

Liapor GmbH & Co.KG
Industriestraße 2
91352 Hallerndorf



**„Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung einer neuen Art
leichter Gesteinskörnung unter Einbindung von Flug- und
Holzverbrennungsaschen mit erheblichen Potenzial zur
Energiekosteneinsparung
„LiaCem“**

Abschlussbericht über ein FuE-Projekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen AZ: 26559, Referat 21/2 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von:

Herr Wolfgang Fuchs

Februar 2010

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az 26559	Referat 21/02	Fördersumme	110.000,00 €
-----------------	----------------------	-------------	---------------------

Antragstitel „LiaCem“ – „Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung einer neuen Art leichter Gesteinskörnung unter Einbindung von Flug- und Holzverbrennungaschen mit erheblichen Potenzial zur Energiekosteneinsparung“

Stichworte Verfahren, Gesteinskörnung, Flug- und Holzverbrennungaschen, Energiekosteneinsparung

Laufzeit 15 Monate	Projektbeginn 11.08.2008	Projektende 11.11.2009	Projektphase(n) I
------------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------

Bewilligungsempfänger	Zwischenberichte mit den Mittelanforderungen Liapor GmbH & Co. KG Industriestraße 2 91352 Hallarndorf	Tel 09545/448-0 Fax 09545/448-80 Projektleitung Wolfgang Fuchs Bearbeiter Wolfgang Fuchs
------------------------------	--	---

Kooperationspartner Liapor GmbH & Co. KG ist alleiniger Antragssteller bzw. Bewilligungsempfänger

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die Liapor GmbH & Co. KG produziert Liapor-Blähton, der u.a. zu wärmedämmenden Leichtbeton weiterverarbeitet wird. Trotz effektiven Produktionsverfahrens ist Blähton als wichtiger Zuschlagsstoff für Beton im Wettbewerb zu Kies deutlich teurer. Ausgangslage war somit der Versuch, ein gleichwertiges aber in der Produktion wesentlich kostengünstigeres Produkt herzustellen. Die Grundidee war hierbei, verschiedene Aschen als neue Zuschlagsstoffe zu verwenden, indem die Bindekraft des in der Asche von Biomasse enthaltenen Kalks gemeinsam mit puzzolanen Eigenschaften aus z.B. Steinkohleflugaschen und Ziegelmehl genutzt wird, um ein neues Produkt - Liacem – als leichte Gesteinskörnung herzustellen.

Die Zielsetzung besteht nun darin, bei der Herstellung des neuen Produktes LiaCem den Einsatz thermischer Energie in der Größenordnung von ca. 75% gegenüber der bisherigen Produktion des natürlichen Zuschlagstoffes Liapor zu reduzieren. Durch die Einbindung der Aschen werden darüber hinaus weitere umweltrelevante Ziele erreicht, so dass insgesamt natürliche Rohstoffe gravierend geschont werden und durchschlagende Energiekosteneinsparungen zu realisieren sind:

- Erhebliche Reduzierung des Einsatzes thermischer Energie
- Sinnvolle stoffliche Verwertung von Aschen statt Deponierung
- Substitution knapp werdender natürlicher Rohstoffe (Kies, Ton, Kalk)
- Reduzierung der Menge des CO₂-Emittenten Zement
- Gewichtsreduzierung in der Konstruktion von Bauteilen
- Reduzierung Transportkosten durch Gewichtsreduzierung des Normalbetons

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Rahmen des Förderprojektes war geplant, die positiven Ergebnisse aus ersten Labor-Versuchen in den Technikumsmaßstab umzusetzen.

Im ersten Schritt wurden die Analyse und das Grundkonzept erstellt. Im Labormaßstab wurde als aussichtsreiche Referenzrezeptur ein Zuschlagsverhältnis von 8% Zement, 27% Flugasche, 30% Holzasche und 35% gebrannter Ton entwickelt und die prinzipielle Machbarkeit erwiesen. Nunmehr war im Feintuning die optimale Rezeptur zu finden. Während das Deutsche Institut für Bautechnik die Zulassungs-

prüfung der leichten Gesteinskörnung „LiaCem“ der Korngröße 2/10 mm veranlasste, wurde das Herstellverfahren entwickelt. Dazu wurden zwei Linien untersucht: a) eine zu modifizierende vorhandene Anlage und b) ein Herstellverfahren mit einem Chargenmischer.

Folgende Arbeiten wurden in nachfolgende Phasen sowie Arbeitspakete unterteilt:

Phase I: Vorbereitungsphase und Rezepturentwicklung

Arbeitspaket 1: Analyse und Konzeption

Arbeitspaket 2: Eingrenzung repräsentativer Rezepturen zur Entwicklung einer optimalen Rezeptur, Pflichtenheft

Phase II: Entwicklung Herstellverfahren

Arbeitspaket 3: Entwicklung Herstellverfahren

Arbeitspaket 4: Make or Buy Analyse

Arbeitspaket 5: Fertigung eigener Komponenten

Arbeitspaket 6: Entwicklung Steuerung und Regelung

Phase III: Prototypenphase, Rezepturentwicklung im Technikumsmaßstab, Pilotbetrieb bei Kunden

Arbeitspaket 7: Aufbau Prototyp und interne Testreihen

Arbeitspaket 8: Pilotanlage/Kundenversuche

Phase IV: Verfahrensoptimierung, Projektabschluss

Arbeitspaket 9: Abschließende Optimierung (2. Optimierungsschleife), technische Dokumentation

Ergebnisse und Diskussion

Erreichte Ergebnisse:

Die angestrebten Ziele wurden auf allen Ebenen voll erreicht. Mit Liacem wurde ein Produkt entwickelt, dass in bislang nicht gekannter Weise ökologisch in dem entsprechenden Marktsegment wirtschaftlich erfolgreich umgesetzt werden kann. Die Einsparungen an thermischer Energie und die dadurch erzielte Einsparung an freigesetztem CO₂ führen wie viele weitere Punkte zu sicheren Ergebnisbeiträgen in der Zukunft. Auch Einsparungen in den Liefergewichten der Produkte, die erhebliche Transportvorteile generieren, führen zu deutlichen Konkurrenzvorteilen. Die Produktion ist für Kleinserien in dem von uns durchgeführten Produktionsaufbau absolut beherrschbar und strukturiert. Erste Produktionsversuche bei schwierigen Konstruktionsteilen ergaben ebenfalls sehr positive Ergebnisse.

In einem zweiten Schritt werden Großserienproduktionsanalysen und -versuche im Mittelpunkt stehen.

Aufgetretene Probleme:

Produktionstechnische Modifikationen waren eine ständige Herausforderung. Es war ständig unser Ziel, mit einem Minimum an Kosten eine optimale Produktion sowie ein optimal verwertbares Endprodukt zu erzeugen. Ein hochwertiges Team war Grundlage für diesen, in kurzer Zeit, erzielten Erfolg.

Umweltrelevanz:

Auch hier muss man festhalten, dass Liacem alle Erwartungen, die wir zu Projektbeginn hatten, auf der Produktions- wie auf der Produktseite komplett erfüllt wurden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Veröffentlichungen und Vorträge sind durch die wissenschaftliche Begleitung durch das Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München geplant.

Fazit

Bei der Herstellung des neuen Produktes LiaCem kann der Einsatz thermischer Energie in der Größenordnung von ca. 75% gegenüber der bisherigen Herstellung von Liapor reduziert werden. Durch die Einbindung von Aschen werden weitere umweltrelevante Ziele erreicht. Insgesamt ist hinsichtlich der nun anlaufenden Markteinführung eine erhebliche Energiekosteneinsparung zu erwarten.

Inhaltsverzeichnis:

Projektkennblatt	2
Zusammenfassung	6
Einleitung	7
Hauptteil	8
<i>Arbeitsschritte, angewandte Methoden und erzielte Ergebnisse</i>	8
<i>Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung</i>	19
<i>Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse</i>	20
<i>Ausblick / Anschlussarbeiten</i>	20
Fazit	20

Zusammenfassung

Auf der Basis bestehender Anlagentechnik wurde eine innovative Anlage als Prototyp entwickelt und aufgebaut. Mit dieser Anlage besteht bereits die Möglichkeit, einige Kundenanforderungen zu erfüllen. Jedoch muss bei größerer Serienproduktion auf andere Produktionstechnik umgestellt werden. Der Chargenmischer lieferte für uns zunächst adäquate Produktionserkenntnisse.

Die Ziele der Projektphase I des Gesamtprojektes wurden erreicht.

Das Erreichen der angestrebten Ziele wird in den beiden Untersuchungsberichten des Instituts für Werkstoffe des Bauwesens - Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen bestätigt:

- „Untersuchungsbericht für den Antrag auf eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für: Leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ – Umweltverträglichkeit“

Ein möglicher Schadstoffeintrag durch die verwendeten Holzverbrennungsaschen findet nicht statt.

- Untersuchungsbericht „Leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ – Beton-technologie“:

Die Gesteinskörnung LiaCem erfüllt die vom Antragsteller im Antrag deklarierten Eigenschaften nach DIN EN 13055-1 in Verbindung mit DIN 20000-104.

Die mit LiaCem hergestellten Frischbetone zeichneten sich durch eine sehr gute Verarbeitbarkeit aus. Leichtbetone können mit der untersuchten Gesteinskörnung gezielt in den angestrebten Festigkeits- und Rohdichteklassen hergestellt werden.

Die leichte Gesteinskörnung ist auch für den Einsatz höherer Betonfestigkeitsklassen geeignet, wie anhand eines LC50/55 D2,0 nachgewiesen werden konnte. Das Potenzial der leichten Gesteinskörnung LiaCem ist mit der Festigkeitsklassen LC50/55 D2,0 noch nicht ausgeschöpft.

Die vorliegenden Ergebnisse sprechen dafür, dass die leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ in den Anwendungsbereichen Beton, Stahlbeton und Spannbeton nach DIN 1045-1 [Lit 4] verwendet werden kann. Sie ist geeignet für Beton, der den Expositionsklassen XF3 und XF4 nach DIN EN 206-1 [Lit 8, Lit 9, Lit 10] ausgesetzt ist (siehe Bericht in der Anlage).

Damit werden auch die umweltrelevanten Ziele (Erhebliche Reduzierung des Einsatzes thermischer Energie, sinnvolle stoffliche Verwertung von Aschen statt Deponierung, Substitution knapp werdender natürlicher Rohstoffe (Kies, Ton, Kalk), Reduzierung der Menge des CO₂-Emittenten Zement, Gewichtsreduzierung in der Konstruktion von Bauteilen sowie Reduzierung Transportkosten durch Gewichtsreduzierung des Normalbetons erreicht.

Die Ergebnisse der ersten Phase haben insoweit neue Erkenntnisse gebracht, dass eine zielgerichtete Umsetzung (Phase II) auch in den industriellen Maßstab möglich sein wird.

Einleitung

Die Liapor GmbH & Co.KG produziert den Liapor-Blähton, der unter anderem in Betonwerken zu Leichtbeton weiterverarbeitet wird. Dabei werden insbesondere das geringe Gewicht wie auch die gut wärmedämmenden Eigenschaften des Blähtons genutzt. Obwohl das effektive Produktionsverfahren erreicht, dass nur ein Kubikmeter Rohton notwendig ist, um drei Kubikmeter Liapor herzustellen, ist Blähton als wichtiger Zuschlagsstoff für Beton im Wettbewerb zu Kies deutlich teurer. Ausgangslage war somit der Versuch, ein in den geforderten Eigenschaften gleichwertiges aber in der Herstellung wesentlich kostengünstigeres Produkt herzustellen. Die Grundidee war hierbei, verschiedene Aschen als neue Zuschlagsstoffe zu verwenden, indem die Bindekraft des in der Asche von Biomasse enthaltenen Kalks gemeinsam mit puzzolanen Eigenschaften aus z.B. Steinkohleflugaschen und Ziegelmehl genutzt wird, um ein neues Produkt - Liacem – als leichte Gesteinskörnung herzustellen.

Ist Liapor-Blähton als natürlicher Zuschlagsstoff für sich genommen als umweltfreundliches Produkt zu werten, bestand die Zielsetzung, bei der Herstellung des neuen Produktes Liacem den Einsatz thermischer Energie in der Größenordnung von ca. 75% gegenüber der bisherigen Herstellung von Liapor zu reduzieren.

Durch die Einbindung der Aschen sollten darüber hinaus weitere umweltrelevante Ziele erreicht werden, so dass insgesamt natürliche Rohstoffe gravierend geschont werden und durchschlagende Energiekosteneinsparungen zu erwarten sind:

- Erhebliche Reduzierung des Einsatzes thermischer Energie
- Sinnvolle stoffliche Verwertung von Aschen statt Deponierung
- Substitution knapp werdender natürlicher Rohstoffe (Kies, Ton, Kalk)
- Reduzierung der Menge des CO₂-Emittenten Zement
- Gewichtsreduzierung in der Konstruktion von Bauteilen
- Reduzierung Transportkosten durch Gewichtsreduzierung des Normalbetons

Im Rahmen des Förderprojektes war geplant, die Ergebnisse aus den Labor-Versuchen in den Technikumsmaßstab (Phase I) umzusetzen.

Die angestrebten Verbesserungen/Einsparungen sollten die umweltrelevanten Themen Beton/Zement, Stoffliche Verwertung von Aschen sowie die erhebliche Reduzierung des Einsatzes thermischer Energie betreffen

Dieser Abschlussbericht bezieht sich auf die erste Phase des Projektes.

Hauptteil

Arbeitsschritte, angewandte Methoden und erzielte Ergebnisse

Im ersten Schritt wurden die Analyse und das Grundkonzept erstellt. Im Labormaßstab wurde als aussichtsreiche Referenzrezeptur ein Zuschlagsverhältnis von 8% Zement, 27% Flugasche, 30% Holzasche und 35% gebrannter Ton entwickelt und die prinzipielle Machbarkeit erwiesen. Im Rahmen des Förderprojektes war im Feintuning die Rezeptur zu verfeinern, um die optimale Zusammensetzung zu finden. Während das Deutsche Institut für Bautechnik die Zulassungsprüfung der Leichten Gesteinskörnung „Liacem“ der Korngröße 2/10 mm veranlasste, wurde das Herstellverfahren entwickelt. Dazu wurden zwei Linien untersucht: a) eine zu modifizierende vorhandene Anlage und b) ein Herstellverfahren mit einem Chargenmischer. Im Folgenden wurde eine Technikumsanlage aufgebaut und getestet. Schließlich wurden Feldtests unter realen Produktionsbedingungen zur Validierung bei einem Kunden durchgeführt.

Konkret wurden entlang der in der Antragsstellung aufgestellten Arbeitspakete folgende Arbeiten mit folgenden Ergebnissen ausgeführt:

Arbeitspaket 1: Analyse und Konzeption:

- Systematisierung der durch die Laborversuche bekannten chemischen und physikalischen Eigenschaften der zu verwendenden Stoffe
- Weitere Recherchen zu den möglichen Bezugsquellen (Aschen) und deren Qualitäten
- Technische Recherchen zu den Herstellkomponenten (Verfügbarkeit, Neuentwicklungen etc.)
- Grobkonzept der Komponenten: Eingangskontrolle, Brechen und Sieben, Mischen/Granulieren, Lagern

Sichtung der Literatur

Im Vorfeld der ersten Probenahme galt es zu klären, welche Inhaltsstoffe in den Holzverbrennungsaschen in welchen Konzentrationen zu erwarten sind. Wichtig war in diesem Zusammenhang der hohe zu erwartende Gehalt an Schwermetallen, die sich im Waldholz über die Zeit angesammelt haben [Lit 3]. Auf die zu erwartenden Inhaltsstoffe [Lit 4, Lit 5, Lit 6] war die Analytik für die Eingangsuntersuchungen abzustimmen, um geeignete Holzverbrennungsaschen für die weiteren Arbeitsschritte zu selektieren. Wichtige Hinweise auf die zu überprüfenden Stoffe lieferte [Lit 1].

Eine Liste bayerischer Biomassekraftwerke mit Angabe der eingesetzten biogenen Festbrennstoffe wird von [Lit 2] zur Verfügung gestellt.

Analyse und Konzeption

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Aus den in der Literatur entnommenen Anforderungen wurde deutlich, dass der Umfang der Eingangsuntersuchungen erheblich über das Maß hinaus gehen muss, das für die Prüfung des für die Liapor-Produktion eingesetzten Tons erforderlich ist.

Die ersten beprobten Holzverbrennungsaschen waren sehr grob. Vor einer Verwendung für die LiaCem-Granalien mussten die Aschen zunächst in Laborbrechern aufbereitet werden.

Die bis dahin geprüften Aschen unterscheiden sich hinsichtlich der Verfügbarkeit, ihrer chemischen Zusammensetzung und dabei insbesondere des Gehalts der umweltrelevanten Stoffe.

In Tastversuchen wurde die Eignung der beprobten Holzverbrennungsaschen für die Herstellung von Granalien geprüft.

Literatur

Lit 1: Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur Bewertung der Auswirkung von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Entwurf, 2005

Lit 2: C.A.R.M.E.N. e.V: Internetauftritt: <http://www.carmen-ev.de>, 2008

Lit 3: Hartmann, H.; Böhm, T.; Maier, L.: Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Schriftenreihe „StMLU Materialien“, 154, Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen. München, 2000

Lit 4: Launhardt, T.: Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen. Dissertation, Technische Universität München, 2002

Lit 5: Obernberger, I.: Aschen aus Biomassefeuerungen – Zusammensetzung und Verwertung. In: VDI Bericht 1319: Thermische Biomassenutzung – Technik und Realisierung, S. 199 – 222, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1997

Lit 6: Schulze, D.: Charakterisierung von mineralischen Rückständen aus der Verbrennung nachwachsender Rohstoffe. Schlussbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben; Fraunhofer Institut für Holzforschung - Wilhelm-Klauditz-Institut (WKI). Braunschweig, 2002

Arbeitspaket 2: Eingrenzung repräsentativer Rezepturen zur Entwicklung einer optimalen Rezeptur, Pflichtenheft:

- Herstellung weiterer Rezepturen unter Variation der bewährten Laborergebnisse
- Erstellung eines detaillierten Pflichtenheftes auf der Basis der AP'e 1 und 2 (Anforderungen an die Rezepturen, Anforderungen an das Herstellverfahren)

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in diesem Berichtsabschnitt auf den experimentellen Arbeiten im Labor. Hier wurden zunächst die verschiedenen Holzverbrennungsaschen eingehend beprobt.

Mit den Aschen wurden verschiedene Rezepturvariationen für die Herstellung der Granalien getestet. Ziel der Variationen mit unterschiedlichen Gehalten an Asche, Bindemittel und Füllstoffen war es zunächst, das Granulierverhalten zu optimieren. Sobald die Granalien eine ausreichende Festigkeit erreichten, wurden erste technische Kennwerte (Schüttdichte, Kornrohdichte, Sieblinie, Kornfestigkeit) ermittelt. Diese Informationen dienten im Weiteren als Basis für die Festlegung einer optimalen Rezeptur.

Phase II: Entwicklung Herstellverfahren

In dieser Projektphase wurden von Liapor die verfahrenstechnischen Schritte bearbeitet. Daneben standen die Untersuchung der Varianten des Misch/Granuliertvorganges im Focus.

Arbeitspaket 3: Entwicklung Herstellverfahren:

- Entwicklung Konzept Eingangskontrolle
- Entwicklung Konzept Brechen/Sieben
- Entwicklung Konzept Mischen/Granulieren
 - Einstufiges Mischen plus Granulieren
 - Zweistufiges Verfahren mit vorgeschalteter Mischung und dann Granulierteller
 - Gravimetrische/volumetrische Dosierung, Form und Anordnung Werkzeuge etc.
- Konzept Lagerung
 - Witterungsschutz, Dauer, Erhärtingsbedingungen/-verhalten, Temperatur, ungeschütztes weiteres Erhärten etc.

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Der Schwerpunkt der internen Arbeiten lag in diesem Arbeitspaket auf der Erprobung der Fertigungsverfahren. Für die Aufbereitung der verschiedenen Holzverbrennungsaschen zeigten sich die in der Liapor-Produktion eingesetzte Brechertechnik als qualitativ und quantitativ geeignet. Die Aschen werden fein genug gebrochen, um im nachfolgenden Misch- und Granuliertprozess den enthaltenen Branntkalk aufzuschließen und dadurch eine Nutzung als Bindemittel zu ermöglichen.

Für die Eingangskontrolle der Bestandteile des LiaCem wurde zunächst ein Minimalprogramm definiert. Es umfasst die Kontrolle der Sieblinie, Schüttdichte, Chlorid, säurelöslichem Sulfat, Gesamtschwefel, freiem Kalk (CaO) und Gesamtkalk als CaO. Sollten beim angestrebten Zulassungsverfahren weitere Grenzwerte für sonstige Inhaltsstoffe definiert werden, so sind diese mittels geeigneter Analysemethoden zusätzlich – in entsprechendem Turnus - zu ermitteln.

Die im Labormischer frisch hergestellten Granalien waren zu empfindlich, um sie ungeschützt im Freien zu lagern. Ohne die Einhaltung kontrollierter Bedingungen während der Erhärtingsphase der Granalien – darunter sind Temperatur und Feuchte die ausschlaggebenden – sind nur maximale Schütthöhen von etwa 30 bis 40 cm möglich. Dabei ist ein Kompromiss zwischen Flächenbedarf, Zeit und Energiekosten zu finden. Die minimale Verweildauer in einer geschützten Umgebung ergibt sich aus der Minimalhärte der Granalien für die weitere Lagerung und das Umsetzen im Freien.

Im Labormaßstab erwies sich die Variante des einstufigen Mischens und Granulierens als sehr praktikabler Weg. In zahlreichen internen Versuchsreihen konnte die Anordnung der Mischwerkzeuge so angepasst werden, dass sie den speziellen Eigenheiten der LiaCem-Bestandteile gerecht werden. Als besondere Schwierigkeit stellte sich dabei die erste Phase des Mischprozesses heraus, in der die Eingangsstoffe homogenisiert werden müssen und zugleich für das Bilden von Granalienkeimen Sorge getragen werden muss. Die mit diesem Verfahren

produzierten Granalien hatten eine überzeugende Qualität. Die optimale Zusammensetzung konnte auf ein enges Fenster eingegrenzt werden. Damit war die Möglichkeit gegeben, Material für weiterführende Untersuchungen an der Universität der Bundeswehr auszuwählen.

Das Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München wurde mit der Durchführung der Prüfungen an den Granalien und damit hergestellten Leichtbetonen beauftragt. Inhalt der Versuche war:

Prüfung der Gesteinskörnung

- Kornfestigkeit,
- Kornzusammensetzung,
- Kornrohichte und Wasseraufnahme,
- Kornform,
- Raumbeständigkeit,
- Frost-Tausalz-Widerstand,
- Glühverlust,
- organische Bestandteile und
- Auslaugverhalten.

Prüfung am Leichtbeton

- Druckfestigkeit und Trockenrohichte,
- Druckelastizitätsmodul,
- Druckspannungs-Stauchungs-Linie,
- Spaltzugfestigkeit,
- Kriechen und Schwinden und
- Wassereindringtiefe.

Arbeitspaket 4: Make or Buy Analyse

- Entscheidung, was muss zugekauft werden, was kann selbst gefertigt oder an bestehenden Anlagen modifiziert werden?

Aus Zeit- und Kostengründen wurde eine vorhandene Anlage verwendet und modifiziert.

Eine komplette Neuinvestition schied für uns aus, da wir Potential durch Veränderungen an einer bestehenden Anlage sahen, die wir selbst besitzen. Diese Anlage steht auf unserem Betriebsgelände in Pautzfeld.

Auch waren die modifikationsbedingten Kosten durch Eigenleistungen günstig erreichbar. Dabei konnten wir im Wesentlichen auf unser qualifiziertes Eigenpersonal (Mechaniker, Elektriker etc.) bauen. Desweiteren konnten kleinere und größere Anpassungen und Veränderungen immer zeitnah und unmittelbar durchgeführt werden, was dem Ablauf des Projektes sehr zu Gute kam.

Auch die Überwachbarkeit sowohl der Anlage, als auch der Forschungsergebnisse führte dazu, dass wir diese Eigenlösung bevorzugten.

Arbeitspaket 5: Fertigung eigener Komponenten

Für die Herstellung der Granalien hat sich für die erste Ausbaustufe ein Pflugschar-Zwangsmischer (Bild 1) mit integrierten Schneidwerkzeugen als optimal herausgestellt.



Bild 1: Pflugscharmischer

Es mussten jedoch mehrere z.T. erhebliche Modifikationen an der bestehenden Anlage durchgeführt werden:

- Beispielsweise wurden die Mischwerkzeuge geändert, um entsprechende Entwicklungsergebnisse zu erzielen.
- Messer wurde modifiziert, so dass neben den Flachmessern auch Messer mit Tulpenform eingesetzt wurden.
- Die Antriebswelle (Mischerwelle) erhielt eine Selbstreinigungsfunktion, um Materialanbackungen zu verhindern.
- Aufgrund der Hydratationswärme, die aufgrund des Löschvorgangs beim Kalk entsteht, wurde eine Wassermantelkühlung integriert.
- Ein mobiler 1cbm Aufgabetrichter wurde selbst konstruiert und installiert.
- Aufgrund des hydratationswärmebedingten Wasserdampfs und Staubs wurde eine unterdruckbetriebene Absauganlage notwendig. Diese wurde ebenfalls selbst konstruiert.



Bild 2: Pflugcharmischer – Geometrie der Mischwerkzeuge



Bild 3: Pflugcharmischer –Aktueller Stand modifizierter Mischer

Eine deutliche Steigerung der Produktionskapazität kann erreicht werden, wenn dieser Mischer von der Granulierung entlastet wird. Dazu wird der Mischer nur noch für die eigentliche Homogenisierung verwendet. Die Granulierung erfolgt in einer zweiten Stufe auf Granuliertellern, wie sie zum Beispiel bereits für die Produktion von Liapor genutzt werden.

Die Granalien weisen nach dem Granulieren nur eine sogenannte Grünstandfestigkeit auf. Dies reicht zunächst für den weiteren werksinternen Transport aus. Die erzielte Festigkeit ist jedoch ohne den eigentlichen Erhärtungsprozess für die beabsichtigte Verwendung als leichte Gesteinskörnung unzureichend. Deshalb müssen die Granalien in einem Lager genug Zeit erhalten um infolge der nun ablaufenden hydraulischen Reaktion zu erhärten.

Die kostengünstigste Variante für die Phase der Erhärtung bietet eine einfache überdachte Lagerung. Eine Lagerung im Freien scheidet in der ersten Erhärtungsphase aus, da Regen und Schnee von den frischen Granalien fern gehalten werden müssen. Unter Dach können die Granalien in Ruhe die für die Auslieferung erforderliche Festigkeit entwickeln. Aus den Laborversuchen hat sich eine Mindestverweildauer von 90 Tagen als sinnvoll herausgestellt. Nach 90 Tagen ist die Festigkeitsentwicklung der Granalien weitgehend abgeschlossen und für den Versand fertig. Das Produkt wird also nicht unter Wert abgegeben. Zudem ist das mit der hydraulischen Reaktion verbundene Schwinden soweit abgeklungen, dass es sich nicht nachteilig auf die zeitabhängigen Verformungen (Kriechen und Schwinden) der mit LiaCem hergestellten Leichtbetone auswirkt.

Für die erste Phase der überdachten Lagerung muss die maximale Schütthöhe wegen der noch geringen Festigkeit der Granalien auf etwa 0,3 m begrenzt werden. Danach können die Granalien mit dem üblichen Verladegerät in Boxen im Freien verbracht werden.

Eine kostenintensivere, aber technisch vorteilhafte Lösung der Lagerung in der ersten Erhärtungsphase zeigt Bild . Der dargestellt Turm wird mit den noch grünen Granalien beschickt. Der mit erhöhter Temperatur einströmende Dampf sorgt für optimale - sogenannte hydrothermale – Verhältnisse. Unter diesen Bedingungen läuft die Erhärtung beschleunigt ab. Die Verweilzeit wird durch den Einsatz einer hydrothermalen Nachbehandlung drastisch verkürzt. Die erzielbare Festigkeit der Granalien kann gegenüber der zuvor beschriebenen Lagerung unter Dach nochmals um etwa 10 % gesteigert werden.

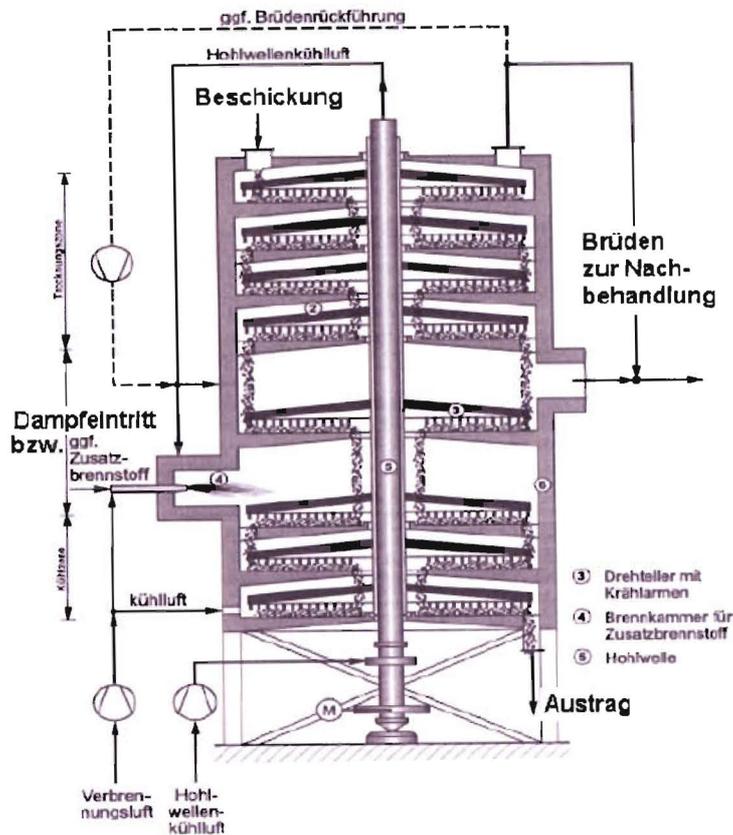


Bild 4: Darstellung einer hydrothermalen Nachbehandlung

Arbeitspaket 6: Entwicklung Steuerung und Regelung

Bei der im Eigentum stehenden Anlage wurden auch Modifikationen an Steuerung und Regelung notwendig, um die gewünschten produktionseffizienten Ergebnisse zu erzielen.

Beispielsweise wurden die Temperaturerfassung im Mischer und die Stromaufnahmeanzeige des Mixers verändert.

Ferner wurde von den Wasserdüsen aus technischen Gründen Abstand genommen, dafür ein oberer dreidüsiger Einsprühnebel installiert.

Auch die zur Abführung der entstehenden Wärme eingebaute Wassermantelkühlung musste entsprechend geregelt werden.

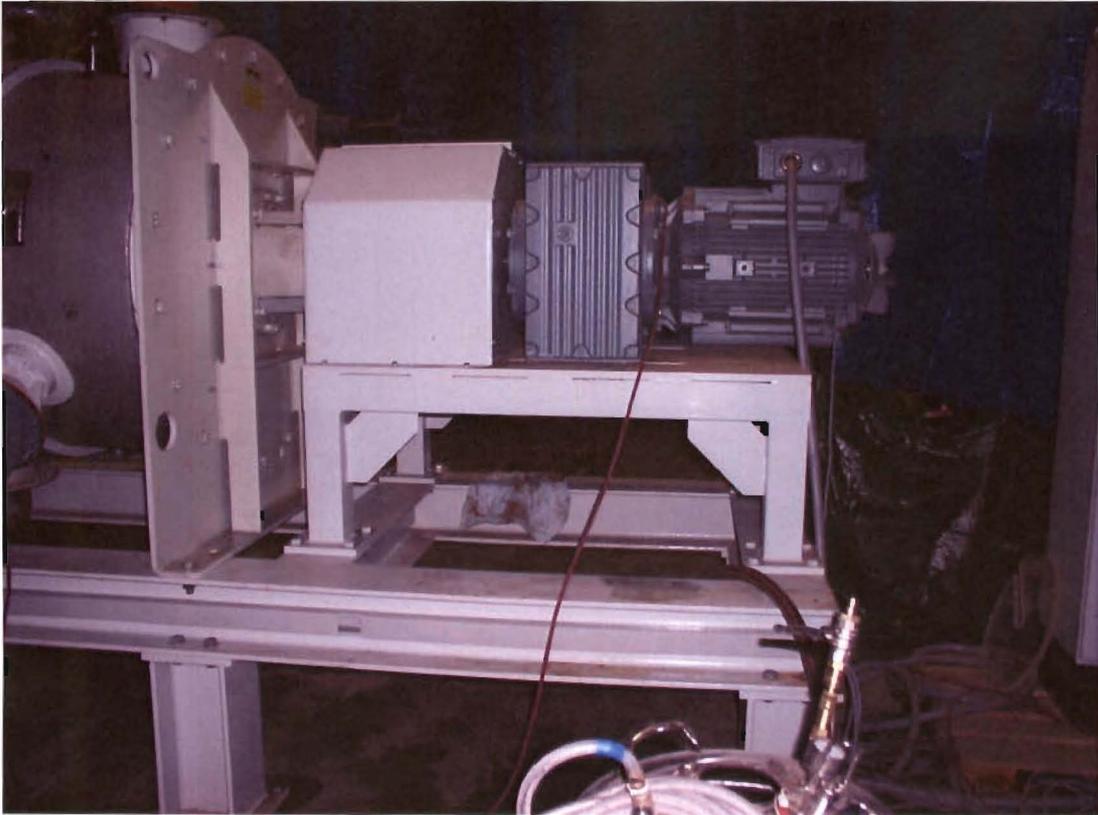


Bild 5: Pflugscharmischer –Erfassung Stromaufnahme (zur Erkennung, ob Granalien schon entstanden)



Bild 6: Pflugscharmischer – Veränderung der Wasserzufuhr / Umstieg auf Eindüsung

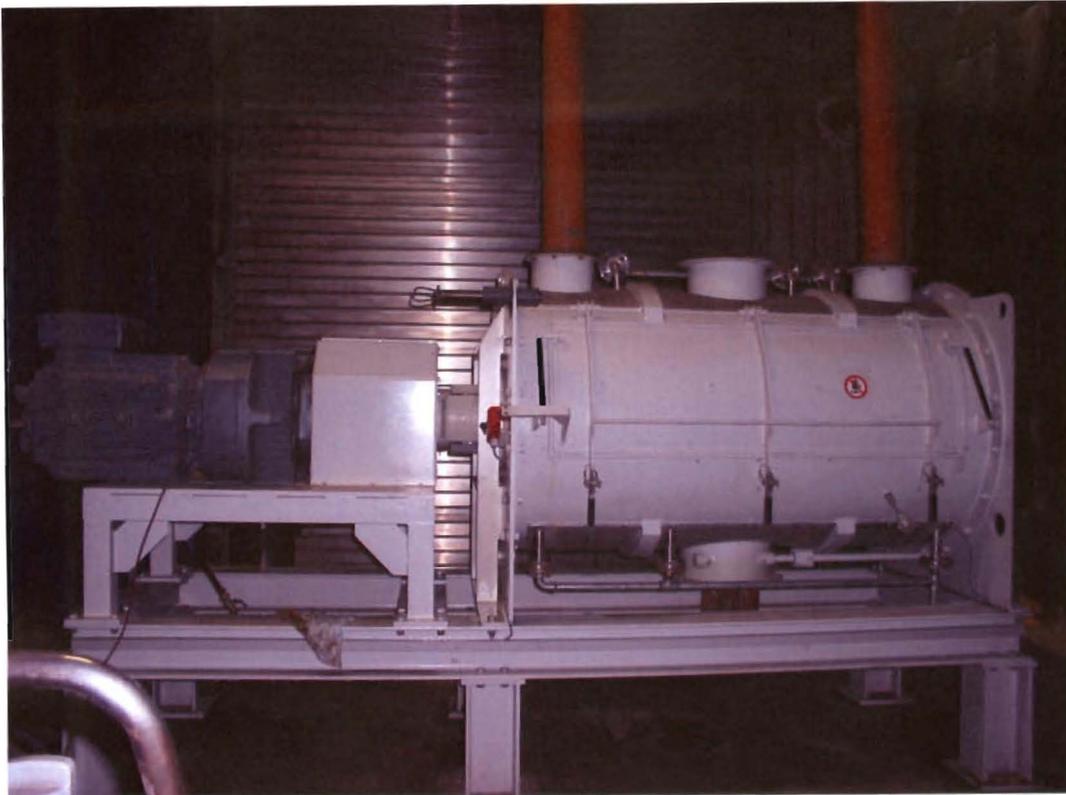


Bild 7: Pflugscharmischer – Entlüftung/Abzug/Mantelkühlung

Arbeitspaket 7: Aufbau Prototyp und interne Testreihen

- Aufbau Prototyp
- Interne und externe Testreihen/Rezepturen
- Analyse Anlagentechnik

Aufbau Prototyp:

Die bestehende Anlage wurde modifiziert, um die entsprechenden Ergebnisse zu erzielen. Hier verweisen wir auf das weiter oben Dargestellte.

Interne Testreihen/Rezepturen:

Es wurde eine Vielzahl von Testreihen durchgeführt.

Dabei stellte sich beispielsweise heraus, dass die gravimetrische Erfassung suboptimal war. Daher wurde auf die volumetrische Erfassung umgestellt.

Es wurde eine Datenbank aufgebaut. Diese wurde selbst programmiert. Hierbei werden über 400 Parameter erfasst und systematisch gepflegt.

Durch ausführliche multiple Regressionsrechnungen wurden auf diesem Wege die eingangsstoffabhängigen optimalen Rezepturen gefunden.

Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Die Untersuchungen am Institut für Werkstoff des Bauwesens der Universität der Bundeswehr München wurden weitgehend abgeschlossen. Die LiaCem-Granalien

erfüllten alle Anforderungen, die an eine Gesteinskörnung nach DIN EN 13055 gestellt werden. Aus bautechnischer Sicht hat sich das Produkt als sehr gut geeignet herausgestellt.

Die Kurzzeitprüfung am Leichtbeton wurden ebenfalls erfolgreich beendet. Die mit der leichten Gesteinskörnung LiaCem hergestellten Leichtbetone entsprachen in allen Punkten den Anforderungen der maßgebenden Betonnorm DIN 1045-2. Die leichte Gesteinskörnung LiaCem wird daher ohne Einschränkung für Leichtbetone bis zu einer Festigkeitsklasse LC50/55 genutzt werden können.

Die Ergebnisse Auslaugversuche gestatten eine Einstufung hinsichtlich der umweltrelevanten Freisetzung möglicher Inhaltsstoffe.

Die Kurzzeitprüfung am Leichtbeton wurden ebenfalls erfolgreich beendet.

Und auch die Langzeitprüfung am Leichtbeton wurden erfolgreich beendet. Die mit der leichten Gesteinskörnung LiaCem hergestellten Leichtbetone entsprechen in ihrem Kriech- und Schwindverhalten den Anforderungen der maßgebenden Betonnorm DIN 1045-2. Die leichte Gesteinskörnung LiaCem wird daher ohne Einschränkung für Leichtbetone bis zu einer Festigkeitsklasse LC50/55 genutzt werden können.

Die baustofftechnologischen Untersuchungen zur Eignung der leichten Gesteinskörnung „LiaCem“ für den Einsatz in Beton nach DIN 1045-2 sind erfolgreich abgeschlossen worden.

Analyse Anlagentechnik:

In diesem Zusammenhang standen die Alternativen Granulierteller und Chargenmischer.

Aufgrund der kostengünstigeren Produktion für diese Projektstudie wählen wird den Chargenmischer. Dieser brachte auch schnellere Ergebnisse, als dies eine Industrieanlage vermag.

Die Granulierteller haben dafür bei großtechnischer Produktion massenabhängige Kostenvorteile. Diese gilt es in einem späteren Schritt zu untersuchen.

Arbeitspaket 8: Pilotanlage/Kundenversuche

Die Erzeugung von Granalien wurde ausschließlich im Werk Pautzfeld durchgeführt. Bei der Entscheidung waren Fachkenntnisse des eigenen Personals und die direkte Kontrollierbarkeit von Produktion und Produktergebnis von zentraler Bedeutung.

Anwendungsversuche:

Erste Versuche wurden bei der Firma Lias Vintirov K.S. (CZ 35744 Vintirov) erfolgreich durchgeführt.

Dabei wurde aus dem in Deutschland produzierten Material eine Wendeltreppe stehend betoniert.

Hier galt es ein hoch technisch entwickeltes Produkt einzubringen, dass einerseits über ausgezeichnete selbstverfüllende Eigenschaften verfügt, dennoch andererseits eine hinreichende Konsistenz besitzt, um in der Schalung zu verweilen.

Hier fand Liacem mit Natursand (LC 45) Anwendung. Die gewählte Leichtbetonrezeptur gewährleistete eine hervorragende Betonfestigkeit bei optimaler

Verarbeitbarkeit und im Endzustand vollflächiger Sichtbetonqualität ohne Fehlstellen. Für die Baustelle bietet dieses Produkt Kosten- und Handlingvorteile auf Grund merkbarer Gewichtseinsparungen des Bauteils.

Die Ergebnisse waren in höchstem Masse befriedigend.

Phase IV: Verfahrensoptimierung, Projektabschluss

In diesem Projektabschnitt findet die Feinjustierung des Verfahrens und der Rezepturen auf Basis der zuvor erhaltenen Ergebnisse statt. Am Ende dieser Phase liegen detaillierte Beschreibungen zum Verfahren, den Rezepturen, sämtlicher durchgeführter Tests sowie zur Projektdurchführung vor. Außerdem liegen Ergebnisse zur technischen Prüfung und zu Langzeituntersuchungen / Bewitterungstests sämtlicher hergestellter Muster und Prototypen vor.

Arbeitspaket 9: Abschließende Optimierung (2. Optimierungsschleife), technische Dokumentation

Eine abschließende Optimierung gibt es nicht. Wir sind ständig dabei weitere Modifikationen durchzuführen.

So wurden inzwischen 58 volumetrische Versuche und ca. 150 gravimetrische Analysenreihen absolviert.

Auch Anlagenverbesserungen werden weiter durchgeführt. Es muss aber festgehalten werden, dass für die Kleinserienfertigung hinreichende technische Kenntnisse vorliegen.

Aber wie jeder Prozess kann auch dieser weiter optimiert werden.

Phase V: Marktreifmachung (nicht mehr im Förderumfang)

Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse, kann festgehalten werden, dass Liacem Marktreife erzielt hat.

Die Kleinserienproduktion kann im Werk Pautzfeld, mit dem bestehenden Equipment durchgeführt werden.

Eine Massenfertigung bedarf aber des Granuliertellereinsatzes. Hier sind weiterreichende Untersuchungen anzustellen.

Auch bei den Anwendungsmöglichkeiten werden sich eine Vielzahl ergeben.

Die ersten Produkterfahrungen mit der Treppe waren höchst erfolgreich und motivierend.

Ökologische, technologische und ökonomische Bewertung

Liacem hat die hohen Erwartungen in vollem Umfang im Rahmen der ersten Zielsetzung erfüllt.

Es stellt einen Baustoff dar, der ökologisch vertretbar eine erhebliche Energieeinsparung erzielt. Die dabei einzusetzende Technik ist absolut beherrschbar, kann aber, wie uns die Entwicklung aufgezeigt hat, durch weitere Modifikationen sukzessive wohl noch weiter verbessert werden. Insbesondere im großtechnischen Bereich sehen wir noch erhebliche Potenziale.

Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Firma Liapor ist sehr daran interessiert, die gewonnen Erkenntnisse auf dem internationalen Markt zu verwerten.

Entsprechende verkaufsfördernde Maßnahmen, wie z.B. intensive Kundengespräche, Schulungsmaßnahmen etc. sind ab 2010 geplant.

Ebenso sind Veröffentlichungen und Vorträge durch das Institut für Werkstoffe des Bauwesens der Universität der Bundeswehr in München beabsichtigt, die bei diesem Forschungsvorhaben uns unterstützen konnten.

Ausblick / Anschlussarbeiten

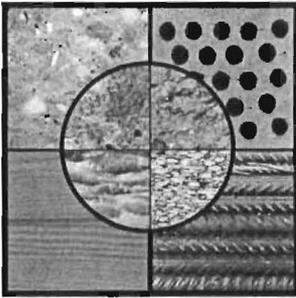
Die Umsetzung der Ergebnisse aus Laborversuchen in den Technikumsmaßstab konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die begonnenen Arbeiten im Zusammenhang mit konkreten Kundenanforderungen werden fortgesetzt und im Rahmen der Möglichkeiten in Phase II (Großserienproduktion) genutzt.

Fazit

Die erste Phase des Gesamtprojektes wurde abgeschlossen und bestätigt die Richtigkeit des Ansatzes zur energiesparenden, wirtschaftlichen und ökologischen Produktion eines Zuschlagstoffes, der in die heutige Zeit passt.

Es ist hier gelungen, wonach oft lange umsonst gesucht wird, eine Symbiose zwischen Ökologie und Ökonomie zu schaffen. Wir konnten entscheidende Grundlagen und Voraussetzungen aufzeigen, um nachhaltige umweltbewusste Umsätze auf dem nationalen und internationalen Märkten zu erzielen. Mit dem entwickelten Produkt und seinen bereits dargestellten Vorzügen ist es weiterhin möglich, natürliche Ressourcen zu sparen und Abfallstoffe aus der wachsenden Anzahl von Holzheizanlagen einer sinnvollen Verwendung zuzuführen. Die Nicht-Deponierung dieser Abfallstoffe vermeidet zudem Folgeaufwand für kommende Generationen.

Wir bedanken uns nochmals, für die Unterstützungen zu diesem zukunftsweisenden Produkt und für die damit verbundene Sicherung von Arbeitsplätzen.



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Untersuchungsbericht für den Antrag
auf eine allgemeine bauaufsichtliche
Zulassung für: Leichte Gesteinskör-
nung „LiaCem“

Umweltverträglichkeit

Liapor GmbH & Co. KG

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Angaben zur verwendeten Holzverbrennungsasche	4
3	Umweltverträglichkeit	6
3.1	Prüfungen am Feststoff	6
3.2	Prüfungen am Eluat	10
4	Zusammenfassung	13
5	Schrifttum	14
6	Anhang	15

1 Aufgabenstellung

Das Institut für Werkstoffe des Bauwesens wurde von der Firma Liapor GmbH & Co. KG, Hallerndorf/Pautzfeld (Liapor) mit Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit beauftragt.

Darin enthalten sein sollte eine Darstellung des Herstellprozesses der Holzverbrennungsasche, eine Feststoffanalyse und Elutionsversuche der Holzverbrennungsaschen.

Die zu untersuchende leichte Gesteinskörnung "LiaCem" wird aus den nachstehenden Ausgangsstoffen hergestellt:

- Zement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ (Z-3.17-1829 Schwenk Karlstadt),
- Flugasche nach DIN EN 450 [Lit 5] und Bauregelliste A, Teil 1, Anlage 1.6 mit nachgewiesener Umweltverträglichkeit (Z-3.31-1883 bzw. Z-3.31-1884),
- gebranntem Ton aus der Liapor-Produktion
- Holzverbrennungsasche aus deutschen Biomasseheizkraftwerken, in denen nur Frischholz oder Altholz der Altholzkategorie A I oder A II verbrannt wird.

Die Feststoffzusammensetzung der Mischung lautet:

Zement	8	± 2 M.-%
Flugasche	20	± 5 M.-%
Gebrannter Ton	52	± 10 M.-%
Holzverbrennungsasche	20	± 10 M.-%

2 Angaben zur verwendeten Holzverbrennungsasche

Es wurden fünf Holzverbrennungsaschen aus mehreren Produktionszeiträumen der Biomassekraftwerke untersucht. Die Proben sind im Weiteren mit „Probe 1“ bis „Probe 5“ bezeichnet. Die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend aufgeführt. Für die Versuche wurden die angelieferten Aschen gemischt und gemeinsam gebrochen. Aus diesem Aschengemisch wurden in mehr als 100 Chargen im Labor des Antragstellers die LiaCem-Granalien für die Zulassungsversuche hergestellt. Eine Differenzierung der Granalien nach den eingesetzten Aschen ist nicht möglich. Die Biomassekraftwerke, aus denen die Holzverbrennungsaschen stammen, liegen in unmittelbarer Umgebung des Antragstellers. Sie sind relativ klein und geben ihre Aschen in Sammelcontainern ab. Die nachfolgende Zusammenstellung stellt die Biomassekraftwerke kurz vor [Lit 1].

Biomasseheizwerk Forchheim,

- Ansprechpartner: Biomasseheizwerk Forchheim GmbH:
- Standort: 91301 Forchheim
- Brennstoffe: Holzhackschnitzel, Energiepflanzen, Sägerestholz
- Leistung: Gesamtleistung 2570 kW-th, Biomasseleistung 820 kW-th
- Versorgte Objekte: Realschule, Berufsschule, Sonderschule, Sporthalle, Wohnhäuser, Gärtnerei

Biomasseheizwerk Eggolsheim,

- Ansprechpartner: Biomasseheizwerk GmbH Eggolsheim:
- Standort: 91330 Eggolsheim.
- Brennstoffe: Holzhackschnitzel, Sägerestholz, Ganzpflanzen.
- Leistung: Gesamtleistung 1300 kW-th, Biomasseleistung 550 kW-th
- Versorgte Objekte: Wohnhäuser, Geschosswohnungsbau, Grundschule, Hauptschule, Sporthalle, Rathaus, Jugendheim, Tanzsaal, Bücherei, Bank

Biomasseheizwerk Gräfenberg,

- Ansprechpartner: Biomasseheizwerk Forchheim GmbH:
- Standort: 91322 Gräfenberg
- Brennstoffe: Waldhackschnitzel, Sägerestholz, Landschaftspflegematerial
- Leistung: Gesamtleistung 2550 kW-th, Biomasseleistung 850 kW-th
- Versorgte Objekte: Hauptschule mit Hallenbad, Realschule mit Sporthalle, Grundschule mit Sporthalle und Wohnung, Seniorenheim, Kindergarten

Eine schematische Darstellung der Anlage der vorstehenden Biomasseheizwerke zeigt Bild 1.

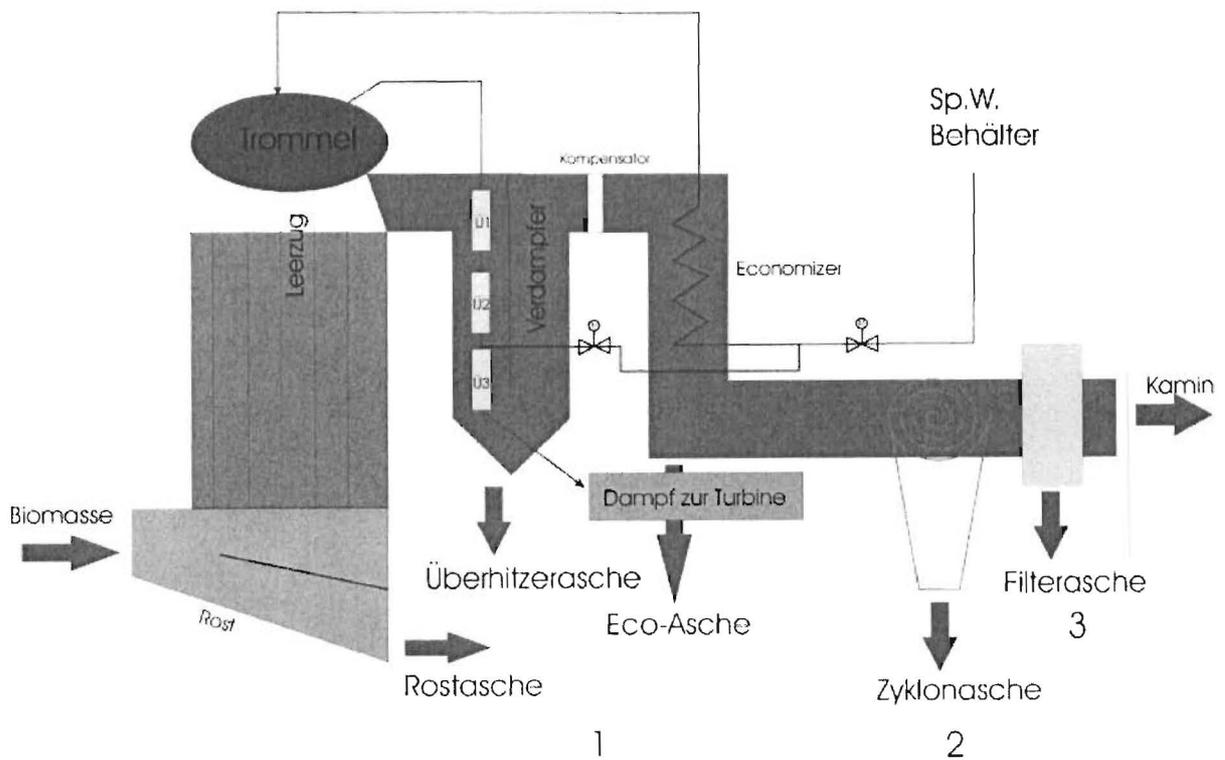


Bild 1: Anlagenschema Biomassekraftwerk

Für die Zulassungsversuche wurden in einem kürzeren Zeitraum Aschen protokolliert entnommen. Diese Aschen wurden als Mischung für die Herstellung der LiaCem-Granalien genutzt. Da vor der Erteilung einer allgemeinen bausaufsichtlichen Zulassung keine größeren Investitionen in eine Produktionsanlage zu verantworten sind, mussten die für die Zulassungsversuche benötigten Granalien zunächst im Labormaßstab erzeugt werden. Voraussetzung war dabei, dass die gleichen Maschinen zum Einsatz kamen, die auch für die spätere Produktion genutzt werden. Dazu waren ca. 100 einzelne Mischungen erforderlich. Die Zusammensetzung der Mischungen war konstant. Bei dieser Laborproduktion wurden die angelieferten Aschen aufgebraucht. Lediglich die für die Prüfungen der Aschen erforderlichen Mengen wurden ausgespart.

3 Umweltverträglichkeit

Die Prüfung der Umweltverträglichkeit erfolgte nach den üblichen Vorgaben für Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik. Die Ascheproben wurden gemäß den Vorgaben aus der laufenden Produktion entnommen, wobei dies mit der Einschränkung geschah, dass die Aschen aufgrund der geringen Mengen in Containern gesammelt werden. An den Proben der Holzverbrennungsasche wurden die Gesamtgehalte der als relevant angesehenen Parameter in einer Feststoffanalyse bestimmt. Des Weiteren wurden die aus der Holzverbrennungsasche eluierbaren umweltrelevanten Stoffe ermittelt.

3.1 Prüfungen am Feststoff

An der Holzverbrennungsasche und den fertigen Granalien wurden die in den Tabelle 1 und Tabelle 2 aufgeführten Gehalte im Feststoff mit den genannten Prüfverfahren festgestellt. Die einzelne Auswertungen wurde im Laborjournal festgehalten

Tabelle 1: am Feststoff bestimmte Parameter

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	LiaCem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Cl ⁻	DIN 1164-3:11/78	mg/kg	0,03	0,12	0,02	0,04	0,15	0,14
SO ₃	DIN EN 196-2, Kap. 8	mg/kg	1,32	2,41	1,14	1,77	2,26	1,61
Ca	DIN EN ISO 11885 E22	g/kg	112	203	138	144	308	218
K	DIN EN ISO 11885 E22	g/kg	15,9	52,4	43,0	43,3	74,6	62,0
Na	DIN EN ISO 11885 E22	g/kg	9,12	3,78	3,32	1,55	5,13	4,0

Die Prüfung des Gehalts an Antimon, Arsen, Barium, Blei, Cadmium, Chrom (gesamt), Kobalt, Kupfer, Molybdän, Nickel, Quecksilber, Selen, Zink und Zinn erfolgte nach Aufschluss. Dabei erfolgte der Aufschluss der Feststoffe gemäß EN 13346:2000 (Königswasseraufschluss) und der Eluate nach EN ISO 15587-1. Die Prüfungen wurden im Unterauftrag vom Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München, bzw. im Fall von Fluorid durch AGROLAB Labor GmbH, Bruckberg nach den in Tabelle 2 genannten Prüfvorschriften durchgeführt. Universitätsintern wurden die einzelnen Auswertungen in den Laborjournalen dokumentiert. Die Angaben von AGROLAB Labor GmbH können den Kopien im Anhang entnommen werden.

Tabelle 2: am Feststoff bestimmte Parameter

Prüf- parameter	Prüf- verfahren		Lia- Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Sb	DIN EN ISO 11885 E22	mg/kg	4,3	15,4	4,54	6,2	11,34	14,6
As		mg/kg	15,2	5,16	5,3	9,1	6,35	9,25
Ba		mg/kg	302	255	298	338	321	401
Pb		mg/kg	36	35,1	9,5	27	33,4	47,29
Cd		mg/kg	< 0,1	5,5	0,46	< 1	7,24	6,03
Cr		mg/kg	73	36,79	28,02	27	43,71	61,89
Co		mg/kg	17	6,3	7,19	9,3	7,18	10,02
Cu		mg/kg	66	88,83	79,45	87	185,75	287,28
Mo		mg/kg	8	2,24	1,72	2,4	2,86	2,21
Ni		mg/kg	62	17,5	25,39	28	23,87	27,76
Hg		DIN 38405 D13 1-3	mg/kg	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Se	DIN EN ISO 11885 E22	mg/kg	9,1	2,12	0,66	2,8	3,2	4,67
Zn		mg/kg	274	627,8	165,3	178	498,97	575,24
Sn		mg/kg	34	12,76	7,85	6,5	16,45	24,45
F ⁻	ASTM D3761-84	mg/kg	140	22	23	46	75	74
Tl	DIN EN ISO 11885 E22	mg/kg	< 1	4,67	8,57	2,9	5,31	15,3
V		mg/kg	119	24	31	30	28	36

Polychlorierte Biphenyle (PCB) und Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) wurden im Unterauftrag von AGROLAB Labor GmbH, Bruckberg bestimmt. Die nachstehenden Tabelle 3 und Tabelle 4 enthalten die Zusammenstellung der ermittelten Einzelwerte (siehe Kopien im Anhang) und führen die verwendeten Prüfverfahren auf.

Tabelle 3: PCB in der Feststoffanalyse des fertigen LiaCem und der Holzverbrennungaschen

Zu prüfender Pa- rameter	Prüf- verfahren	Gehalt	Lia- Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
PCB (28)	DIN ISO 10382	ng/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB (52)		mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB (101)		mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB (138)		mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB (153)		mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB (180)		mg/kg	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
PCB Summe		mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.

Tabelle 4: PAK in der Feststoffanalyse des fertigen LiaCem und der Holzverbrennungaschen

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Trockensubstanz	DIN ISO 11465	%	98,1	98,6	91,8	99,8	98,8	99,5
Naphthalin	Merkblatt LUA NRW Nr. 1	mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05
Acenaphthylen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Acenaphthen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fluoren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Phenanthren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Anthracen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Fluoranthren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Pyren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Benzo(a)anthracen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Chrysen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Benzo(b)fluoranthren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Benzo(k)fluoranthren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Benzo(a)pyren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Dibenz(ah)anthracen		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Benzo(ghi)perylene		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Indeno(1,2,3-cd)pyren		mg/kg	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
PAK-Summe nach EPA	mg/kg	n.n.	n.n.	n.n.	n.n.	0,09	n.n.	

PCDD und PCDF wurden im Unterauftrag an AGROLAB Labor GmbH, Bruckberg vergeben, die ihrerseits wiederum das Fremdlabor ZFD mit der Bestimmung beauftragten. Die nachstehende Tabelle 5 enthält die Zusammenstellung der ermittelten Einzelwerte und der verwendeten Prüfverfahren. Die zur Grunde liegenden Angaben von AGROLAB Labor GmbH können den Kopien im Anhang entnommen werden.

Tabelle 5: PCDD und PCDF in der Feststoffanalyse des fertigen LiaCem und der Holzverbrennungsaschen

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
2,3,7,8 Tetra CDD	EPA 613 / DIN 38414-S24	ng/kg	<1,0	5,0	<1,0	<1,0	3,0	4,0
1,2,3,7,8 Penta CDD		ng/kg	1,0	26	<1,0	<1,0	5,0	12
1,2,3,4,7,8 Hexa CDD		ng/kg	1,0	23	<1,0	<1,0	2,0	8,0
1,2,3,6,7,8 Hexa CDD		ng/kg	2,0	36	<1,0	<1,0	4,0	15
1,2,3,7,8,9 Hexa CDD		ng/kg	1,0	29	<1,0	<1,0	4,0	13
1,2,3,4,6,7,8 Hepta CDD		ng/kg	8,0	130	6,0	<5,0	13	60
Octa CDD		ng/kg	10	100	21	<10	17	55
2,3,7,8 Tetra CDF		ng/kg	3,0	36	1,0	<1,0	50	39
1,2,3,7,8 Penta CDF		ng/kg	2,0	32	1,0	<1,0	20	35
2,3,4,7,8 Penta CDF		ng/kg	4,0	43	1,0	<1,0	19	52
1,2,3,4,7,8 Hexa CDF		ng/kg	3,0	21	1,0	<1,0	14	34
1,2,3,6,7,8 Hexa CDF		ng/kg	4,0	31	1,0	<1,0	11	42
1,2,3,7,8,9 Hexa CDF		ng/kg	<1,0	4,0	<1,0	<1,0	1,0	5,0
2,3,4,6,7,8 Hexa CDF		ng/kg	3,0	31	<1,0	<1,0	7,0	33
1,2,3,4,6,7,8 Hepta CDF		ng/kg	5,0	50	<3,0	<3,0	20	51
1,2,3,4,7,8,9 Hepta CDF		ng/kg	<3,0	12	<3,0	<3,0	<3,0	10
Octa CDF	ng/kg	<10	28	<10	<10	17	28	
17 PCDD, PCDF-Kongenerere	berechnet	ng/kg	47	640	32	n.n.	210	500
TE nach NATO	berechnet	ng TE/kg	4,4	64	0,9	n.n.	26	58
TE nach AbfKlärV	berechnet	ng TE/kg	5,58	64,25	3,00	0,00	25,69	57,94

3.2 Prüfungen am Eluat

Die Holzverbrennungsaschen wurden zum Teil nach dem modifizierten Verfahren gemäß DIN 38414-4 im Unterauftrag im Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München eluiert und die Eluate untersucht. Die in diesen Eluaten festgestellten Gehalte sind in der Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Am Eluat bestimmte Parameter

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Sb	DIN 38414-4	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
As		mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Pb		mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cd		mg/l	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Cr _{ges}		mg/l	0,228	0,543	0,625	0,120	0,500	0,773
Cr (Chromat)		mg/l	0,165	0,322	0,068	0,098	0,372	0,571
Co		mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cu		mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Mo		mg/l	0,23	0,073	0,078	0,086	0,058	0,080
Ni		mg/l	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Hg		mg/l	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Zn		mg/l	< 0,01	0,095	< 0,01	< 0,01	0,050	0,073
Cl ⁻		mg/l	40	117	5,3	25	157	142
SO ₃		mg/l	825	2440	130	530	2230	1255
F ⁻	mg/l	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	

Im gleichen Labor wurde der Gehalt an Thallium und Vanadium im Eluat nach DIN EN ISO 11885 und der Gehalt an Cyaniden nach DIN 38405-13 ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Am Eluat bestimmte Parameter

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Tl	DIN EN ISO 11885	mg/l	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
V		mg/l	0,25	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cyanide lf	DIN 38405 D13 2-3	mg/l	0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cyanide ges		mg/l	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03	< 0,03

Ein weiterer Teil der Prüfungen am Eluat (Phenolindex, DOC, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit, sowie der Gehalt an absorbierbaren organisch gebundenen Halogenen (AOX), Färbung, Trübung und Geruch) wurden im Unterauftrag an AGROLAB Labor GmbH, Bruckberg vergeben. Die nachstehende Tabelle 9 enthält die Zusammenstellung der ermittelten Einzelwerte und der verwendeten Prüfverfahren.

Tabelle 8: Am Eluat von AGROLAB bestimmte Parameter

Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Phenolindex	EN ISO 14402: 1999	mg/l	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
DOC	DIN EN 1484	mg/l	<1,0	28	21	7	10	12
pH-Wert	DIN 38404-C5	-	12,1	12,8	12,6	12,8	12,9	12,8
elektrische Leitfähigkeit	DIN EN 27888	µS/cm	3660	14800	7490	12400	17900	13300
AOX	DIN EN 1485	mg/l	< 0,01	0,04	< 0,01	< 0,01	0,02	0,03
Färbung	visuell	-	farblos	hellgelb	farblos	farblos	farblos	farblos
Trübung	visuell	-	klar	klar	klar	klar	klar	klar
Geruch	DEV B1/2	-	geruchlos	geruchlos	nach Teer	geruchlos	geruchlos	geruchlos

Ein Teil der Prüfungen am Eluat wurde unabhängig von den vorstehenden Prüfungen auch im Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität der Bundeswehr München vorgenommen (Phenolindex, DOC, pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit, sowie der Gehalt an absorbierbaren organisch gebundenen Halogenen (AOX) und Färbung). Die nachstehende Tabelle 9 enthält die Zusammenstellung der ermittelten Einzelwerte und der verwendeten Prüfverfahren. Sie stimmen gut überein mit den Werten von AGROLAB.

Tabelle 9: Am Eluat vom Labor für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik bestimmte Parameter

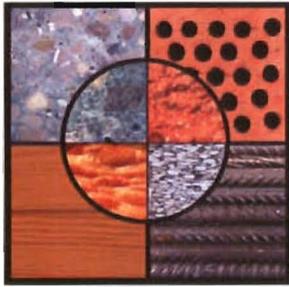
Zu prüfender Parameter	Prüfverfahren	Gehalt	Lia-Cem	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
Phenolindex	DIN 38409: 1984	mg/l	<0,02	< 0,02	0,024	< 0,02	< 0,02	< 0,02
DOC	DIN EN 1484: 1997	mg/l	7,0	30,0	22,3	8,2	7,4	7,7
pH-Wert	DIN 38404-5: 1984	-	11,67	12,96	12,91	12,93	13,10	13,10
elektrische Leitfähigkeit	EN 27888: 1993	µS/cm	3100	14470	9070	12100	17690	13230
AOX	DIN EN ISO 9562: 2005	mg/l	0,042	0,047	< 0,01	0,066	0,025	0,023
Färbung	DIN 38404-3: 2005	1/m	0,30	2,87	0,60	6,70	1,03	0,86

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Untersuchungsbericht beschreibt die für die Umwelt relevanten Untersuchungen für eine später zu beantragende Zulassung der Leichten Gesteinskörnung „LiaCem“.

5 Schrifttum

- Lit 1: Centrales Agra-Rohstoff-Marketing und Entwicklungs-Netzwerk e.V. Internetauftritt, www.carmen-ev.de, 2009
- Lit 2: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): „DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Richtlinie), Mai 2001
- Lit 3: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise zu DIN 1048, 1991
- Lit 4: DIN EN 196-2:2005-05 Prüfverfahren für Zement . Teil 2: Chemische Analyse von Zement; Deutsche Fassung EN 196-2:2005
- Lit 5: DIN EN 450: Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung
- Lit 6: DIN EN 451-1:2004-05 Prüfverfahren für Flugasche. Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxidgehalts; Deutsche Fassung EN 451-1:2003
- Lit 7: DIN EN 1744-1:1998-05 Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Chemische Analyse; Deutsche Fassung EN 1744-1:1998
- Lit 8: DIN EN 13055-1:2002-08 Leichte Gesteinskörnungen - Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Deutsche Fassung EN 13055-1:2002
- Lit 9: DIN EN 13055-1. Ber. 1:2004-12 Berichtigungen zu DIN EN 13055-1:2002-08



Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen

Untersuchungsbericht Leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ Betontechnologie

Liapor GmbH & Co. KG

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	4
2	Herstellverfahren	5
3	Prüfung der Ausgangsstoffe	6
3.1	Zement	6
3.2	Flugasche	6
3.3	Holzverbrennungsasche	6
3.3.1	Chemische Zusammensetzung	7
3.3.2	Feinheit	7
4	Prüfung der Gesteinskörnung	10
4.1	Schüttdichte	10
4.2	Kornrohdichte und Wasseraufnahme	10
4.3	Kornzusammensetzung	10
4.4	Kornform nach DIN EN 13055-1	11
4.5	Kornfestigkeit nach DIN EN 13055-1, Anhang A, Verfahren 1	11
4.6	Raubeständigkeit nach DIN EN 13055-1, Anhang B	11
4.7	Frost-Widerstand nach DIN EN 13055-1, Anhang C	11
4.8	Frost-Widerstand nach DIN V 18004, Abschnitt 4.2	12
4.9	Frost-Tausalz-Widerstand nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3	13
4.10	Gehalt an Chloriden nach DIN EN 1744-1	13
4.11	Gehalt an säurelöslichem Sulfat nach DIN EN 1744-1	14
4.12	Gesamtschwefel nach DIN EN 1744-1	14
4.13	Organische Bestandteile DIN EN 1744-1	14
4.14	Glühverlust nach DIN EN 1744-1	14
5	Herstellung der Betonproben	15
5.1	Zusammensetzung	15
5.2	Herstellung und Bezeichnung	15

6	Prüfungen am Beton	16
6.1	Druckfestigkeit und Trockenrohdichte	16
6.2	Druckelastizitätsmodul	17
6.3	Druckspannungs-Stauchungs-Linien	19
6.4	Spaltzugfestigkeit	20
6.5	Schwinden und Kriechen	21
6.6	Wassereindringtiefe	23
6.7	LC50/55 D2,0	23
6.7.1	Druckfestigkeit und Trockenrohdichte	23
6.7.2	Druckelastizitätsmodul	24
6.7.3	Druckspannungs-Stauchungs-Linien	24
6.7.4	Spaltzugfestigkeit	25
7	Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle	26
8	Zusammenfassung	27
9	Schrifttum	28
10	Anhang 1	30
10.1	Betonzusammensetzungen	30
10.2	Frischbetonkennwerte	32
10.3	Prüfungen am Korn	32
10.4	Prüfungen am Leichtbeton 1	35
10.5	Prüfungen am Leichtbeton 2	38
10.6	Prüfungen am Leichtbeton 3	41
10.7	Prüfungen am Leichtbeton LC50/55 D2,0	44
11	Anhang 2	46
11.1	Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle	46

1 Aufgabenstellung

Das Institut für Werkstoffe des Bauwesens wurde von der Firma Liapor GmbH & Co. KG, Hallerndorf/Pautzfeld (Liapor) mit der Aufstellung eines Prüfplans beauftragt, die leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ der Korngruppe 2/10 mm auf ihre Eignung für Beton nach DIN 1045-1 zu überprüfen. und der Durchführung der geforderten Untersuchungen. Die Untersuchungen orientieren sich an einem entsprechenden Prüfplan des DIBt [Lit 3].

Die Firma Liapor beabsichtigt, die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" in der Korngruppe 2/10 mm zur Herstellung von Leichtbeton nach DIN EN 206-1 [Lit 8, Lit 9, Lit 10] in Verbindung mit DIN 1045-2 [Lit 5] zu verwenden. Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" soll in der Korngruppe 2/10 mm bis zur Festigkeitsklasse LC50/55 bzw. C50/60 verwendet werden.

Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" soll in den Anwendungsbereichen Beton, Stahlbeton und Spannbeton nach DIN 1045-1 [Lit 4] verwendet werden.

Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" soll in Beton für die Expositionsklassen XF3 und XF4 nach DIN EN 206-1 [Lit 8, Lit 9, Lit 10] eingesetzt werden können.

Der Einsatz von „LiaCem“ soll für Kombination mit alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklasse E II und E III nach der DAfStb-Richtlinie "Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton" [Lit 1] zunächst ausgeschlossen werden, solange keine Langzeiterfahrungen mit „LiaCem“ vorliegen.

Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" soll in den Anwendungsbereichen für haufwerksporigen Leichtbeton nach DIN EN 1520 [Lit 18] in Verbindung mit DIN 4213 [Lit 6] verwendet werden.

Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" soll für Mauersteine nach DIN EN 771-3 [Lit 15] in Verbindung mit DIN V 18151-100 [Lit 30] und DIN V 18152-100 [Lit 31] verwendet werden.

Für die spätere Produktion ist ein Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle zu erstellen.

2 Herstellverfahren

Die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" wird aus den nachstehenden Ausgangsstoffen hergestellt:

- Zement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ (Z-3.17-1829 Schwenk Karlstadt),
- Flugasche nach DIN EN 450 [Lit 11] und Bauregelliste A, Teil 1, Anlage 1.6 mit nachgewiesener Umweltverträglichkeit (Z-3.31-1883 bzw. Z-3.31-1884),
- gebranntem Ton aus der Liapor-Produktion
- Holzverbrennungsasche aus deutschen Biomasseheizkraftwerken, in denen nur Frischholz oder Altholz der Altholzkategorie A I oder A II verbrannt wird.

Die Ausgangsstoffe für die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" werden gravimetrisch dosiert. Die Holzverbrennungsasche wird bei 1 mm abgesiebt. Die Feststoffe werden zunächst gemeinsam im Mischer homogenisiert. Anschließend erfolgt die Wasserzugabe und das im Mischer enthaltene Material wird granuliert. Nach dem Entleeren des Mixers kommen die frischen Granalien in ein Reifelager. Hier verbleiben sie vor der Witterung geschützt (unter Dach) 7 Tage. Die weitere Erhärtung soll ungeschützt im Freien erfolgen. Diese Lagerung ist im Alter von 90 Tagen abgeschlossen.

Die Feststoffzusammensetzung der Mischung lautet:

Zement	8	± 2 M.-%
Flugasche	20	± 5 M.-%
Gebrannter Ton	52	± 10 M.-%
Holzverbrennungsasche	20	± 10 M.-%

Die Schwankungsbreiten sind notwendig, um einen stabilen Granulierprozesses sicherzustellen.

Bei der Produktion für die Zulassungsprüfung betrug das Wasser/Feststoff-Verhältnis in etwa 0,28.

Vorgaben für die spätere LiaCem-Produktion enthält die Ergänzung des bestehenden Handbuchs der werkseigenen Produktionskontrolle der Liapor-Produktion (siehe Anhang 2).

3 Prüfung der Ausgangsstoffe

3.1 Zement

Für LiaCem wird der Portlandkompositzement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R-AZ mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (Z-3.17-1829) der Firma Schwenk aus dem Werk Karlstadt eingesetzt. Angaben zu den Kennwerten dieses Zements nach DIN EN 196 enthalten Tabelle 1 und Tabelle 2.

Tabelle 1: Kennwerten des eingesetzten Zements [Lit 33]

Kennwerte	Einheit	Prüfwert
Mahlfeinheit nach Blaine	cm ² /g	4030
Wasseranspruch	%	28,5
Erstarren - Anfang	min	244
Erstarren – Ende	min	323
Rückstand auf 0,09 mm	%	0,2
Raumbeständigkeit (Le Chatelier)	mm	0,3
Sulfat (SO ₃)	%	2,87
Chlorid (Cl)	%	0,09

Tabelle 2: Festigkeitswerte des eingesetzten Zements [Lit 33]

Prüfalter [d]	Druckfestigkeit [MPa]	Biegezugfestigkeit [MPa]
1	7,7	2,2
2	20,1	4,5
7	38,1	6,3
28	51,9	6,5
56	53,9	6,5

3.2 Flugasche

Für LiaCem werden die Flugaschen für Beton „KREAMENT ALT 1“ und „KREAMENT ALT 2“ mit den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (Z-3.31-1883) und (Z-3.31-1884) der Firma Schwenk aus der Trockenfeuerung des Kraftwerks Altbach/Deizisau eingesetzt.

3.3 Holzverbrennungasche

Es wurden fünf Holzverbrennungaschen aus mehreren Produktionszeiträumen untersucht. Die Proben sind im Weiteren mit „Probe 1“ bis „Probe 5“ bezeichnet. Die Untersuchungsergebnisse sind nachfolgend aufgeführt.

3.3.1 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Holzverbrennungsasche wurde nach DIN EN 196-2 [Lit 7] und DIN EN 451-1 [Lit 13] untersucht. Die Ergebnisse enthält Tabelle 3.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Holzverbrennungsaschen (Angaben in [M.-%])

Bestandteil	Prüfverfahren	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5
SiO ₂ gesamt	DIN EN 196-2, §13.9	32,66	55,18	46,52	28,21	37,08
Al ₂ O ₃	DIN EN 196-2, §13.11	3,44	5,31	7,69	3,91	5,82
Fe ₂ O ₃	DIN EN 196-2, §13.10	3,09	3,36	4,32	4,10	4,92
MgO	DIN EN 196-2, §13.15	1,94	1,54	1,60	3,05	3,00
CaO	DIN EN 196-2, §13.14	25,18	17,61	19,94	33,90	26,14
CaO _{frei}	DIN EN 451-1	6,38	1,84	3,61	13,25	4,97
SO ₃	DIN EN 196-2, §8	2,41	1,14	1,77	2,26	1,61
K ₂ O	DIN EN 196-2, §17	12,6	10,4	10,4	18,0	14,9
Na ₂ O	DIN EN 196-2, §17	1,02	0,895	0,418	1,38	1,08
Kohlenstoff als CO ₂	DIN EN 196-2, §15	4,77	1,81	4,93	5,33	5,49
Kohlenstoff als C		1,30	0,49	1,35	1,46	1,50
Glühverlust	DIN EN 196-2, §7	33,65	6,63	8,24	13,47	12,59
Unlöslicher Rückstand	DIN EN 196-2, §9	37,72	50,15	47,97	17,61	29,15
Unlöslicher Rückstand	DIN EN 196-2, §10	31,02	35,95	32,58	11,61	18,38
Chlorid	DIN EN 196-2, §14	0,12	0,02	0,04	0,15	0,14

3.3.2 Feinheit

3.3.2.1 Rückstand auf dem Sieb 0,2 mm

Die Rückstände auf dem Sieb 0,2 mm enthält Tabelle 4.

Tabelle 4: Rückstand auf dem Sieb 0,2 mm

Probe	Rückstand auf dem Sieb 0,2 mm [M.-%]
1	46
2	66
3	31
4	24
5	26

3.3.2.2 Spezifische Oberfläche

Die mittlere spezifische Oberfläche der untersuchten Holzverbrennungaschen nach Blaine enthält Tabelle 5:

Tabelle 5: spezifische Oberfläche nach Blaine

Probe	Spezifische Oberfläche [cm ² /g]
1	1374
2	699
3	3203
4	3239
5	2952

3.3.2.3 Kornanteil < 0,040 mm

Die Kornanteile unter 0,040 mm enthält Tabelle 6.

Tabelle 6: Kornanteil < 0,040 mm

Probe	Kornanteil < 0,040 mm [M.-%]
1	25
2	8
3	38
4	47
5	32

3.3.2.4 Schüttdichte

Die in Tabelle 7 aufgeführten Werte der Schüttdichte wurde nach DIN EN 1097-3 bestimmt.

Tabelle 7: Schüttdichte der Holzverbrennungaschen

Probe	Mittlere Schüttdichte [kg/m ³]
1	930
2	958
3	891
4	813
5	806

3.3.2.5 Kornverteilung

Die Kornverteilungen der fünf Proben der Holzverbrennungasche wurde durch Trockensiebung nach DIN EN 933-1 bestimmt und sind in Bild 1 wiedergegeben.

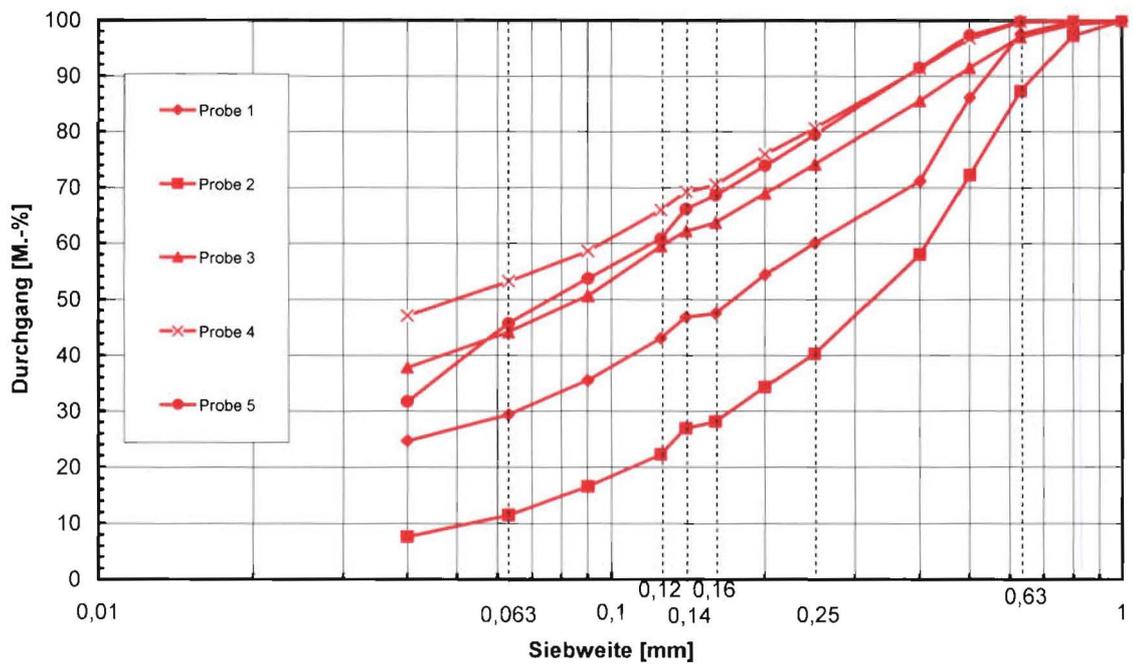


Bild 1: Kornverteilungen der Holzascheproben

4 Prüfung der Gesteinskörnung

Für die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" der Korngruppe 2/10 mm waren die folgenden Eigenschaften zu ermitteln und den Anforderungen nach DIN EN 13055-1 [Lit 27, Lit 28] bzw. DIN V 20000-104 [Lit 32] gegenüber zu stellen

4.1 Schüttdichte

Die Schüttdichte wurde nach DIN EN 1097-3 [Lit 16] bestimmt. Die ermittelten Werte enthält Tabelle 20. Der ermittelte Mittelwert der Schüttdichte von 855 kg/m^3 passt zu den Vorgaben des Antragstellers ($800 \text{ kg/m}^3 \pm 15 \%$).

4.2 Kornrohichte und Wasseraufnahme

Die Kornrohichte wurde in Anlehnung an DIN V 18004 [Lit 29], Abschnitt 6 mit dem Messzylinderverfahren bestimmt. Der Mittelwert der Kornrohichte liegt mit $1,60 \text{ kg/m}^3$ (Tabelle 21) in dem von Antragsteller ursprünglich angegebenen Bereich ($1,75 \text{ kg/dm}^3 \pm 15 \text{ M.-%}$). Nach DIN EN 13055-1 darf die Bandbreite jedoch maximal $0,15 \text{ kg/dm}^3$ betragen. Nach Rücksprache mit dem Antragsteller wird daher die Kornrohichte mit $1,70 \text{ kg/dm}^3 \pm 0,15 \text{ kg/dm}^3$ deklariert.

Die Wasseraufnahme wurde an den Proben im Anlieferungszustand für eine 30- und eine 60-minütige Wasserlagerung in Anlehnung an DIN V 18004, Abschnitt 7 gemessen (Tabelle 21). Der Mittelwert der Wasseraufnahme w_{30} beträgt 1 M.-%. Die mittlere Wasseraufnahme w_{60} liegt bei 1,3 M.-%.

4.3 Kornzusammensetzung

Der Gehalt an Feinanteilen (Tabelle 22) und die Kornzusammensetzung (Tabelle 23) von LiaCem wurden nach DIN EN 933-1 [Lit 14] bestimmt. Der Gehalt an Feinanteilen liegt unter 1,0 M.-%. Die Kornverteilung ist in Bild 2 grafisch dargestellt. Die Anforderungen der DIN EN 13055-1 hinsichtlich Überkorn und Unterkorn werden eingehalten.

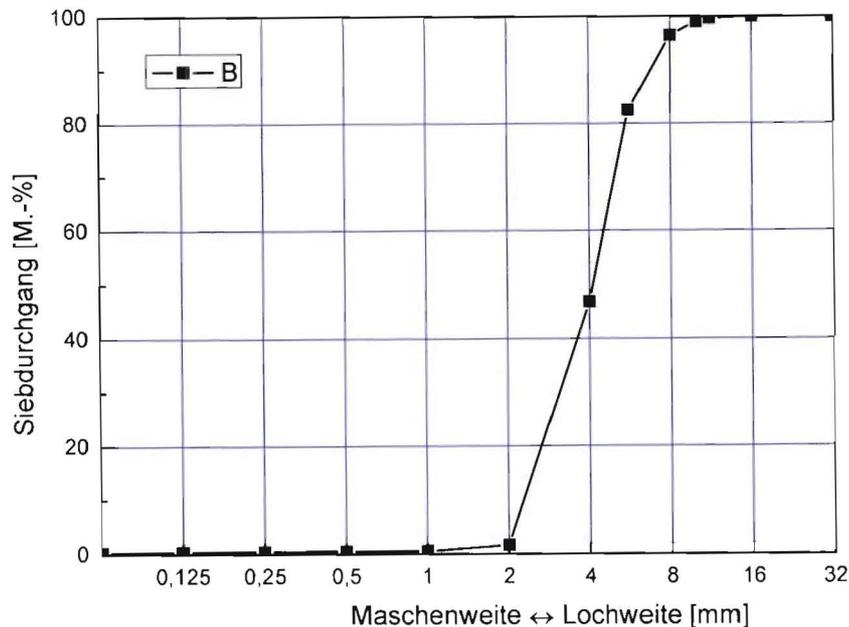


Bild 2: Sieblinie LiaCem 2/10 mm

4.4 Kornform nach DIN EN 13055-1

LiaCem 2/10 mm hat eine runde, kugelige Kornform.

4.5 Kornfestigkeit nach DIN EN 13055-1, Anhang A, Verfahren 1

Die Kornfestigkeit von LiaCem wurde nach DIN EN 13055-1 Anhang A, Verfahren 1 bestimmt. Die Granalien hatten zum Zeitpunkt der Prüfung ein Alter von 120 d. Die Werte enthält Tabelle 24. Die mittlere Kornfestigkeit C_a beträgt 15 N/mm^2 .

4.6 Raumbeständigkeit nach DIN EN 13055-1, Anhang B

Die Raumbeständigkeit von LiaCem nach DIN EN 13055-1 Anhang B, bestimmt. Als Prüfkörnung wurde die Korngruppe 4/8 mm gewählt. Hierzu wurde aus der Originalkörnung LiaCem die Prüfkörnung ausgesiebt und zugleich das Über- sowie Unterkorn entfernt. Die Werte enthält Tabelle 25. Nach der Prüfung war kein Masseverlust festzustellen.

4.7 Frost-Widerstand nach DIN EN 13055-1, Anhang C

Das Prinzip dieser Prüfung ist von dem in DIN EN 1367-1 [Lit 17] festgelegten Prüfverfahren abgeleitet und an die spezifischen Eigenschaften leichter Gesteinskörnung angepasst. Die Probe wird, nachdem sie bei Atmosphärendruck unter Wasser gelagert wurde, 20 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Diese bestehen aus der Abkühlung auf -15 °C in Luft und dem anschließenden Auftauen im Wasserbad bei etwa 20 °C . Nach Abschluss der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird die leichte Gesteinskörnung auf Veränderungen wie Rissbildung und/oder Massenverlust untersucht.

Die LiaCem-Probe weicht von den in DIN EN 1367-1 vorgegebenen Prüfkorngruppen ab. Daher wurde der Anteil unter 4 mm abgesiebt. Für die Beurteilung ist die halbe Siebweite des unteren Siebes heranzuziehen. Zusätzlich zum 2-mm-Sieb wurde der Rückstand auf dem 4-mm-Sieb beurteilt. Die Ergebnisse enthält Tabelle 26. Die Probe besteht die Prüfung ohne Masseverlust und zeigt keine Rissbildung.

4.8 Frost-Widerstand nach DIN V 18004, Abschnitt 4.2

Für die Frostprüfung wurden die Probekörper entsprechend der vorgegebenen Zusammensetzung [Lit 29] hergestellt. Als Zement wurde ein CEM I 32,5 R der Firma HeidelbergCement aus dem Werk Schelklingen genutzt. Der Natursand war Münchner Kalksand. Der Beton hatte ein Verdichtungsmaß $v = 1,40$ und einen Luftporengehalt von 2,4 Vol.-% im LP-Topf. An den Begleitwürfeln wurde eine mittlere Druckfestigkeit von 53,9 MPa bei einer Trockenrohichte von $1,782 \text{ kg/dm}^3$ ermittelt. Die Frostprüfung erfolgte an der gesägten Oberfläche halbirter 150-mm-Würfel. Die Ergebnisse sind in Tabelle 27 zusammengestellt und in Bild 3 grafisch aufbereitet. Die mittlere Abwitterung nach 56 Tagen betrug 46 g/m^2 . Die Körnung LiaCem erfüllt damit die Anforderung für die Verwendung in der Expositions-kategorie XF1 und XF3.

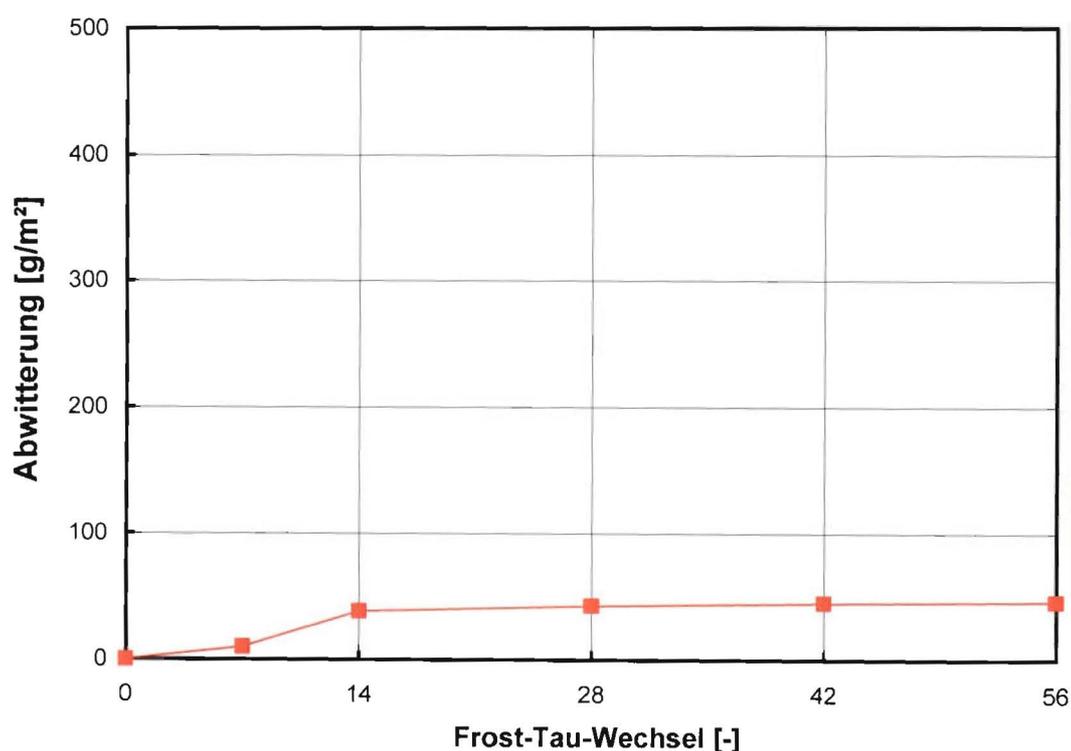


Bild 3: Verlauf der Abwitterung im Zuge der Frost-Tau-Prüfung nach DIN V 18004, Abschnitt 4.2

4.9 Frost-Tausalz-Widerstand nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3

Für die Frostprüfung wurden die Probekörper entsprechend der vorgegebenen Zusammensetzung [Lit 29] hergestellt. Als Zement wurde ein CEM I 32,5 R der Firma HeidelbergCement aus dem Werk Schelklingen genutzt. Der Natursand war Münchner Kalksand. Der Beton hatte ein Verdichtungsmaß $v = 1,32$ und einen Luftporengehalt von 4,6 % im Rollometer (ASTM C173). An den Begleitwürfeln wurde eine mittlere Druckfestigkeit von 46,1 MPa bei einer Trockenrohichte von $1,731 \text{ kg/dm}^3$ ermittelt. Die Frostprüfung erfolgte an der gesägten Oberfläche halbiertes 150-mm-Würfel. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 zusammengestellt und in Bild 4 grafisch aufbereitet. Die mittlere Abwitterung nach 56 Tagen betrug 388 g/m^2 . Die Körnung LiaCem erfüllt damit die Anforderung für die Verwendung in der Expositionsklasse XF2 und XF4.

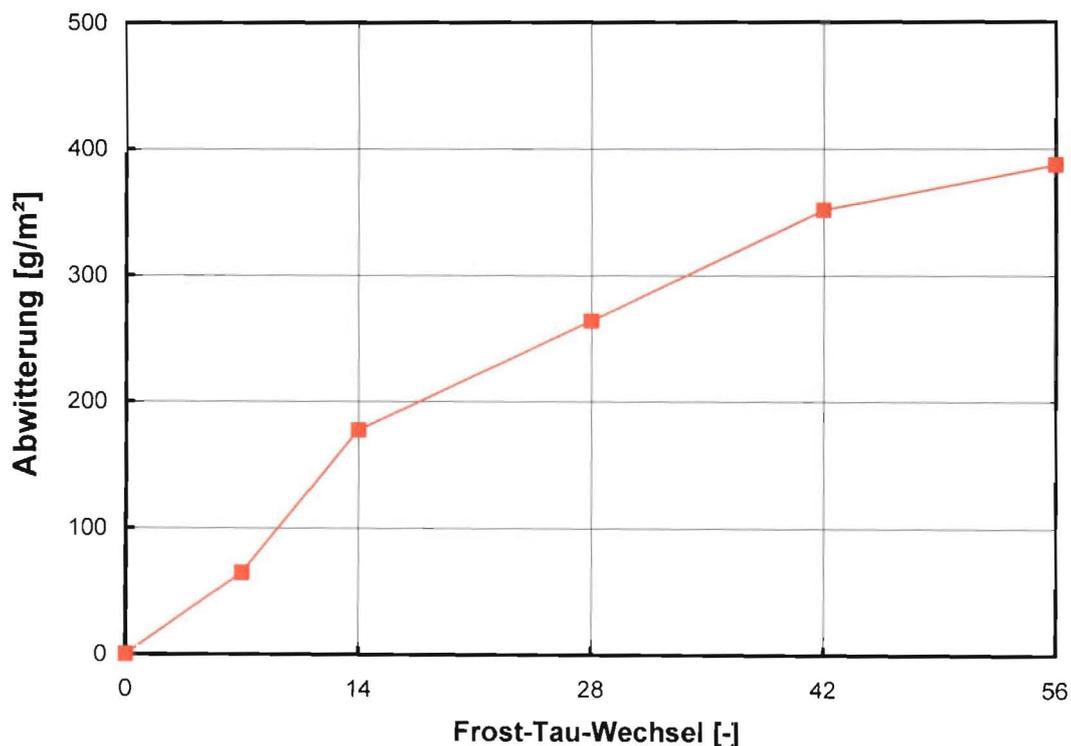


Bild 4: Verlauf der Abwitterung im Zuge der Frost-Tausalz-Prüfung nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3

4.10 Gehalt an Chloriden nach DIN EN 1744-1

Der Gehalt an Chloriden von LiaCem wurde nach EN 1744-1:1998, Abschnitt 7, bestimmt. Der Chloridgehalt betrug nach Umrechnung gemäß DIN EN 13055-1, Abschnitt 5.1 $\text{Cl}^- = 0,017 \text{ M.-%}$.

4.11 Gehalt an säurelöslichem Sulfat nach DIN EN 1744-1

Der Gehalt an säurelöslichem Sulfat von LiaCem wurde nach EN 1744-1:1998, Abschnitt 12, bestimmt. Der Gehalt an säurelöslichem Sulfat betrug nach Umrechnung gemäß DIN EN 13055-1, Abschnitt 5.1 $\text{SO}_3 = 0,75 \text{ M.-%}$.

4.12 Gesamtschwefel nach DIN EN 1744-1

Der Gesamtschwefelgehalt von LiaCem wurde nach EN 1744-1:1998, Abschnitt 11, bestimmt. Der Gesamtschwefelgehalt betrug nach Umrechnung gemäß DIN EN 13055-1, Abschnitt 5.1 $\text{S} = 0,30 \text{ M.-%}$.

4.13 Organische Bestandteile DIN EN 1744-1

Die organischen Bestandteile von LiaCem wurde nach DIN EN 1744-1:1998, Abschnitt 15.1, bestimmt. Die Färbung war nach 24 Stunden farblos-hellgelb.

4.14 Glühverlust nach DIN EN 1744-1

Der Glühverlust von LiaCem wurde nach DIN EN 1744-1:1998, Abschnitt 17, bestimmt. Er betrug $11,7 \text{ M.-%}$. Dieser Wert beschreibt allerdings nicht die organischen Bestandteile, sondern erfasst auch alle anderen thermischen Umsetzungen der zementgebundenen Granalien. Ein Vergleich mit dem Grenzwert von 5 M.-% in DIN EN 13055-1, Abschnitt 5.5 ist daher nicht möglich.

5 Herstellung der Betonproben

5.1 Zusammensetzung

Die zu untersuchende Leichtbetone wurden im Hinblick auf praktische Erfahrungen mit gefügedichten Leichtbetonen zusammengesetzt. Die Leichtbetone 1 und 3 enthalten die Körnung LiaCem. Leichtbeton 2 (Liapor 6,5 mit Natursand) dient für Vergleichszwecke. Die Entwurfsrezepturen sind in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 enthalten. Die angegebenen rechnerischen Rohdichten sind theoretische Größen, die für die Kontrolle der Ergiebigkeit herangezogen werden können.

Der verwendete Zement CEM I 42,5R stammt aus dem Werk Lengsfeld der Firma Heidelberg Cement. Das eingesetzte Fließmittel war das PCE Duriment LZ SP der Firma Betontechnik GesmbH.

Neben den drei vorstehend aufgeführten Leichtbetonen wurde das Potenzial der leichten Gesteinskörnung LiaCem an einem LC50/55 D2,0 überprüft. Die Entwurfsrezeptur für diesen Leichtbeton gibt Tabelle 18 wieder. Zusätzlich zu den anderen Leichtbetonen kam bei dieser Rezeptur noch die Flugasche SAFAMENT HKV zum Einsatz.

5.2 Herstellung und Bezeichnung

Für die Versuche wurden die Leichtbetone 1 bis 3 im Beisein von Mitarbeitern des Instituts für Werkstoffe des Bauwesens im Labor des Antragstellers hergestellt und gekennzeichnet. Für die benötigte Anzahl Proben waren für jeden Leichtbeton vier Mischungen erforderlich. Die eindeutige Zuordnung der Proben zu den einzelnen Mischungen geht aus der Kennzeichnung hervor:

Beispiel: 1/3 – 04: Leichtbeton 1 / Mischung 3 – vierter Zylinder bzw. Würfel

Die Leichtbetone wurden in einem Zwangsmischer UEZ ZM 100 gemischt. Die Körnung, der Sand und der Zement wurden im Mischer trocken vorgemischt, bevor die Wasserzugabe erfolgte und das Fließmittel Duriment LZ SP hinzugegeben wurde. Einwaage, Wasserzugabe und Fließmitteldosierung wurden für die verschiedenen Mischungen eines Leichtbetons nicht verändert. Die Konsistenz wurde nach DIN EN 12350-4 [Lit 20] nach 15 Minuten und nach DIN EN 12350-5 [Lit 21] nach 15 bzw. 45 Minuten geprüft. Die Frischbetonrohichte wurde an Zylindern nach DIN EN 12350-6 [Lit 22] bestimmt. Die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen enthält Tabelle 19.

Die Proben wurden bis zum Ausschalen im Alter von 24 Stunden im Feuchtraum bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von ≥ 95 % gelagert. Die anschließende Lagerung der Proben erfolgte nach DIN EN 12390-2 [Lit 23] bis zur Prüfung unter Wasser.

Der Leichtbeton LC50/55 D2,0 wurde im Labor des Instituts für Werkstoffe des Bauwesens in einem Zwangsmischer UEZ ZM 75 gemischt. Dosierreihenfolge, Mischdauer und die Lagerung der Proben entsprachen den drei anderen Leichtbetonen.

6 Prüfungen am Beton

6.1 Druckfestigkeit und Trockenrohdichte

Die Druckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 [Lit 24] nach einer Wasserlagerung bis zur Prüfung an Würfeln ($a = 150 \text{ mm}$) im Alter von 2, 7, 28, 91 und 365 Tagen (Tabelle 29, Tabelle 35, Tabelle 41) und an Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) im Alter von 28, 91 und 365 Tagen (Tabelle 30, Tabelle 36, Tabelle 42) bestimmt. Die Einzelwerte sind im Anhang aufgeführt. Die Trockenrohdichte wurde für jeden untersuchten Probekörper nach DIN EN 12390-7 [Lit 25] ermittelt. Die drei Leichtbetone können wie vorgesehen als LC 35/38 der Rohdichteklasse 1,8 bzw. 1,6 eingestuft werden (Tabelle 8). Die Festigkeitsentwicklung ist für die Würfel in Bild 5 und für die Zylinder in Bild 6 dargestellt.

Tabelle 8: Mittelwerte der gemessenen Würfel- bzw. Zylinderdruckfestigkeitswerte und die dazu gehörenden Werte der Trockenrohdichte

Leicht- beton	Prüf- alter	Würfel		Zylinder		Einstufung
		Druck- festigkeit	Trocken- rohdichte	Druck- festigkeit	Trocken- rohdichte	
	[d]	[MPa]	[kg/m ³]	[MPa]	[kg/m ³]	
1	2	37,1	1722	-	-	LC 35/38 D1,8
	7	46,0	1741	-	-	
	28	49,2	1742	47,5	1747	
	91	54,9	1765	54,3	1758	
	365	59,5	1731	58,2	1758	
2	2	42,3	1582	-	-	LC 35/38 D1,8
	7	47,5	1584	-	-	
	28	49,2	1594	48,0	1614	
	91	51,3	1610	49,5	1620	
	365	-	-	50,8	1612	
3	2	29,2	1472	-	-	LC 35/38 D1,6
	7	39,9	1480	-	-	
	28	47,3	1477	44,5	1488	
	91	57,2	1499	54,2	1510	
	365	62,5	1480	59,5	1499	

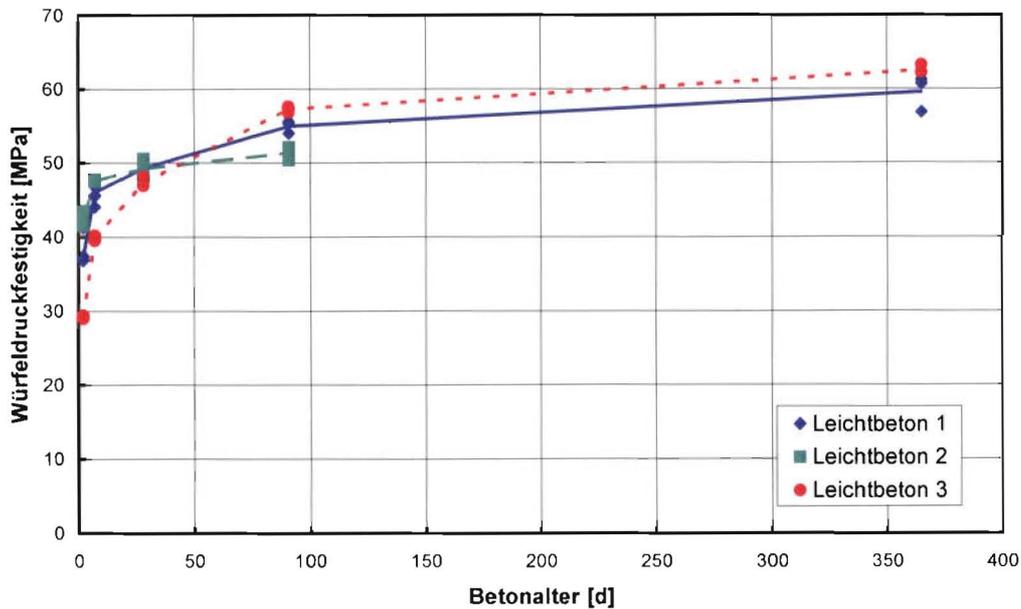


Bild 5: Entwicklung der Würfeldruckfestigkeit der untersuchten Leichtbetone

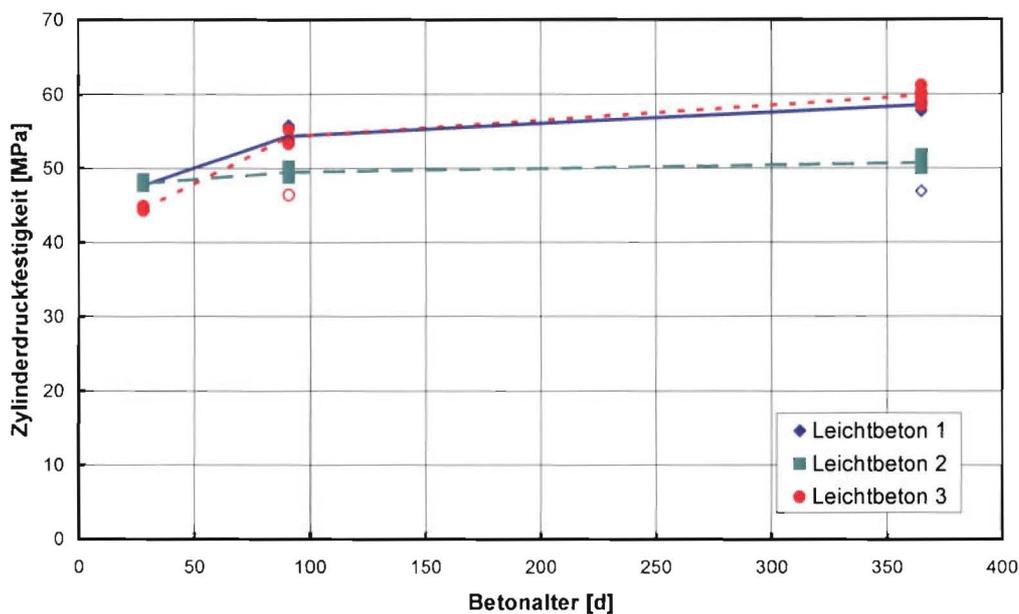


Bild 6: Entwicklung der Zylinderdruckfestigkeit der untersuchten Leichtbetone

6.2 Druckelastizitätsmodul

Der Druckelastizitätsmodul wurde an jeweils drei Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) im Alter von 28 und 365 Tagen gemessen. Die Proben wurden nach DIN EN 12390-3 [Lit 24] bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Die Einzelwerte enthalten die Tabelle 31, Tabelle 37 und Tabelle 43. In Tabelle 9 sind die Mittelwerte der gemessenen Druckelastizitätsmoduln

nach 28 Tagen den nach DIN 1045-1, Tab. 10 [Lit 4] berechneten Werten gegenübergestellt. Als Rohdichte wurde in der Berechnung die mittlere Trockenrohichte der Zylinder genutzt. Die gemessenen Werte der LiaCem-Leichtbetone stimmen gut mit der rechnerischen Prognose überein. Der Elastizitätsmodul des Referenzbetons wird unterschätzt. Die Zunahme der Festigkeitswerte von 28 Tagen bis 365 Tagen wirkt sich auch auf den Elastizitätsmodul aus. Nach einem Jahr sind die Werte um etwa 10 % angestiegen und übertreffen in allen Fällen die Prognose auf Basis der Festigkeitsklasse. In Bild 7 ist die Entwicklung der Elastizitätsmoduln im betrachteten Zeitraum bis 365 Tage dargestellt.

Tabelle 9: Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Druckelastizitätsmoduln mit der rechnerischen Prognose

	Alter	$E_{c, \text{ gemessen}}$	rechnerisch E_{Icm}	Mittlere Trockenroh- dichte ρ_d
	[d]	[GPa]	[GPa]	[kg/m ³]
Leichtbeton 1	28	20,3	21,2	1756
Leichtbeton 2		19,8	17,8	1609
Leichtbeton 3		15,3	15,3	1494
Leichtbeton 1	365	22,5	21,3	1758
Leichtbeton 2		21,2	17,8	1619
Leichtbeton 3		17,2	15,6	1504

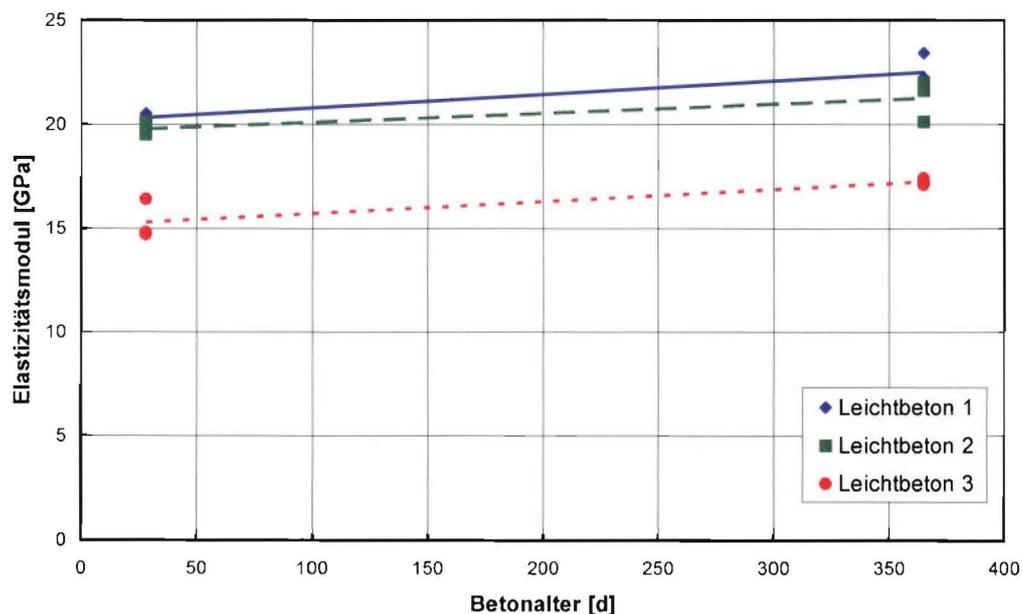


Bild 7: Entwicklung der Elastizitätsmoduln der untersuchten Leichtbetone

6.3 Druckspannungs-Stauchungs-Linien

Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien wurden für die drei Leichtbetone in weggesteuerten Versuchen mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s an je drei Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm} / h = 300 \text{ mm}$) im Alter von 28 Tagen ermittelt (Bild 8 bis Bild 10). Die Bruchstauchung bei Maximallast liegt bei den beiden LiaCem-Leichtbetonen mit 3,5 mm/m bzw. 4,5 mm/m deutlich über den 3 mm/m des Referenzbetons. Das deutlich duktilere Verhalten der LiaCem-Leichtbetone kommt im gesamten Verlauf der Druckspannungs-Stauchungs-Linien zum Ausdruck.

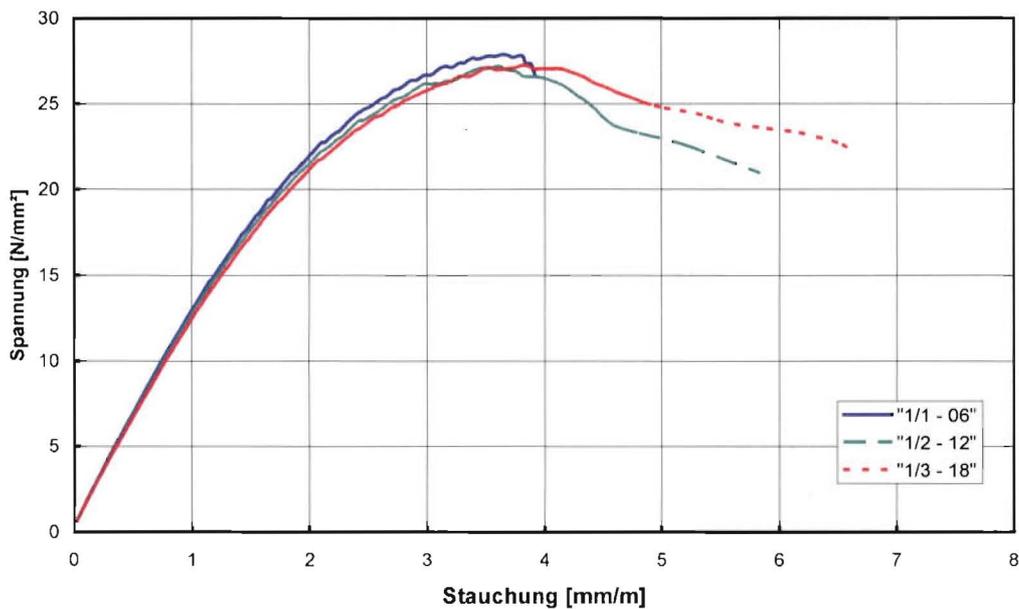


Bild 8: Druckspannungs-Stauchungs-Linien des Betons I (LiaCem mit Natursand)

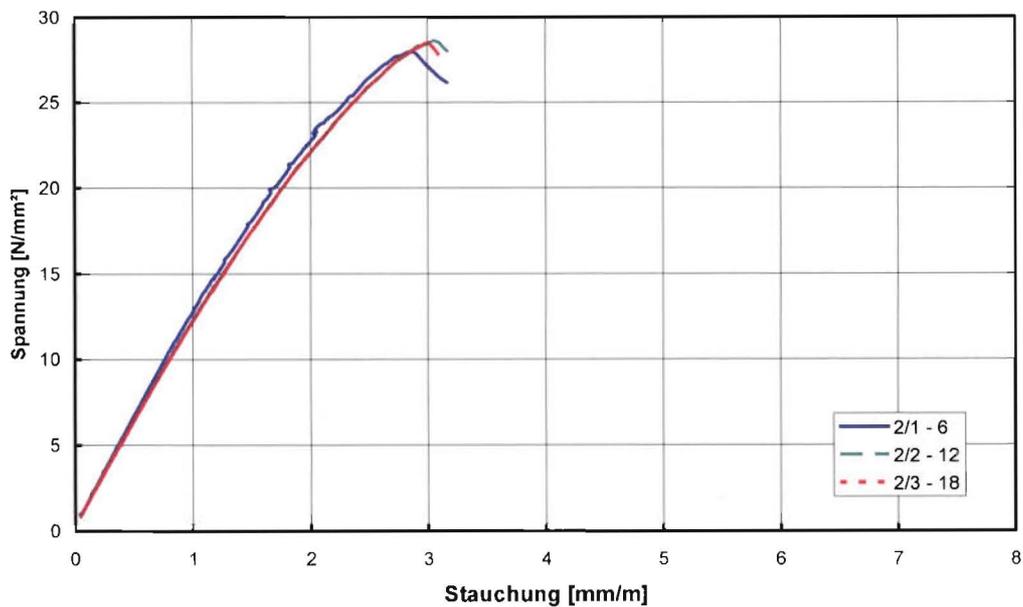


Bild 9: Druckspannungs-Stauchungs-Linien des Referenzbetons (Liapor 6,5 mit Natur-sand)

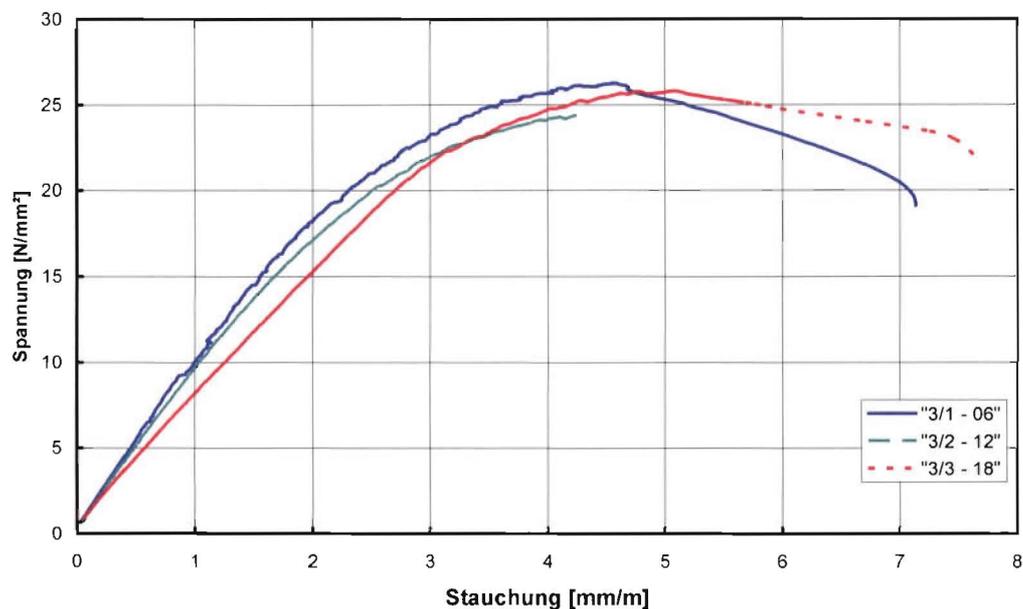


Bild 10: Druckspannungs-Stauchungs-Linien des Betons 3 (LiaCem mit Leichtsand)

6.4 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-6 an Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) bestimmt. Zusätzlich wurde die Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7 ermittelt. Die Einzelwerte sind in Tabelle 32, Tabelle 38 und Tabelle 44 enthalten.

Die Messwerte der Spaltzugfestigkeit sind in Tabelle 10 den rechnerisch zu erwartenden Werten $f_{lcs p}$ gegenübergestellt. Diese wurden nach DIN 1045-1 [Lit 4] aus der Druckfestigkeit abgeschätzt mit den Beziehungen:

$$f_{lctm} = \eta_1 \cdot f_{ctm} = \left(0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2200} \right) \cdot f_{ctm} \text{ und}$$

$$f_{lcs p} = \frac{f_{lctm}}{0,9}.$$

Die gemessenen Werte der drei Leichtbetone übertreffen die prognostizierten Werte deutlich.

Tabelle 10: Vergleich der gemessenen Spaltzugfestigkeiten mit der rechnerischen Prognose

	$f_{lcs p, \text{ gemessen}}$	rechnerisch $f_{lcs p}$
	[GPa]	[GPa]
Leichtbeton 1	5,8	3,1
Leichtbeton 2	4,7	3,0
Leichtbeton 3	5,0	2,9

6.5 *Schwinden und Kriechen*

Die Lagerung und die Prüfung erfolgte gemäß Heft 422 des DAfStb, Abschnitt 2.6 und 2.7 [Lit 2]. Schwinden und Kriechen wurde an Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) gemessen. Die Schwindmessungen an 2 Zylindern je Serie begannen im Alter von 7 Tagen (Nullmessung). Die Schwindverkürzung wurde auf der Mantelfläche der Zylinder jeweils mit vier 200 mm langen Messstrecken erfasst. Die erste Messung erfolgt in einem Alter von 7 Tagen.

Die Kriechkörper wurden im Alter von 7 Tagen belastet. Je Leichtbeton standen für die Messungen drei Zylinder zur Verfügung. Das Kriechen wurde je Zylinder mit vier Messstrecken von 150 mm Länge erfasst. Die kleinste Maßeinheit der eingesetzten Messgeräte betrug 0,001 mm.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 33, Tabelle 39 und Tabelle 45 zusammengefasst sowie Bild 11 bis Bild 13 dargestellt.

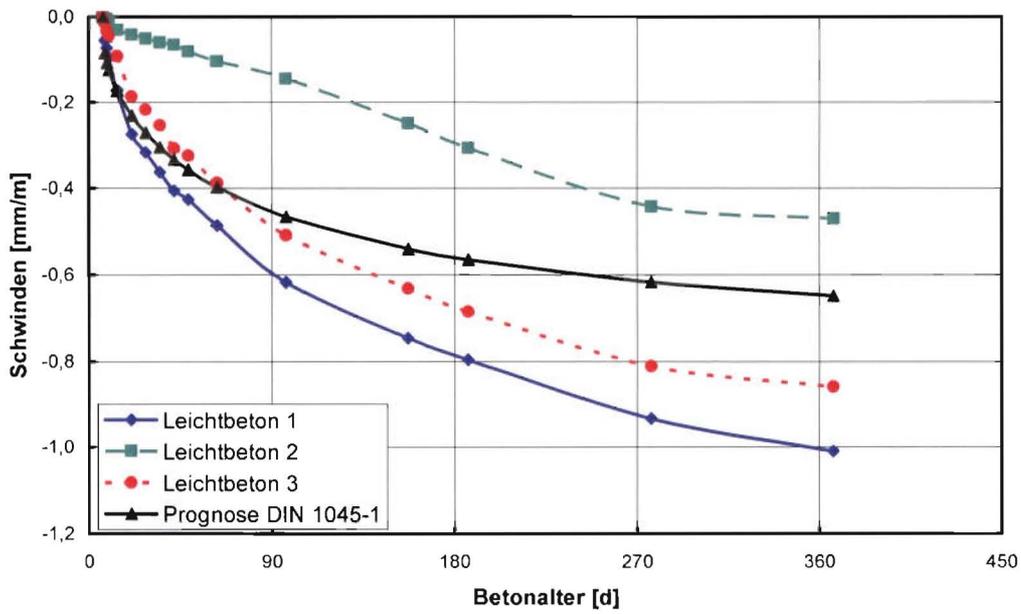


Bild 11: Verlauf der Schwindverkürzungen der drei untersuchten Leichtbetone

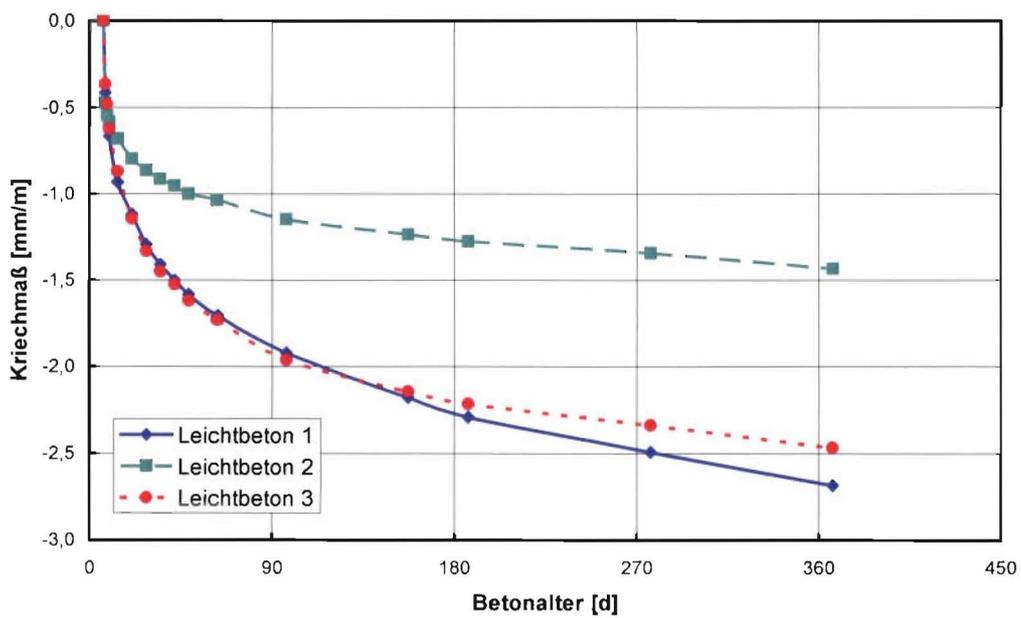


Bild 12: Verlauf des Kriechmaßes der drei untersuchten Leichtbetone

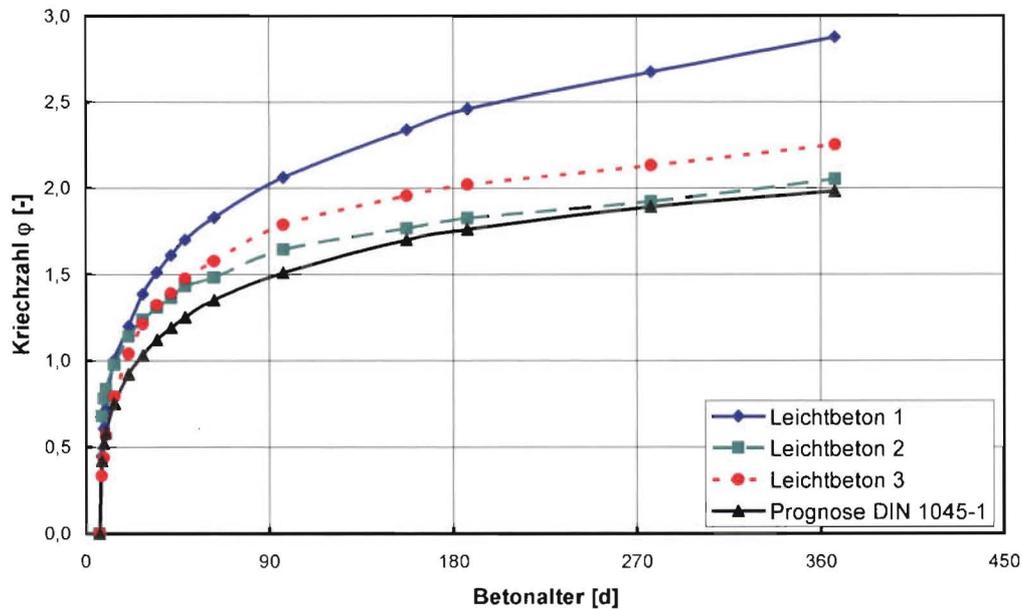


Bild 13: Verlauf des Kriechzahl der drei untersuchten Leichtbetone

6.6 Wassereindringtiefe

Die Wassereindringtiefe wurde für die drei Leichtbetone an jeweils drei 15er Würfeln nach DIN EN 12390-8 [Lit 26] ermittelt. Die größten gemessenen Eindringtiefen sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Maximalwerte der Wassereindringtiefe

	Wassereindringtiefe [mm]
Leichtbeton 1	7
Leichtbeton 2	16
Leichtbeton 3	9

6.7 LC50/55 D2,0

Zum Nachweis der Leistungsfähigkeit der leichten Gesteinskörnung LiaCem sollte gezeigt werden, dass ein gefügedichter Leichtbeton der Festigkeitsklasse LC50/55 D2,0 erreicht werden kann. Der Leichtbeton hatte die im Anhang in Tabelle 18 aufgeführte Zusammensetzung.

6.7.1 Druckfestigkeit und Trockenrohddichte

Die Druckfestigkeit sollte am Würfel ($a = 150 \text{ mm}$) und am Zylinder $d = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) im Alter von 28 d und 91 d nach DIN EN 12390-3 [Lit 24] nachgewiesen werden. Die Trockenrohddichte wurde für jeden untersuchten Probekörper nach DIN EN 12390-7 [Lit 25] ermittelt. Die zusammengefassten Ergebnisse enthält Tabelle 12, die Einzelwerte sind in Tabelle 47 und Tabelle 48 aufgeführt. Der Leichtbeton kann aufgrund der erzielten Werte mit

ausreichender Sicherheit in die vorgesehene Festigkeits- und Rohdichteklasse eingestuft werden.

Tabelle 12: Mittelwerte der gemessenen Würfel- bzw. Zylinderdruckfestigkeitswerte und die dazu gehörenden Werte der Trockenrohddichte

Prüfalter	Würfel		Zylinder		Einstufung
	Druckfestigkeit	Trockenrohddichte	Druckfestigkeit	Trockenrohddichte	
[d]	[MPa]	[kg/m ³]	[MPa]	[kg/m ³]	
28	65,4	1838	55,9	1883	LC50/55 D2,0
90	72,6	1847	62,9	1876	

6.7.2 Druckelastizitätsmodul

Der Druckelastizitätsmodul wurde an jeweils drei Zylindern ($\varnothing = 150$ mm, $h = 300$ mm) im Alter von 28 Tagen gemessen. Die Proben wurden nach DIN EN 12390-3 [Lit 24] bis zur Prüfung unter Wasser gelagert. Die Einzelwerte enthält die Tabelle 49. In Tabelle 13 ist der Mittelwert der gemessenen Druckelastizitätsmoduln nach 28 Tagen dem nach DIN 1045-1, Tab. 10 [Lit 4] berechneten Wert gegenübergestellt. Als Rohddichte wurde in der Berechnung die mittlere Trockenrohddichte der Zylinder genutzt. Die gemessenen Werte der Druckelastizitätsmoduln des LiaCem-Leichtbetons liegen etwa 20 % unter der rechnerischen Prognose nach DIN 1045-1, Tab. 10 [Lit 4].

Tabelle 13: Vergleich des Mittelwerts der gemessenen Druckelastizitätsmoduln mit der rechnerischen Prognose

Alter	$E_{c, \text{gemessen}}$	rechnerisch E_{lcm}	Mittlere Trockenrohddichte
[d]	[GPa]	[GPa]	[kg/m ³]
28	20,9	25,1	1878

6.7.3 Druckspannungs-Stauchungs-Linien

Die Druckspannungs-Stauchungs-Linien wurden in weggesteuerten Versuchen mit einer Verformungsgeschwindigkeit von 0,01 mm/s an zwei Zylindern ($\varnothing = 150$ mm / $h = 300$ mm) im Alter von 28 Tagen ermittelt (Bild 14). Die Bruchstauchung bei Maximallast beträgt bei den beiden LiaCem-Zylindern 2,9 mm/m bzw. 3,4 mm/m. Der Leichtbeton ist demnach ausreichend duktil, um den Anforderungen der DIN 1045-1 [Lit 4] zu genügen.

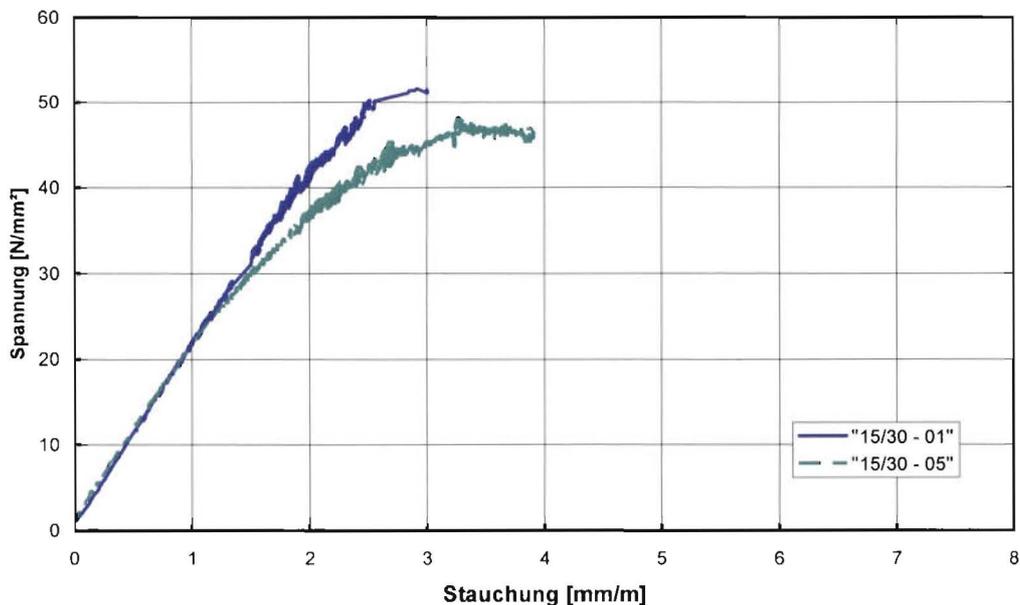


Bild 14: Druckspannungs-Stauchungs-Linien des Leichtbetons LC50/55 D2,0 (LiaCem mit Natursand)

6.7.4 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit wurde im Alter von 28 Tagen nach DIN EN 12390-6 an Zylindern ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$) bestimmt. Zusätzlich wurde die Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7 ermittelt. Die Einzelwerte sind in Tabelle 50 enthalten. Der Mittelwert der Spaltzugfestigkeit ist in Tabelle 10 dem rechnerisch zu erwartenden Werte $f_{lcs,p}$ gegenübergestellt. Diese wurden nach DIN 1045-1 [Lit 4] aus der Druckfestigkeit abgeschätzt mit den Beziehungen:

$$f_{lctm} = \eta_1 \cdot f_{ctm} = \left(0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2200} \right) \cdot f_{ctm} \text{ und}$$

$$f_{lcs,p} = \frac{f_{lctm}}{0,9}$$

Die gemessenen Werte übertreffen den prognostizierten Wert deutlich.

Tabelle 14: Vergleich der gemessenen Spaltzugfestigkeiten des Leichtbetons LC50/55 D2,0 mit der rechnerischen Prognose

$f_{lcs,p, \text{ gemessen}}$	rechnerisch $f_{lcs,p}$	Mittlere Trockenrohdichte
[GPa]	[GPa]	[kg/m ³]
7,6	4,1	1873

7 Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle

Für die geplante Produktion der leichten Gesteinskörnung LiaCem wurde das bestehende Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle der Firma Liapor GmbH & Co. KG um die Abschnitte 11 und 12 ergänzt. Dies bot sich an, da sowohl Personal als auch Anlagen der Liaporproduktion für die Herstellung von LiaCem genutzt werden sollen. Die LiaCem-Ergänzung ist als Anhang 2 Bestandteil dieses Berichts.

8 Zusammenfassung

Der vorliegende Untersuchungsbericht im Auftrage der Firma Liapor GmbH & Co. KG beschreibt die betontechnologischen Untersuchungen an der Leichten Gesteinskörnung „LiaCem“.

Die Gesteinskörnung LiaCem erfüllt die vom Antragsteller im Antrag deklarierten Eigenschaften nach DIN EN 13055-1 in Verbindung mit DIN 20000-104.

Die mit LiaCem hergestellten Frischbetone zeichneten sich durch eine sehr gute Verarbeitbarkeit aus. Leichtbetone können mit der untersuchten Gesteinskörnung gezielt in den angestrebten Festigkeits- und Rohdichteklassen hergestellt werden.

Die erzielten Festbetoneigenschaften passen mit den Angaben der DIN 1045-1 für die Festigkeits- bzw. Rohdichteklassen zusammen. Die Schwindverkürzungen sind deutlich größer als prognostiziert. Ähnlich sieht es beim Kriechen aus. Die Kriechzahlen sind zwischen 10 % und 20 % höher als nach DIN 1045-2 vorhergesagt.

Die leichte Gesteinskörnung ist auch für den Einsatz höherer Betonfestigkeitsklassen geeignet, wie anhand eines LC50/55 D2,0 nachgewiesen werden konnte. Die ermittelten Festigkeits- und Verformungskennwerte stimmen mit den nach DIN 1045-1, Tab. 10 prognostizierten Werten gut überein, wobei der gemessene Elastizitätsmodul um ca. 20 % nach unten und die Spaltzugfestigkeit um etwa 85 % nach oben abweicht. Das Potenzial der leichten Gesteinskörnung LiaCem ist mit der Festigkeitsklassen LC50/55 D2,0 noch nicht ausgeschöpft.

Die vorliegenden Ergebnisse sprechen dafür, dass die leichte Gesteinskörnung „LiaCem“ in den Anwendungsbereichen Beton, Stahlbeton und Spannbeton nach DIN 1045-1 [Lit 4] verwendet werden kann. Sie ist geeignet für Beton, der den Expositionsklassen XF3 und XF4 nach DIN EN 206-1 [Lit 8, Lit 9, Lit 10] ausgesetzt ist.

Ebenso lassen die Untersuchungsergebnisse für die leichte Gesteinskörnung "LiaCem" keine Einschränkung für die Anwendungsbereiche für haufwerksporige Leichtbetone nach DIN EN 1520 [Lit 18] in Verbindung mit DIN 4213 [Lit 6] bzw. für Mauersteine nach DIN EN 771-3 [Lit 15] in Verbindung mit DIN V 18151-100 [Lit 30] und DIN V 18152-100 [Lit 31] erkennen.

9 Schrifttum

- Lit 1: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): „DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Richtlinie), Mai 2001
- Lit 2: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise zu DIN 1048, 1991
- Lit 3: DIBt: Prüfplan für die Zulassungsprüfung von leichten Gesteinskörnungen, 2007
- Lit 4: DIN 1045-1:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- Lit 5: DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- Lit 6: DIN 4213:2003-07 Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton in Bauwerken
- Lit 7: DIN EN 196-2:2005-05 Prüfverfahren für Zement . Teil 2: Chemische Analyse von Zement; Deutsche Fassung EN 196-2:2005
- Lit 8: DIN EN 206-1:2001-07 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
- Lit 9: DIN EN 206-1/A1:2004-10 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000/A1:2004
- Lit 10: DIN EN 206-1/A2:2005-09 Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000/A2:2005
- Lit 11: DIN EN 450: Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung
- Lit 12: DIN EN 450-1:2005-05: Flugasche für Beton; Definitionen, Anforderungen und Konformitätskriterien; Deutsche Fassung EN 450-1:2005
- Lit 13: DIN EN 451-1:2004-05 Prüfverfahren für Flugasche. Teil 1: Bestimmung des freien Calciumoxidgehalts; Deutsche Fassung EN 451-1:2003
- Lit 14: DIN EN 933-1: 1997-10 Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung - Siebverfahren; Deutsche Fassung EN 933-1:1997 + A1:2005
- Lit 15: DIN EN 771-3:2005-02 Festlegungen für Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen); Deutsche Fassung EN 771-3:2005
- Lit 16: DIN EN 1097-3:1998-06 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen; Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt; Deutsche Fassung EN 1097-3:1998

- Lit 17: DIN EN 1367-1:2000-01 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Witterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen; Teil 3: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel; Deutsche Fassung EN 1367-1:1999
- Lit 18: DIN EN 1520:2003-07 Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton (enthält Berichtigung AC:2003); Deutsche Fassung EN 1520:2002 + AC:2003
- Lit 19: DIN EN 1744-1:1998-05 Prüfverfahren für chemische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Chemische Analyse; Deutsche Fassung EN 1744-1:1998
- Lit 20: DIN EN 12350-4:2000-06 Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß. Deutsche Fassung EN 12350-4:1999
- Lit 21: DIN EN 12350-5:2000-06 Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß. Deutsche Fassung EN 12350-5:1999
- Lit 22: DIN EN 12350-6: 2000-03 Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohichte. Deutsche Fassung EN 12350-5:1999
- Lit 23: DIN EN 12390-2:2001-06 Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung EN 12390-2:2000
- Lit 24: DIN EN 12390-3:2002-04 Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-3:2001
- Lit 25: DIN EN 12390-7:2001-02 Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton. Deutsche Fassung EN 12390-7:2000
- Lit 26: DIN EN 12390-8:2001-02 Prüfung von Festbeton – Teil 7: Dichte von Festbeton. Deutsche Fassung EN 12390-8:2000
- Lit 27: DIN EN 13055-1:2002-08 Leichte Gesteinskörnungen - Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel; Deutsche Fassung EN 13055-1:2002
- Lit 28: DIN EN 13055-1. Ber. 1:2004-12 Berichtigungen zu DIN EN 13055-1:2002-08
- Lit 29: DIN V 18004:2004-04 Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken . Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104
- Lit 30: DIN V 18151-100:2005-10 Hohlblöcke aus Leichtbeton – Teil 100: Hohlblöcke mit besonderen Eigenschaften
- Lit 31: DIN V 18152-100:2005-10 Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton – Teil 100: Vollsteine und Vollblöcke mit besonderen Eigenschaften
- Lit 32: DIN V 20000-104:2004-04 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 104: Leichte Gesteinskörnung nach DIN EN 13055-1:2002-08
- Lit 33: Schwenk Zementkennwerte, WPK 2007

10 Anhang 1

10.1 Betonzusammensetzungen

Tabelle 15: Ausgangszusammensetzung Leichtbeton 1 (LiaCem mit Natursand)

	Volumen		Rohdichte	Einwaage	
	Mörtel	Beton		trocken	feucht
	dm ³ /m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
LiaCem		420	1,60	672	808
Natursand 0/4	220	220	2,63	579	579
CEM I 42,5R	135	135	3,10	420	420
Zugabewasser	210	210	1,00	210	210
Luftporen	15	15	-	-	-
Summe Mörtel	580				
Summe Beton		1000			
Rechn. Rohdichte (trocken)				1881	
Rechn. Rohdichte (feucht)					2016

Die vorstehende Ausgangszusammensetzung hatte eine Ergiebigkeit von 973 dm³.

Tabelle 16: Ausgangszusammensetzung Leichtbeton 2 (Liapor 6,5 mit Natursand)

	Volumen		Rohdichte	Einwaage	
	Mörtel	Beton		trocken	feucht
	dm ³ /m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Liapor 6,5		420	1,17	491	493
Natursand 0/4	220	220	2,63	579	579
CEM I 42,5R	135	135	3,10	420	420
Zugabewasser	210	210	1,00	210	210
Luftporen	15	15	-	-	-
Summe Mörtel	580				
Summe Gesamt		1000			
Rechn. Rohdichte (trocken)				1700	
Rechn. Rohdichte (feucht)					1702

Die vorstehende Ausgangszusammensetzung für den Leichtbeton 2 hatte eine Ergiebigkeit von 960 dm³.

Tabelle 17: Ausgangszusammensetzung Leichtbeton 3 (LiaCem mit Liaporsand K0/2)

	Volumen		Rohdichte	Einwaage	
	Mörtel	Beton		trocken	feucht
	dm ³ /m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
LiaCem		420	1,60	672	808
Liaporsand K0/2	220	220	1,83	403	451
CEM I 42,5R	135	135	3,10	420	420
Zugabewasser *)	210	210	1,00	210	210
Luftporen	15	15	-	-	-
Summe Mörtel	580				
Summe Gesamt		1000			
Rechn. Rohdichte (trocken)				1705	
Rechn. Rohdichte (feucht)					1889

*) zuzüglich Saugwasser: 53,3 l/m³

Die vorstehende Ausgangszusammensetzung hatte eine Ergiebigkeit von 1047 dm³.

Tabelle 18: Ausgangszusammensetzung Leichtbeton LC50/55 D2,0 (LiaCem mit Natursand)

	Volumen		Rohdichte	Einwaage	
	Mörtel	Beton		trocken	feucht
	dm ³ /m ³	dm ³ /m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
LiaCem		380	1,60	608	704
Natursand 0/4	235	235	2,68	630	638
CEM I 42,5R	129	129	3,10	400	400
SAFAMENT HKV	35	35	2,30	80	80
Zugabewasser *)	200	200	1,00	200	200
Luftporen	21	21	-	-	-
Summe Mörtel	620				
Summe Beton		1000			
Rechn. Rohdichte (trocken)				1918	
Rechn. Rohdichte (feucht)					2042

*) zuzüglich Zusatzmittel Woermann FM 26 : 7,2 l/m³

Die vorstehende Ausgangszusammensetzung hatte eine Ergiebigkeit von 970 dm³.

10.2 Frischbetonkennwerte

Tabelle 19: Frischbetonkennwerte

		Leichtbeton 1	Leichtbeton 2	Leichtbeton 3
Ausbreitmaß nach 15 min.	[mm]	460	500	520
Verdichtungsmaß nach 15 min.	[-]	1,00	1,00	1,00
Verdichtungsmaß nach 45 min.	[-]	1,04	1,02	1,02
Frischbetonrohddichte	[kg/m ³]	2029	1746	1838

10.3 Prüfungen am Korn

Tabelle 20: Schüttdichte von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 1097-3

Eigenfeuchte	[M.-%]	21,07	21,07	21,07	21,07
Einwaage	[g]	5179,5	5085,3	5098,6	5118,4
Volumen	[cm ³]	4949	4949	4949	4949
Schüttdichte	[kg/m ³]	864	849	851	854
Mittelwert Schüttdichte	[kg/m ³]	855			

Tabelle 21: Kornrohddichte und Wasseraufnahme von LiaCem 2/10 mm nach DIN V 18004

Eigenfeuchte	[M.-%]	21,07	21,07	21,07
Masse Material	[g]	310	338,6	350,9
Volumen V	[cm ³]	660	675	682
Volumen V ₃₀	[cm ³]	659	671	679
Volumen V ₆₀	[cm ³]	657	670	679
Volumen "Scheibe"	[cm ³]	0	0	0
Volumen Material	[cm ³]	160	175	182
Kornrohddichte	[kg/m ³]	1600	1598	1592
Mittelwert Kornrohddichte	[kg/m ³]	1597		
Wasseraufnahme w ₃₀	[M.-%]	0,39	1,43	1,04
Mittelwert Wasseraufnahme w ₃₀	[M.-%]	0,95		
Wasseraufnahme w ₆₀	[M.-%]	1,17	1,79	1,04
Mittelwert Wasseraufnahme w ₆₀	[M.-%]	1,33		

Tabelle 22: Gehalt an Feinanteilen von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 933-1

Masse trocken [g]	1862,5	1751,6
Masse trocken nach waschen auf Sieb [g]	1851,1	1739,9
Feinanteile f [M.-%]	0,7	0,7

Tabelle 23: Kornzusammensetzung von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 933-1

Siebweite	Siebrückstand		Summe Rückstand	Summe Durchgang
[mm]	[g]		[M.-%]	
16	0	0	0,0	100
11,2	1,8	10,3	0,4	100
10	8,8	10,1	1,0	99
8	41,7	39,5	3,5	96
5,6	226,8	220,6	17,5	83
4	576,4	564,6	53,1	47
2	718,8	728,1	98,4	2
1	16,6	16,7	99,4	1
0,5	0,7	0,9	99,4	1
0,25	0,9	1	99,5	0
0,125	0,8	1,1	99,6	0
0,063	1,1	0,8	99,6	0
Schale	2,8	1,5	99,8	
Überprüfung	0,2 %	0,3 %		

Tabelle 24: Kornfestigkeit von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 13055-1, Anhang A, Verfahren I

Druckkraft	[kN]	145,4	155,1	147,2
Kornfestigkeit	[N/mm ²]	14,6	15,6	14,8
Mittlere Kornfestigkeit C _a	[N/mm ²]	15		

Tabelle 25: Raumbeständigkeit von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 13055-1, Anhang B

Prüfkörnung	[mm]	4/8	
Untere Siebgröße	[mm]	4	4
Obere Siebgröße	[mm]	8	8
Prüfsiebgröße	[mm]	2	2
M ₁	[g]	171,6	173,4
M ₂ (> 2 mm)	[g]	0	0
Masseverlust	[M.-%]	0	0

Tabelle 26: Frostwiderstand von LiaCem 2/10 mm nach DIN EN 13055-1, Anhang C

Prüfkörnung	[mm]	4/10	
Trockeneinwaage (M_1)	[g]	441,4	352,1
Siebrückstände (> 2 mm)	[g]	440,9	352,4
Siebrückstände (> 4 mm)	[g]	440,3	350,5
M_1	[g]	793,5	
$M_2 (> 2 \text{ mm})$	[g]	793,3	
$M_2 (> 4 \text{ mm})$	[g]	790,8	
$F_{2 \text{ mm}}$	[M.-%]	0,0	
$F_{4 \text{ mm}}$	[M.-%]	0,3	

Tabelle 27: Frost-Tau-Widerstand von LiaCem 2/10 mm nach DIN V 18004, §4.2

Prüfalter [d]	Abwitterung [g/m^2]				
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittelwert
7	4,4	26,7	8,8	0,0	10,0
14	39,5	40,0	61,4	13,4	38,6
28	39,5	44,4	70,2	17,9	43,0
42	39,5	48,9	74,6	17,9	45,2
56	39,5	48,9	74,6	22,4	46,3

Tabelle 28: Frost-Tausalz-Widerstand von LiaCem 2/10 mm nach DIN V 18004, §4.3

Prüfalter [d]	Abwitterung [g/m^2]				
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Mittelwert
7	76,1	103,6	75,1	4,4	64,8
14	196,9	202,7	216,3	93,3	177,3
28	331,1	220,7	357,6	146,7	264,0
42	425,1	238,7	428,3	315,6	351,9
56	447,4	256,7	481,2	364,4	387,5

10.4 Prüfungen am Leichtbeton 1

Tabelle 29: Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
2	1/1 – 01	36,8	37,1	1713	1722
	1/2 – 07	37,0		1725	
	1/3 – 13	37,4		1727	
7	1/1 – 02	45,6	46,0	1737	1741
	1/2 – 08	45,5		1736	
	1/3 – 14	46,8		1750	
28	1/1 – 03	50,5	49,2	1748	1742
	1/2 – 09	49,5		1749	
	1/3 – 15	47,7		1729	
91	1/1 – 04	55,2	54,9	1773	1765
	1/2 – 10	53,9		1761	
	1/3 – 16	55,5		1761	
365	1/1 – 05	61,2	59,5	1735	1731
	1/2 – 11	56,7		1723	
	1/3 – 17	60,6		1735	

Tabelle 30: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
28	1/1 – 01	48,6	47,5	1763	1747
	1/2 – 07	47,2		1736	
	1/3 – 13	46,6		1742	
91	1/1 – 02	55,7	54,3	1750	1758
	1/2 – 08	53,7		1768	
	1/3 – 14	53,6		1757	
365	1/1 – 03	57,7	58,2	1754	1758
	1/2 – 09	(46,8)		1759	
	1/3 – 15	58,7		1761	

Tabelle 31: Elastizitätsmodul und Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048-5 sowie Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Elastizitätsmodul [GPa]		Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	1/1 – 04	-	20,3	48,0	48,0	1755	1756
	1/2 – 10	20,1		47,9		1752	
	1/3 – 16	20,5		48,0		1762	
365	1/1 – 05	21,8	22,5	58,9	58,7	1767	1758
	1/2 – 11	23,4		58,6		1754	
	1/3 – 17	22,2		58,7		1753	

Tabelle 32: Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Spaltzugfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	1/4 – 01	5,46	5,80	1768	1760
	1/4 – 02	6,27		1755	
	1/4 – 04	5,67		1758	

Tabelle 33: Schwinddehnung, Kriechdehnung und Kriechzahl gemäß DafStb-Heft 422

Alter des Betons	Schwinddehnung	Dauer der Belastung	Gesamtdehnung	Kriechdehnung	Kriechzahl
	$\epsilon_{s,t}$		$\epsilon_{ges,t}$	$\epsilon_{k,t}$	$\epsilon_{k,t}/\epsilon_{el}$
[d]	[mm/m]	[d]	[mm/m]	[mm/m]	[-]
7	0	0	0	0	0
8	-0,055	1	-1,406	-0,417	0,45
9	-0,073	2	-1,573	-0,566	0,61
10	-0,096	3	-1,697	-0,667	0,71
14	-0,172	7	-2,039	-0,933	1,00
21	-0,276	14	-2,329	-1,119	1,20
28	-0,318	21	-2,545	-1,293	1,38
35	-0,364	28	-2,708	-1,410	1,51
42	-0,407	35	-2,844	-1,503	1,61
49	-0,427	42	-2,947	-1,586	1,70
63	-0,487	56	-3,128	-1,707	1,83
97	-0,618	90	-3,475	-1,923	2,06
157	-0,747	150	-3,862	-2,181	2,34
187	-0,797	180	-4,025	-2,294	2,46
277	-0,934	270	-4,363	-2,495	2,67
367	-1,01	360	-4,630	-2,686	2,88

Tabelle 34: Wassereindringtiefe nach DIN EN 12390-8 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	größte Eindringtiefe [mm]	
28	1/1 – 06	5	7
	1/1 – 12	5	
	1/1 – 18	7	

10.5 Prüfungen am Leichtbeton 2

Tabelle 35: Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
2	2/1 – 01	41,9	42,3	1577	1582
	2/2 – 07	41,5		1590	
	2/3 – 13	43,5		1580	
7	2/1 – 02	47,7	47,5	1591	1584
	2/2 – 08	47,5		1591	
	2/3 – 14	47,4		1570	
28	2/1 – 03	50,5	49,2	1590	1594
	2/2 – 09	48,9		1597	
	2/3 – 15	48,1		1595	
91	2/1 – 04	50,3	51,3	1596	1610
	2/2 – 10	52,0		1613	
	2/3 – 16	51,5		1620	
365	2/1 – 05	(41,6)	(44,1)	1613	1614
	2/2 – 11	(45,9)		1613	
	2/3 – 17	(44,8)		1618	

Tabelle 36: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	2/1 – 01	48,5	48,0	1622	1614
	2/2 – 07	47,8		1613	
	2/3 – 13	47,6		1607	
91	2/1 – 02	48,7	49,5	1613	1620
	2/2 – 08	50,2		1625	
	2/3 – 14	49,5		1621	
365	2/1 – 03	50,5	50,8	1603	1612
	2/2 – 09	51,6		1613	
	2/3 – 15	50,2		1620	

Tabelle 37: Elastizitätsmodul und Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048-5 sowie Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Elastizitätsmodul [GPa]		Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	2/1 – 04	20,1	19,8	47,3	47,2	1598	1609
	2/2 – 10	19,5		47,6		1625	
	2/3 – 16	19,7		46,6		1605	
365	2/1 – 05	22,0	21,2	50,2	50,7	1616	1619
	2/2 – 11	21,6		51,8		1631	
	2/3 – 17	20,1		49,9		1609	

Tabelle 38: Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Spaltzugfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	2/4 – 02	4,89	4,65	1591	1585
	2/4 – 06	3,88		1577	
	2/4 – 08	5,18		1587	

Tabelle 39: Schwinddehnung, Kriechdehnung und Kriechmaß gemäß DafStb-Heft 422

Alter des Betons	Schwinddehnung	Dauer der Belastung	Gesamtdehnung	Kriechdehnung	Kriechzahl
	$\epsilon_{s,t}$		$\epsilon_{ges,t}$	$\epsilon_{k,t}$	$\epsilon_{k,t}/\epsilon_{el}$
[d]	[mm/m]	[d]	[mm/m]	[mm/m]	[-]
7	0	0	0	0	0
8	-0,004	1	-1,178	-0,474	0,68
9	-0,006	2	-1,252	-0,546	0,78
10	-0,013	3	-1,298	-0,585	0,84
14	-0,031	7	-1,413	-0,682	0,97
21	-0,042	14	-1,539	-0,797	1,14
28	-0,051	21	-1,616	-0,865	1,24
35	-0,060	28	-1,675	-0,915	1,31
42	-0,066	35	-1,720	-0,954	1,36
49	-0,081	42	-1,782	-1,001	1,43
63	-0,104	56	-1,841	-1,037	1,48
97	-0,145	90	-1,994	-1,149	1,64
157	-0,250	150	-2,186	-1,236	1,77
187	-0,308	180	-2,284	-1,276	1,82
277	-0,443	270	-2,488	-1,345	1,92
367	-0,471	360	-2,606	-1,435	2,05

Tabelle 40: Wassereindringtiefe nach DIN EN 12390-8 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	größte Eindringtiefe [mm]	
28	2/1 – 06	5	16
	2/1 – 12	8	
	2/1 – 18	16	

10.6 Prüfungen am Leichtbeton 3

Tabelle 41: Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
2	3/1 – 01	29,4	29,2	1482	1472
	3/2 – 07	29,0		1466	
	3/3 – 13	29,2		1468	
7	3/1 – 02	39,9	39,9	1482	1480
	3/2 – 08	40,2		1478	
	3/3 – 14	39,5		1481	
28	3/1 – 03	46,9	47,3	1475	1477
	3/2 – 09	48,1		1476	
	3/3 – 15	46,9		1479	
91	3/1 – 04	57,6	57,2	1507	1499
	3/2 – 10	56,7		1497	
	3/3 – 16	57,4		1492	
365	3/1 – 05	62,2	62,5	1494	1480
	3/2 – 11	63,2		1479	
	3/3 – 17	62,2		1466	

Tabelle 42: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
28	3/1 – 01	44,9	44,5	1497	1488
	3/2 – 07	44,4		1480	
	3/3 – 13	44,3		1487	
91	3/1 – 02	55,2	54,2	1516	1510
	3/2 – 08	53,3		1505	
	3/3 – 14	(46,4)		1510	
365	3/1 – 03	59,9	60,4	1493	1499
	3/2 – 09	61,2		1507	
	3/3 – 15	60,0		1498	

Tabelle 43: Elastizitätsmodul und Zylinderdruckfestigkeit nach DIN 1048-5 sowie Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Elastizitätsmodul [GPa]		Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	3/1 – 04	16,4	15,3	44,3	44,4	1497	1494
	3/2 – 10	14,8		43,8		1492	
	3/3 – 16	14,7		45,2		1494	
365	3/1 – 05	17,4	17,2	60,2	59,3	1505	1504
	3/2 – 11	17,2		58,3		1499	
	3/3 – 17	17,1		59,4		1506	

Tabelle 44: Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Spaltzugfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	3/4 – 02	4,91	4,95	1460	1486
	3/4 – 03	5,02		1497	
	3/4 – 04	4,93		1502	

Tabelle 45: Schwinddehnung, Kriechdehnung und Kriechmaß gemäß DafStb-Heft 422

Alter des Betons	Schwinddehnung	Dauer der Belastung	Gesamtdehnung	Kriechdehnung	Kriechzahl
	$\varepsilon_{s,t}$		$\varepsilon_{ges,t}$	$\varepsilon_{k,t}$	$\varepsilon_{k,t}/\varepsilon_{el}$
[d]	[mm/m]	[d]	[mm/m]	[mm/m]	[-]
7	0	0	0	0	0
8	-0,014	1	-1,478	-0,366	0,33
9	-0,032	2	-1,611	-0,481	0,44
10	-0,045	3	-1,768	-0,625	0,57
14	-0,092	7	-2,060	-0,870	0,79
21	-0,186	14	-2,426	-1,142	1,04
28	-0,217	21	-2,646	-1,331	1,21
35	-0,254	28	-2,803	-1,451	1,32
42	-0,308	35	-2,932	-1,526	1,39
49	-0,325	42	-3,043	-1,620	1,48
63	-0,388	56	-3,218	-1,732	1,58
97	-0,509	90	-3,570	-1,963	1,79
157	-0,632	150	-3,876	-2,146	1,95
187	-0,685	180	-4,000	-2,217	2,02
277	-0,811	270	-4,248	-2,339	2,13
367	-0,859	360	-4,425	-2,468	2,25

Tabelle 46: Wassereindringtiefe nach DIN EN 12390-8 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	größte Eindringtiefe [mm]	
28	3/1 – 06	6	9
	3/2 – 12	9	
	3/3 – 18	7	

10.7 Prüfungen am Leichtbeton LC50/55 D2,0

Tabelle 47: Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
28	15 – 01	62,8	65,4	1832	1838
	15 – 02	64,5		1845	
	15 – 03	69,0		1838	
91	15 – 04	69,1	72,6	1852	1847
	15 – 05	73,7		1841	
	15 – 06	75,1		1843	

Tabelle 48: Zylinderdruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Druckfestigkeit [MPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
28	15 – 01	56,9	55,9	1885	1883
	15 – 02	53,4		1881	
	15 – 05	57,5		1882	
91	15 – 13	62,2	62,9	1871	1876
	15 – 14	63,8		1868	
	15 – 15	62,7		1889	

Tabelle 49: Elastizitätsmodul nach DIN 1048-5 und Trockenrohdichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Elastizitätsmodul [GPa]		Trockenrohdichte [kg/m ³]	
28	15/30 – 12	20,7	20,9	1881	1878
	15/30 – 04	19,8		1864	
	15/30 – 07	22,2		1888	

Tabelle 50: Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 und Trockenrohddichte nach DIN EN 12390-7

Prüfalter [d]	Probekörper	Spaltzugfestigkeit [MPa]		Trockenrohddichte [kg/m ³]	
28	15/30 – 10	7,16	7,6	1889	1873
	15/30 – 11	8,45		1873	
	15/30 – 09	7,24		1858	

11 Anhang 2

11.1 Handbuch der werkseigenen Produktionskontrolle

QMS - Handbuch	11 Verfahrensstufen LiaCem-Produktion
<p>Die Liapor-LiaCem-Produktion ist in folgende Verfahrensstufen</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 10px; margin: 20px auto; width: 60%;"> <p>A. Kontrolle der Einsatzstoffe B. Mischen, Granulieren und Lagern C. Überprüfung</p> </div> <p>Die Herstellung von LiaCem fällt in den Aufgabenbereich der Produktion. Die Organisation und tionsplan ersichtlich.</p> <p>Verwendete Abkürzungen: BP = Bedienungspersonal; SP = Schichtpersonal; SF = Schichtführer PL = Produktionsleitung; TL = Technische Leitung; EÜ = Eigenüberwachung</p>	

QMS - Handbuch	12 Prozessanweisung und Qualitätssicherung in der LiaCem-Produktion		
1. Verfahrensstufe	2. Prozessanweisung	3. Überprüfung	4. Abweichung von Prozessanweisung

12.1 KONTROLLE DER EINSATZ- STOFFE	Von den Einsatzstoffen sind nach der Anlieferung Proben zu entnehmen. Die Proben werden im eigenen Labor überprüft bzw. an die LGA Nürnberg zur Überprüfung geschickt.	Kontrolle des Prüfberichts	Im Fall eines negativen Prüfergebnisses werden die Einsatzstoffe beim Lieferanten reklamiert und verworfen. Der LE informiert die Buchhaltung und korrigiert den Lagerbestand.	Prüfbericht	EÜ, LE
12.2 LAGERUNG DER EINSATZ- STOFFE	Die positiv überprüften Einsatzstoffe werden trocken und vor Verunreinigungen geschützt gelagert. Die Feuerraumasche wird gebrochen und abgesiebt.	Kontinuierliche Buchführung.		Alle Einsatzstoffe werden in einer Liste dokumentieren.	EÜ, LE
12.3 KONTROLLE DER WAAGEN UND DER MISCHER	Vor dem Mischen sind die eingesetzten Waagen zu überprüfen. Die Mischer sind auf Verunreinigungen zu kontrollieren und diese ggf. zu entfernen.	Die digitalen Waagen sind geeicht. Sichtkontrolle der Mischer		Eichstempel	EÜ

QMS - Handbuch	12 Prozessanweisung und Qualitätssicherung in der LiaCem-Produktion	LiaCem
		Seite 47

1. Verfahrens- stufe	2. Prozessanweisung	3. Überprüfung	4. Abweichung von Prozessanweisung	5. Dokumentation	6. verantwortlich
-------------------------	---------------------	----------------	---------------------------------------	------------------	-------------------

<p>12.4 MISCHEN, UND LAGERN</p> <p>12.5 ÜBER- WACHUNG DES END- PRODUKTS</p>	<p>Die Einsatzstoffe werden gravimetrisch nach Rezeptur und Mischanweisung dosiert. Die frischen Granalien werden nach Chargen getrennt in einer gegen die Witterung geschützten Umgebung gelagert. Die Verweildauer in diesem Zwischenlager richtet sich nach den Erhärtingsbedingungen. Sofern die Außentemperatur in den ersten 7 Tagen der Lagerung 10 °C unterschreitet, ist die Dauer der geschützten Lagerung in Anlehnung an DIN 1045-3, Tabelle 2 zu verlängern.</p> <p>Die Qualität der fertigen Granalien wird im Alter von 7 Tagen überprüft.</p>	<p>Kontrolle der Qualität der neuen Chargen (Sieblinie, Schüttdichte und Kornfestigkeit).</p>	<p>Bei fehlerhafter Dosierung ist das Material zu verwerfen. Der LE ist zu informieren.</p> <p>Im Fall eines negativen Prüfergebnisses wird die Charge verworfen. Der LE korrigiert den Lagerbestand.</p>	<p>Alle Chargen werden in einer Liste dokumentieren.</p> <p>Prüfbericht</p>	<p>EÜ, LE</p> <p>EÜ, LE</p>
<p>QMS - Handbuch</p>	<p>12. Prozessanweisung und Qualitätssicherung in der LiaCem-Produktion</p>			<p>LiaCem</p> <p>Seite 48</p>	
<p>1. Verfahrens- stufe</p>	<p>2. Prozessanweisung</p>	<p>3. Überprüfung</p>	<p>4. Abweichung von Prozessanweisung</p>	<p>5. Dokumentation</p>	<p>6. verantwortlich</p>

12.6 FREIGABE DER CHARGEN	Chargen werden frühestens nach 90 Tagen Reifung für die Auslieferung freigegeben. Bei Mischungen aus mehreren Chargen ist das Alter der jüngsten Charge maßgebend.	Kontrolle der Qualität der vermischten Chargen (Sieblinie, Schüttdichte und Kornfestigkeit).	Bei fehlerhafter Kennzeichnung erfolgt für die Freigabe zur Auslieferung nach wiederholter Produktkontrolle die Zuordnung zur nächst jüngeren Charge.	Alle Chargen werden in einer Liste dokumentieren.	EÜ, LE
------------------------------	--	--	---	---	--------