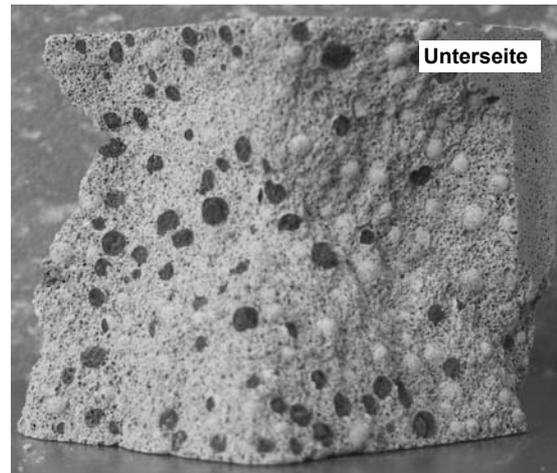


Bild 9.14: Unterschiedliche Versagensarten in Abhängigkeit von der Orientierung der Bruchfläche

9.6 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Anpassung der Matrix an die Eigenschaften der Leichtzuschlagkörner durch die Zugabe von Luft ist möglich. Auf Grund der sehr starken Festigkeitsabnahme der Matrix bei Zugabe von Luft ist diese Vorgehensweise jedoch nur für sehr leichte Leichtzuschläge mit geringen Festigkeiten sinnvoll. Für festere Leichtzuschläge wird schon bei geringen Luftgehalten die Matrixfestigkeit so stark herabgesetzt, dass stets ein Matrixversagen auftritt. Für Leichtzuschläge mit einer Kornrohddichte bis ca. 1000 kg/m^3 konnten aber in den Versuchen Leichtbetone hergestellt werden, die je nach Luftgehalt in der Matrix entweder Matrixversagen oder Kornversagen zeigten.

Obwohl bei Mörteln und bei vorangegangenen Untersuchungen mit Normalzuschlag, bei denen Schaum als Ersatz für konventionelle LP-Mittel diente [Lohaus-00], die Lufteinstellung präzise möglich war, ist es bislang nicht gelungen, die Matrixanpassung an die Leichtzuschläge zielgenau vorzunehmen. Ein angestrebtes Porenvolumen sowie eine erforderliche Porenstruktur (Größe und Verteilung) während des Mischprozesses mit ausreichender Genauigkeit zu kontrollieren bzw. einzustellen, erwies sich als extrem schwierig. Die zahlreichen Einflussparameter (Mischer, Mischdauer, Mischintensität, chemische und physikalische Wechselwirkungen zwischen den Betonbestandteilen, Temperatur, etc.) konnten zwar z. T. erkannt, ihre Wirkung jedoch nicht systematisch qualitativ und quantitativ erfasst werden.

Trotz sehr guter Frischbetoneigenschaften mit guter Verarbeitbarkeit und ohne erkennbares Entmischen oder Entlüften, ist es in der ersten Phase nach der Probekörperherstellung offensichtlich in geringem Maße zu einem Aufsteigen von Luftporen gekommen. Diese wurden an den Kornunterseiten aufgehalten, was dort zu Porenagglomerationen führte. Durch diese Porenagglomerationen kommt es zu einer Entlastung des Korns und einer höheren Matrixbelastung, die zu einem früheren Matrixversagen führt. Daraus ergibt sich das Problem, dass neben einer Anpassung der Matrixeigenschaften an die Korneigenschaften hinsichtlich des

Zusammenwirkens im Festbeton auch eine Abstimmung im Frischbeton erforderlich ist. Dieses ist aber mit der gegenwärtigen Schaumtechnologie nicht mit hinreichender Genauigkeit zu erreichen. Weiterhin werfen derartige Porenagglomerationen die Frage auf, ob es gerechtfertigt ist, Konstruktionsleichtbeton mit porosierter Matrix als 2-Stoff-System zu betrachten. Bei Auftreten größerer Poren oder Porenagglomerationen können diese offensichtlich nicht mehr im Rahmen einer homogenen Matrix beschrieben werden. Hier muss das Verhältnis der Porendurchmesser zu den Korndurchmessern zusätzlich abgestimmt werden.

Für die weitere Forschung ergibt sich die zentrale Aufgabe, ein Verfahren zum Einbringen von Mikroluftporen in den Beton zu entwickeln, das auch bei nachgeschalteten Mischvorgängen ein zielsicheres Erreichen angestrebter Porenvolumina und -strukturen ermöglicht. Gelingt dieses, scheint nach bisherigem Erkenntnisstand ein betontechnologischer Nutzen im zuvor skizzierten Rahmen möglich.

Zukünftige Anwendungsbereiche für diese Technologie sind in vielen Bereichen des Bauwesens und darüber hinaus denkbar. Dieses gilt sowohl für innovative Verbesserungen der Konstruktionsleichtbetone in klassischen Anwendungsfeldern wie dem Wohnungsbau, als auch für gänzlich neue Anwendungsfelder. Denkbar ist beispielsweise die Entwicklung sehr leichter stoßabsorbierender Betonbauteile, die in der Lage sind, durch ihr Verformungsverhalten eine vorgegebene Menge kinetischer Energie aufzunehmen. Damit können Probleme des Anprallschutzes, z.B. auf Autobahnen bzw. in Autos durch extrem leichte Betonbaustoffe entschärft werden. Eine Anwendung ist auch im Schiffbau denkbar, da moderne Tanker heute mit einer doppelten Außenhaut hergestellt werden müssen. Auch zwischen diesen Häuten kann ein mineralischer stoßabsorbierender Leichtbeton zur Sicherheit beitragen.

9.7 Projektförderung

Das vorliegende Forschungsprojekt wird auf Antrag des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AIF) gefördert.

9.8 Literatur

- [Faust-03] Faust, T.: Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Verlag Ernst & Sohn, 2003
- [Grübl-79] Grübl, P.: Druckfestigkeit von Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Beton 29, Heft 3, S. 91-95, 1979
- [Husmann-03] Husmann, I.: Gezieltes Einbringen fein verteilter , geschlossener Luftporen in Zementmörtel. Studienarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2003

- [Husmann-04] Husmann, I.: Konstruktionsleichtbeton – Einflüsse poröser Zuschläge und einer porosierten Matrix auf Frisch- und Festbetoneigenschaften. Diplomarbeit, Institut für Baustoffe, Universität Hannover, 2004
- [Käßner-83] Käßner, B.; Skwirblies, S.: Zum Problem der Leichtzuschlagstoff-Festigkeit. baustoffindustrie, Heft 2, S. 44-46, 1983
- [Lohaus-00] Lohaus, L.: Anwendbarkeit vorgeschäumter Luftporen im Betonbau. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben DBV 218, Lehrstuhl für Baustoffe und Massivbaukonstruktionen, Ruhr-Universität Bochum, 2000
- [Oruc-00] Oruc, M.: Vorgeschäumte Luft als zusätzliche Betonkomponente zur Herstellung von Konstruktionsleichtbeton und hochfestem Leichtbeton. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baustoffe und Massivbaukonstruktionen, Ruhr-Universität Bochum, 2000
- [Schütz-70] Schütz, F. R.: Der Einfluß der Zuschlagelastizität auf die Betondruckfestigkeit. Dissertation Aachen 1970.
- [Thomsen-99] Thomsen, S.: Vorgeschäumte Luftporen im Betonbau als Ersatz konventioneller LP-Mittel. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baustoffe und Massivbaukonstruktionen, Ruhr-Universität Bochum, 1999
- [Werkhäuser-02] Werkhäuser, K.: Beziehung zwischen Mörtel- und Leichtbetondruckfestigkeit bei kombinierter Korn- und Matrixporigkeit. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baustoffe und Massivbaukonstruktionen, Ruhr-Universität Bochum, 2002
- [Wesche-60] Wesche, K.: Die Bedeutung der Zementleimvormischung für die Praxis der Betonherstellung. Beton- und Stahlbetonbau, 55. Jahrgang Heft 11, S. 252-257, 1960