
Entwurf, Tragfähigkeit und Bemessung von Wänden aus Infraleichtbeton (ILC)

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.
Claudia Lösch

an der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktorin der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing.-

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Uni.-Prof. Dr. rer. nat. Dietmar Stephan

Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Arndt Goldack

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 25. Januar 2022

Berlin 2022

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten an der Technischen Universität Berlin, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau. Teilergebnisse dieser Arbeit sind bereits in den nachfolgenden Publikationen enthalten, die in Zusammenarbeit mit Co-Autoren entstanden sind. Inhalte aus den im Folgenden benannten Abschnitten finden sich in der vorliegenden Arbeit wieder und wurden von mir verfasst:

- Lösch, C.; Rieseberg, P.; Schlaich, M. (Hrsg.); Leibinger, R. (Hrsg.): Infraleichtbeton. Entwurf, Konstruktion, Bau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2018.
 - Kap. 2.1 Definition und Einordnung von Infraleichtbeton
 - Kap. 3 Materialtechnologie
 - Kap. 6.3 Bauphysikalische Eigenschaften
 - Kap. 7 Bemessungsansätze zur Tragwerksplanung
 - Kap. 8.1 Geeignete Schalungen, 8.3 Herstellung und Einbau, 8.4 Ausschalfrieten und Nachbehandlung, 8.5 Oberflächenschutz – Hydrophobierung(Zum Teil wurden Textabschnitte verbatim in die vorliegende Arbeit übernommen. Die entsprechenden Kapitel sind im Folgenden durch Fußnoten gekennzeichnet.)
- Schlaich, M.; Hückler, A.; Lösch, C.: Infraleichtbeton (ILC). In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender/ Beton-Kalender 2021. Schwerpunkte: Fertigteile; Integrale Bauwerke (2 Teile). Beton-Kalender, Heft 202. Ernst, Wilhelm & Sohn; Ernst & Sohn, Berlin, 2020.
 - Kap. 3 Bauphysikalische Eigenschaften: Kap. 3.1 bis 3.6
 - Kap. 6 Bemessung: Kap. 6.1, Kap. 6.2.1 – 6.2.2, Kap. 6.3
- Technische Universität Berlin: Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (MultiLC) - Mechanische, Bauchemische und Bauphysikalische Untersuchungen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2019.
 - AP 2.1.1a: Detaillierung des Versuchsprogramms, Abschnitt „Wandversuche“
 - AP3.1 Experimentelle Voruntersuchungen, Abschnitt „Wände“

-
- Lösch, C.; Richter, A.; Schlaich, M.: Structural behavior of multifunctional inhomogeneous infra-lightweight concrete elements. *Structural Concrete* (2020), S.1-15.
 - Kap. 3 Structural behavior of inhomogeneous walls
 - Lösch, C.; Hückler, A.; Schlaich, M.: Infralichtbeton. Grundlagen, bauphysikalische Eigenschaften und Referenzbauwerke. *Bauphysik* 41 (2019), Heft 1, S. 1-6.
 - Kap. 3 Zusammensetzung und Herstellung
 - Kap. 4 Eigenschaften

Die vorliegende Arbeit greift zudem auf diverse studentische Arbeiten zurück, insbesondere für experimentelle Daten, die in den jeweiligen Abschnitten als Quellenangabe vermerkt sind.

An dieser Stelle möchte ich mich für die vielfältige Unterstützung bedanken, die ich als Mitarbeiterin des Fachgebiets Entwerfen und Konstruieren – Massivbau erfahren durfte. Herrn Prof. Dr. Mike Schlaich danke ich herzlich für die Betreuung und Begleitung während der Erstellung dieser Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr. Arndt Goldack möchte ich mich für die Erstellung des zweiten Gutachtens, bei Herrn Prof. Dr. Dietmar Stephan für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses bedanken.

Mein besonderer Dank gilt zudem Herrn Dr. Alex Hückler für die Zusammenarbeit in vielen gemeinsamen Forschungsjahren. Ebenso möchte ich mich herzlich bei den Kollegen Arno Richter und Philip Rieseberg, Willi Walkowiak und Ralf Lagerstein, den studentischen Mitarbeitern sowie den Projektpartnern und -förderern bedanken, die meine Arbeit unterstützt und möglich gemacht haben.

Darüber hinaus danke ich meiner Familie, meiner Mutter und meiner Schwester, für Beistand in dieser wie auch allen anderen Lebenslagen.

Last but foremost gilt mein Dank meiner besten Hälfte, Felix, für alles.

Claudia Lösch

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation und Zielsetzung.....	1
1.2	Aufbau der Arbeit.....	3
2	Stand der Kenntnisse.....	4
2.1	Einführung Infraleichtbeton.....	4
2.1.1	Einordnung und Entwicklung.....	4
2.1.2	Zusammensetzung, Klassifizierung und Eigenschaften.....	8
2.2	Entwurfsaspekte für infraleichte Betone.....	12
2.3	Tragfähigkeit von Wänden aus infraleichten Betonen.....	15
2.4	Bemessungskonzepte für Wände aus infraleichten Betonen.....	16
2.5	Offene Fragestellungen und detaillierte Ziele.....	18
3	Entwurfsaspekte.....	21
3.1	Bauphysikalische Aspekte.....	21
3.1.1	Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient ...	21
3.1.2	Spezifische Wärmespeicherkapazität.....	23
3.1.3	Wasseraufnahme.....	24
3.1.4	Wasserdampfdiffusion.....	25
3.1.5	Frost-Tau-Widerstand.....	26
3.1.6	Schallschutz.....	28
3.2	Baupraktische Aspekte.....	31
3.2.1	Geeignete Schalungen.....	31
3.2.2	Herstellung und Einbau.....	32
3.2.3	Ausschalfristen und Nachbehandlung.....	35
3.2.4	Oberflächenschutz/ Hydrophobierung.....	37
3.3	Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, rechtliche Randbedingungen.	38
4	Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung.....	40
4.1	Theoretische Erläuterung von Bemessungsansätzen im GZT und Ableitung von Berechnungsansätzen.....	41
4.1.1	Bemessungsansätze gemäß EC2.....	41

4.1.2	Bemessungsansätze gemäß der DIN EN 1520 und DIN 4213 für haufwerksporige Leichtbetone.....	45
4.1.3	Bemessungsansätze gemäß fib Model Code.....	51
4.1.4	Bemessungsansätze gemäß ACI 318	51
4.1.5	Theorie der Stabwerkmodelle.....	55
4.1.6	Diskussion der abgeleiteten Berechnungsansätze und Auswahl eines Bemessungsansatzes.....	55
4.2	Experimentelle Untersuchungen unter zentrischer Druckbeanspruchung.....	59
4.2.1	Versuchsprogramm	59
4.2.2	Ergebnisse und Auswertung.....	65
4.3	Einflussfaktoren auf die maximale Traglast im Bruchzustand	74
4.3.1	Allgemeines	74
4.3.2	Dauerstandeffekt	79
4.3.3	Bauteilschlankheit	87
4.3.4	Bauteilgröße (Maßstabeffekt)	97
4.3.5	Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton und genormten Probekörpern (Faktor γ_{conv}).....	102
4.4	Modellbildung.....	107
4.4.1	Formulierung eines Berechnungsansatzes zur maximalen Traglast im Bruchzustand.....	107
4.4.2	Beurteilung der Anwendbarkeit des gewählten Bemessungsansatzes	113
4.4.3	Zwischenfazit und weiterführende Fragestellungen.....	116
5	Bemessungskonzept für druckbeanspruchte ILC-Wandbauteile	118
5.1	Allgemeines.....	118
5.1.1	Dauerhaftigkeit	118
5.1.2	Bewehrung	119
5.1.3	Duktilität und Versagensankündigung	122
5.2	Ausgangswerte für die Bemessung.....	123
5.2.1	Spannungs-Dehnungs-Linien.....	123
5.2.2	Mechanische Eigenschaften.....	124

5.2.3	Bemessungswert der charakteristischen Druckfestigkeit	126
5.2.4	Kriechen und Schwinden	127
5.2.5	Lastannahmen – Eigengewicht ILC	130
5.3	Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	131
5.3.1	Unbewehrte Wandbauteile - Normalkraft mit Ausmitte	132
5.3.2	Bewehrte Wandbauteile - Interaktion von Normalkraft und Biegung.....	133
5.4	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	135
5.4.1	Begrenzung der Spannungen	135
5.4.2	Rissbreitenbegrenzung und Mindestbewehrung	135
5.4.3	Begrenzung der Verformungen	139
5.4.4	Auswirkungen von Kriechen und Schwinden	141
5.5	Konstruktionsgrundlagen	143
5.5.1	Verbundverhalten	144
5.5.2	Mindestbewehrung	145
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	146
6.1	Zusammenfassung und wesentliche Erkenntnisse.....	146
6.2	Weiterer Forschungsbedarf	150
7	Abkürzungs- und Symbolverzeichnis	153
8	Tabellenverzeichnis	159
9	Abbildungsverzeichnis	162
10	Literatur	166
11	Anhang.....	180
11.1	Versuche an ILC-Wandbauteilen	180
11.2	Versuche zum Dauerstandeffekt.....	189
11.3	Versuche zur Bauteilschlankheit	192

Kurzfassung

Infraleichtbeton (ILC) ist ein Hochleistungsleichtbeton, der sowohl den Lastabtrag als auch die Wärmedämmung in der Gebäudehülle übernimmt und dadurch eine monolithische Alternative zu konventionellen, mehrschichtigen Verbundsystemen bildet. ILC liegt außerhalb der Normung, daher braucht es als Grundlage für die praktische Anwendung klare und umfassende Empfehlungen bzw. Leitlinien, wie ein materialgerechter und effizienter Einsatz gewährleistet werden kann. Dazu gehören möglichst gesamtheitliche Entwurfsgrundlagen, die dem Planer die zu berücksichtigenden Aspekte darlegen, sowie ein Bemessungskonzept, das auf die spezifischen Eigenschaften und Grenzzustände des Materials eingeht.

Die vorliegende Arbeit hat daher zum Ziel, wesentliche bauphysikalische und baupraktische Entwurfsaspekte aufzubereiten und ein Bemessungskonzept zu erarbeiten. Dabei liegt der Fokus auf druckbeanspruchten Wandbauteilen, für die ILC in der Gebäudehülle eingesetzt wird und die bislang noch nicht im Detail untersucht wurden. Als Grundlage für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden analytische und experimentelle Untersuchungen an ILC-Wänden durchgeführt und Unterschiede zwischen den Festigkeiten der Wandbauteile und der zugehörigen Prüfzylinder erforscht.

Aus den vorgelegten Erkenntnissen der Arbeit ergeben sich diverse Anknüpfungspunkte für weitere Forschung. Die Ergebnisse in Form der bereitgestellten Entwurfsaspekte, der Untersuchungen zur Tragfähigkeit und des Bemessungskonzepts stellen einen wesentlichen Schritt dar, um das Material Infraleichtbeton als echte Alternative für Wandbauteile in der Gebäudehülle in der breiteren Praxis zu etablieren.

Abstract

Infra-Lightweight Concrete (ILC) is a High Performance Lightweight Aggregate Concrete that provides both the load-bearing as well as the insulating function of the building skin. It is therefore a monolithic alternative to common multi-layer composite systems. ILC is not covered by the current standards. Hence, clear and comprehensive recommendations and guidelines are needed as a basis for the application in practice to ensure an efficient implementation that takes material specifics into account. This includes design principles that provide the designer with the relevant aspects and a structural design concept that considers the specific properties and limitations of the material.

This thesis aims to prepare the main structural-physical and practical design aspects and to develop a structural design concept. The focus is on ILC walls subjected to compression, which constitute the prevailing ILC elements of the building skin, and which have not been investigated in detail so far. As a basis for the design in ultimate limit state, analytic and experimental investigations regarding the load-bearing capacity are performed on ILC walls. Differences between the strength of an ILC wall element and the corresponding test cylinders are researched.

From the presented results, various points for further research can be derived. The resulting design aspects, the investigations of load-bearing capacity and the structural design concept form an important step towards the implementation of Infra-Lightweight Concrete as a real alternative in practice.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Der Bedarf an nachhaltigen Bauweisen wirft die Frage nach neuen Materialien auf und war der Anlass zur Entwicklung von Infralichtbeton (Infra-Lightweight Concrete (ILC)). Infralichtbeton ist ein konstruktiver Leichtbeton, der sich durch eine günstige Kombination aus geringer Wärmeleitfähigkeit und guter Druckfestigkeit auszeichnet. Er ermöglicht damit die Realisierung von Gebäudehüllen mit monolithischen Wandaufbauten, die gleichzeitig Last abtragen und wärmedämmen, und bildet somit eine Alternative zu konventionellen, mehrschichtigen Verbundsystemen.

Infralichtbeton liegt aufgrund seiner geringen Dichte unterhalb der genormten konstruktiven Leichtbetone, fällt jedoch als gefügedichtes Leichtbeton auch nicht in die Gruppe der haufwerksporigen Leichtbetone oder Porenbetone. Daher können existierende Ansätze für das Entwerfen, Bemessen und Konstruieren nicht ohne Weiteres auf Bauwerke mit ILC übertragen werden.

An der TU Berlin wird Infralichtbeton bereits seit 2006 erforscht. Viele Eigenschaften sind schon bekannt und umfangreiches Wissen wurde erarbeitet. Auch erste Gebäude wurden bereits errichtet. Dabei wird Infralichtbeton hauptsächlich für Außenwände verwendet, in Teilen kombiniert mit biegebeanspruchten Elementen wie z.B. Fensterstürzen oder Balkonen.

Bei den bislang umgesetzten Bauwerken wurden bereits bekannte entwurfsrelevante Aspekte, wie z.B. einige bauphysikalische Eigenschaften, bestmöglich berücksichtigt. Wo Kenntnisse fehlten, wurden bewusst konservative Vorsichtsmaßnahmen getroffen. Auch die Bemessung erfolgte weit auf der sicheren Seite, oftmals diente der Mauerwerksbau als Orientierung. Durch fehlende, ILC-spezifische Vorgaben für Entwurf und Bemessung waren die Gebäude damit zum Teil nur wenig effizient bzw. wirtschaftlich.

Die erstellten Gebäude haben sich bewährt. Um das Material jedoch als echte Alternative in der breiteren Praxis zu etablieren, braucht es klare und umfassende Empfehlungen bzw. Leitlinien, wie ein materialgerechter und

effizienter Einsatz gewährleistet werden kann. Dazu gehören möglichst umfassende Entwurfsgrundlagen, die dem Planer die zu berücksichtigenden Aspekte darlegen, sowie ein Bemessungskonzept, das auf die spezifischen Eigenschaften und Grenzzustände des Materials eingeht und so eine möglichst effiziente Nutzung ermöglicht.

Hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag leisten. Neben der Aufbereitung wesentlicher Entwurfsaspekte wird ein Bemessungskonzept für druckbeanspruchte Wandbauteile erarbeitet, da ILC hierfür vorrangig eingesetzt wird. Als Grundlage für die Bemessung der Tragfähigkeit werden analytische und experimentelle Untersuchungen von Wandbauteilen durchgeführt. Zwar wurden ILC-Wandbauteile bereits in verschiedenen Bauvorhaben realisiert, jedoch noch nicht im Detail untersucht. Diese Lücke soll nun geschlossen werden. In diesem Zusammenhang werden auch die Unterschiede der Festigkeit von Wandbauteil und zugehörigem Prüfzylinder erforscht, welche für die Interpretation der Versuchsergebnisse von besonderer Bedeutung sind.

Für die Arbeit werden zwei übergeordnete Ziele mit den jeweiligen Unterzielen formuliert:

- Erstes Ziel ist die Aufbereitung von wesentlichen Entwurfsaspekten für ILC. Dies soll
 - maßgebliche bauphysikalische Aspekte und
 - baupraktische Aspekte einschließen.
- Zweites Ziel ist die Erarbeitung eines Vorschlags für ein Bemessungskonzept für ILC-Wandbauteile unter Druckbeanspruchung. Dies soll
 - die Formulierung von Eingangswerten und grundlegenden Annahmen, einen Bemessungsansatz für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT), Empfehlungen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) und konstruktive Hinweise beinhalten, sowie
 - weiterführende, analytische und experimentelle Untersuchungen für eine realitätsnahe Berechnung der Tragfähigkeit einschließen, um den Bemessungsansatz im GZT zu untermauern. Vertiefte Untersuchungen zum GZG sind nicht Teil der Arbeit und bilden damit einen der im Ausblick genannten Themenbereiche für weitere Forschungsarbeiten.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im ersten Schritt wird im Kapitel 2 der Stand der Kenntnisse erläutert. Offene Fragestellungen werden abgeleitet und darauf aufbauend die o.g. Ziele weiter detailliert. Anschließend werden im Kapitel 3 die Entwurfsaspekte erarbeitet. Hierzu werden zum einen relevante bauphysikalische Aspekte dargelegt, zum anderen aber auch baupraktische Aspekte benannt, die sich auf die Qualität und Gestaltung der Oberflächen auswirken und damit die äußere Erscheinung der Bauwerke prägen.

Im Kapitel 4 der Arbeit wird die Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen erforscht. Hierzu werden bekannte Bemessungsansätze und hieraus abgeleitete Berechnungsansätze zur maximalen Traglast analysiert und anschließend mit experimentellen Prüfungen abgeglichen. In diesem Rahmen sind insbesondere vertiefte Untersuchungen zu den Zusammenhängen zwischen der Tragfähigkeit eines Wandbauteils und der Festigkeit von Prüfkörpern erforderlich. Die Ergebnisse bilden die Grundlage zur nachfolgenden Modellbildung, die einen Berechnungsansatz zur maximalen Traglast sowie Schlussfolgerungen bezüglich der Anwendbarkeit bekannter Bemessungsansätze für den GZT einschließt.

Im Kapitel 5 wird das Bemessungskonzept vorgestellt. Dieses beinhaltet zunächst Hinweise zu Dauerhaftigkeit, geeigneter Bewehrung und zu Ausgangswerten der Bemessung, wie z.B. mechanische Kennwerte oder Langzeitverhalten. Für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit fließen an dieser Stelle die im zweiten Abschnitt erlangten Erkenntnisse aus der Untersuchung der Tragfähigkeit ein. Darüber hinaus werden Empfehlungen zum Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit gegeben. Abschließend werden konstruktive Aspekte wie Verbundverhalten und Mindestbewehrung beleuchtet. In Kapitel 6 werden die wesentlichen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und die Anknüpfungspunkte für weitere Forschung aufgezeigt.

2 Stand der Kenntnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst der Infraleichtbeton in die bekannten Arten von leichten Betonen und die zugehörige Normung eingeordnet und ein kurzer Überblick über die Entwicklung gegeben. Im nächsten Schritt werden exemplarische Zusammensetzungen, deren Eigenschaften und die Klassifizierung von ILC vorgestellt. Anschließend wird der Kenntnisstand zu bauphysikalischen und baupraktischen Entwurfsaspekten, zur Tragfähigkeit und zu Bemessungskonzepten für ILC-Wandbauteile erläutert. Darauf aufbauend werden offene Fragestellungen abgeleitet und die im vorangegangenen Abschnitt formulierten Forschungsfragen weiter detailliert.

2.1 Einführung Infraleichtbeton

2.1.1 Einordnung und Entwicklung¹

Infraleichtbeton ist ein konstruktiver Leichtbeton mit geringer Trockenrohddichte $< 800 \text{ kg/m}^3$ [2], der die tragende und wärmedämmende Funktion der Gebäudehülle in einem monolithischen Material vereint. Im Gegensatz zu komplexen, mehrschichtigen Wandaufbauten bedeutet das Bauen mit Infraleichtbeton einfache, robuste Konstruktionen, die dauerhaft sind, mit geringem Instandhaltungsaufwand einhergehen und damit zum nachhaltigen Umgang mit Ressourcen beitragen können. Trotz immer strengerer Energieeinsparanforderungen können Sichtbetonbauten mit freier Formbarkeit und hohem gestalterischem Anspruch so einen Beitrag zur Baukultur leisten.

Allgemein werden Leichtbetone (LC) nach ihrem Gefüge in haufwerksporige und gefügedichte (konstruktive) Leichtbetone unterschieden. Haufwerksporige Leichtbetone (LAC) sind durch eine nur punktuelle Verkittung der Gesteinskörnung durch die Matrix charakterisiert und finden meist als Fertigteil oder Mauerstein Verwendung [3]. Gefügedichte Leichtbetone hingegen besitzen ein ähnliches Gefüge wie Normalbeton (NB oder NC (normal concrete)). Die niedrige Rohddichte wird hauptsächlich durch den Einsatz leichter Gesteinskörnung erreicht, die sowohl industriell hergestellt als auch natürlich gewonnen werden können. Als industriell

¹ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

gefertigte Zuschläge kommen Blähton, Blähglas oder Blähschiefer in Frage. Eine natürlich vorkommende Alternative ist Naturbims, für den der energetisch aufwendige Blähprozess entfällt und der daher vergleichsweise gute ökobilanzielle Eigenschaften aufweist. Die Reserven von Naturbims sind jedoch begrenzt, weshalb industriell gefertigten Zuschlägen eine hohe Bedeutung zukommt.

Neben den gefügedichten und haufwerksporigen Leichtbetonen unterscheidet man noch die Gruppe der Porenleichtbetone (Schaumbetone) sowie der Porenbetone, die beide ohne grobe Gesteinskörnung hergestellt werden. Porenleichtbetone nutzen Schaumbildner zum Aufschäumen der Zementmatrix, während Porenbetone mittels eines Treibmittels, z. B. Aluminium, im Porenbetonwerk hergestellt werden [4].

Infraleichtbeton zählt zur Gruppe der gefügedichten Leichtbetone. Durch seine geringe Trockenrohdichte von weniger als 800 kg/m^3 grenzt er sich von den nach DIN EN 206 [5] definierten Leichtbetonen (Trockenrohdichten von 800 kg/m^3 bis 2000 kg/m^3) ab. Darin begründet sich auch die Wahl der Vorsilbe »Infra« (lat. unterhalb/unter) in Anlehnung an das Lichtspektrum (vgl. Bild 2-1). Gefügedichte Leichtbetone, die neben einer guten Druckfestigkeit auch eine niedrige Wärmeleitfähigkeit besitzen und somit tragende und dämmende Funktionen gleichzeitig übernehmen können, werden als Dämmbetone bezeichnet [6]. Infraleichtbeton ist ein solcher Dämmbeton, der sich durch eine sehr gute Kombination aus Druckfestigkeit und Wärmeleitfähigkeit auszeichnet.

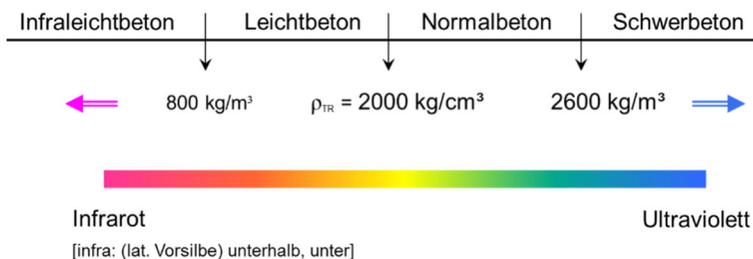


Bild 2-1: Einordnung Infraleichtbeton nach der Trockenrohdichte ρ_{TR} [2]

Leichtbetone werden nach verschiedenen Kriterien klassifiziert. Dazu gehören neben der Art des Gefüges u. a. die Trockenrohdichte und die Druckfestigkeit. Als Maß für die Leistungsfähigkeit eines Leichtbetons dient die sogenannte Druckhöhe, in die Festigkeit und Rohdichte eingehen (vgl. Faust [7]). Infraleichtbeton ist aufgrund seiner Leistungsfähigkeit als Hochleistungsleichtbeton (High Performance Lightweight Aggregate Concrete - HPLWAC [7]) einzustufen.

Einschlägige Normen für gefügedichte Leichtbetone sind:

- Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [8] gilt für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton mit Normal- und Leichtzuschlägen. Leichtbetone sind für die Festigkeitsklassen LC12/13 - LC80/88 und die Rohdichteklassen D 1,0 bis 2,0 (800 bis 2000 kg/m³) geregelt.
- DIN EN 206 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität [5] gilt für Beton, der für Ortbetonbauwerke, vorgefertigte Betonbauwerke sowie für Fertigteile für Gebäude und Ingenieurbauwerke verwendet wird. Der Geltungsbereich schließt Leichtbetone mit Rohdichteklassen D 1,0 bis 2,0 (800 bis 2000 kg/m³) ein.

Neben den beiden o. g. Normen existieren noch weitere Regelwerke, die sich auf haufwerksporigen Leichtbeton oder Porenbeton beziehen, z.B.:

- DIN 4213 [9], DIN EN 1520 [10] für vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton,
- DIN 4166 [11] für Porenbeton-Bauplatten und -Planbauplatten,
- DIN EN 12602:2016-12 [12], DIN 4223-100 [13] bis -103 [14] für vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton.

Infraleichtbeton liegt unterhalb der Klasse LC12/13 - D1,0, weshalb ILC nicht in den Geltungsbereich des EC2 [8] fällt. Auch die Normen für haufwerksporige Leichtbetone und Porenbetone besitzen keinen bindenden Charakter, da ILC ein geschlossenes Gefüge aufweist und in wesentlichen Eigenschaften von den in den dortigen Normen angesetzten Grundlagen abweicht (vgl. Lösch et al. [15]).

ILC ist also durch keine geltende Norm erfasst. Aufgrund seiner Eigenschaften und seinem Verhalten ähnlichen dem von gefügedichten Leichtbetonen wird jedoch insbesondere der EC2 [8] als Grundlage für Bemessungsansätze herangezogen.

Die Idee der Verwendung von Dämmbeton als einschichtige Gebäudehülle ist nicht neu. Zeitweise schränkten jedoch die immer strenger werdenden Anforderungen an die Energieeinsparung die Einsatzmöglichkeiten besonders im Wohnungsbau ein. Neuere Entwicklungen mit sehr leichten Leichtbetonen sind seit Anfang der 2000er Jahre vor allem in der Schweiz zu finden, vorrangig ist hier das Haus von Patrick Gartmann aus dem Jahr 2002 zu erwähnen [16].

Die Arbeiten an der TU Berlin zum Infraleichtbeton am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau (Prof. Mike Schlaich) begannen 2006 mit beratender Unterstützung von Prof. Hillemeier (TU Berlin) und Prof. Thienel (UniBW München). Nach anfänglichen Forschungen und dem Bau eines Einfamilienhauses in Berlin in 2007 [2, 17] wurden die Rezepturen weiterentwickelt und eine maßgebliche Steigerung der Druckfestigkeit erzielt [18]. In den darauffolgenden Jahren wurde eine Rezepturfamilie auf Basis von Blähthon mit Trockenrohddichten zwischen 600 und 800 kg/m³ erarbeitet [19, 20], und weitere Zusammensetzungen, u.a. mit Blähglas und mit noch niedrigeren Dichten, wurden entwickelt [21].

Umfangreiche Forschungen auf dem Gebiet infraleichter Betone wurden insbesondere auch an der Universität der Bundeswehr München (Prof. Thienel), an der Technischen Universität Kaiserslautern (Prof. Breit) und an der Technischen Universität Eindhoven (Prof. Brouwers) durchgeführt. Unter der Mitwirkung von Prof. Thienel ist u.a. ein Einfamilienhaus in Aiterbach, das Haus Thalmaier [22], entstanden. Die Arbeiten an der TU Kaiserslautern führten zur Errichtung des Experimentalgebäudes Small House I [23]. Der an der TU Eindhoven entwickelte ultra-lightweight concrete wurde bereits in Feldversuchen umgesetzt [24], und weitere Aspekte wie z.B. die Integration von Fasern [25, 26] und der Einsatz von Geopolymer als Zementersatz [27] wurden untersucht. Die Zusammensetzungen der entwickelten infraleichten Betone beruhen dabei meist auf Blähglas oder Blähthon als leichter Gesteinskörnung. Auch Ansätze mit Aerogelen [28], mit Aufbaukörnungen basierend auf Mauerwerksbruch [29] oder mit mineralisch ummantelten Holzspänen [30] sind zu finden. Eine Übersicht der aktuellen Forschungen auf dem Gebiet der Infraleichtbetone ist Elshahwi [31] zu entnehmen. Beispiele für gebaute Projekte hat Filipaj in seinem Buch zum architektonischen Potenzial von Dämmbeton zusammengestellt [32].

Die nachfolgende Abbildung zeigt einen Überblick über Trockenrohdichte und Druckfestigkeit von ausgewählten ILC-Rezepturen der TU Berlin und anderen Forschungseinrichtungen sowie einiger gebauter Beispiele.

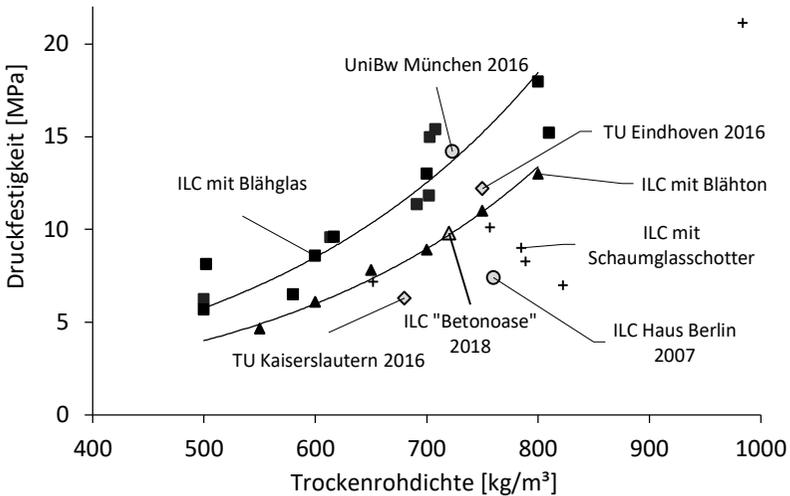


Bild 2-2: Druckfestigkeit über Trockenrohdichte von ausgewählten Infralichtbetonen im Vergleich ([33], ergänzt um [25])

2.1.2 Zusammensetzung, Klassifizierung und Eigenschaften

Als Grundlage für diesen Abschnitt werden die auf Blähton basierenden Rezepturen der TU Berlin betrachtet, die von Hückler [19] entwickelt wurden. Infralichtbeton gemäß dieser Zusammensetzungen [18–20, 34] beinhaltet neben der leichten Gesteinskörnung noch die Bestandteile Zement, Wasser, Silikastaub, Fließmittel und Stabilisierer (Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Zusammensetzungen von Infraleichtbeton, entwickelt an der TU Berlin (basierend auf [19, 20])

	ILC4 – D0,60	ILC5 – D0,65	ILC8 – D0,70	ILC9 – D0,75	ILC11 – D0,80
Zusammensetzung [kg/m ³]					
CEM III/A N – 32,5 LH/NA	190	225	260	296	333
Silikastaub	74	72	70	68	66
wirksames Wasser	144	154	164	175	185
leichte Gesteins- körnung (Blähton) w ₆₀ -feucht 0/2;1/4; 2/6	25; 139; 243	42; 132; 227	59; 126; 212	76; 120; 196	93; 114; 180
Fließmittel	2,86	3,03	3,19	3,36	3,52
Stabilisierer	0,27	0,36	0,45	0,53	0,63

In der Regel bewegen sich Infraleichtbetone in Trockenrohdichtebereichen zwischen ca. 550 und 800 kg/m³. Die verschiedenen Zusammensetzungen wurden ursprünglich gemäß ihrer Trockenrohddichte mit ILC600 bis ILC800 bezeichnet (Tabelle 2-2). Die an der TU Berlin entwickelten Rezepturen mit Blähton (Tabelle 2-1) gehen dabei mit charakteristischen Druckfestigkeiten zwischen ca. 4 und 11 MPa (Tabelle 2-3) einher. In Anlehnung an die Normung gemäß DIN EN 206-1 [5] bzw. DIN EN 1520 [10] wurde von Schlaich et al. [33] eine neue Klassifizierung vorgeschlagen, die sowohl Rohdichte- als auch Festigkeitsklasse berücksichtigt (Tabelle 2-2).

Tabelle 2-2: Klassifizierung und Rohdichteklassen von Infraleichtbeton (basierend auf [33])

Klassifizierung und Rohdichteklassen von Infraleichtbeton					
Bezeichnung „alt“	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Bezeichnung „neu“	ILC4 – D0,60	ILC5 – D0,65	ILC8 – D0,70	ILC9 – D0,75	ILC11 – D0,80
Rohdichte-klasse	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
Trockenrohddichte ρ_{tr} [kg/m ³]	551 bis 600	601 bis 650	651 bis 700	701 bis 750	751 bis 800

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen wurden vor der Einführung der neuen Klassifizierung durchgeführt. Daher werden im Weiteren die alten Bezeichnungen verwendet.

Die folgende Tabelle fasst die wesentlichen Kennwerte für ILC600 bis ILC800 zusammen. Die Werte wurden von Hückler [19] ermittelt und gelten für die dort definierten Zusammensetzungen (entspricht Tabelle 2-1). Weitere Angaben zur detaillierten statistischen Auswertung, Prüfkörperabmessungen und -durchführung finden sich bei Hückler [19].

Tabelle 2-3: Experimentell ermittelte Eigenschaften von Infralichtbetonen nach Hückler [19]

	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Frischbetonrohddichte ρ_{fr} [kg/m ³]	872	906	947	1009	1075
Setzfließmaß s_m [mm]	624	664	637	629	591
Luftporengehalt LP [%]	25	25	23	21	21
angestrebte Trockenrohddichte ρ_{tr} [kg/m ³]	600	650	700	750	800
erreichte Trockenrohddichte ρ_{tr} [kg/m ³]	619	674	711	766	809
mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{ilcm,cyl}$ [MPa]	5,3	7,4	9,4	11,3	13,0
charakt. Zylinderdruckfestigkeit $f_{ilck,cyl}$ [MPa]*	4,0	5,0	8,0	9,0	11,0
Zugfestigkeit f_{ilctm} [MPa]	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87
Elastizitätsmodul E_{ilcm} [MPa]	2300	2700	3100	3500	3900
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, tr}$ [W/(mK)] **linear interpoliert	0,141	0,153	0,166**	0,178**	0,193
* $f_{ilck,cyl}$ wurde in [19] als 5 %-Quantil individuell berechnet. Nach neueren Erkenntnissen sollte die charakteristische Druckfestigkeit mindestens 3 MPa unterhalb der mittleren Druckfestigkeit liegen; vgl. Kap. 5.2.2.					

2.2 Entwurfsaspekte für infraleichte Betone

Um einen materialgerechten und effizienten Einsatz eines Baustoffs beim Entwurf erzielen zu können, gilt es, diverse Aspekte zu berücksichtigen. Neben den mechanischen Eigenschaften, die maßgebend für den Entwurf des Tragwerks und die Bemessung (vgl. Kap. 5) sind, sind hauptsächlich bauphysikalische und auch baupraktische Punkte hier von Bedeutung. Letztere sind für den Entwurf insofern relevant, als sie für die Qualität und Gestaltung der Oberflächen und damit für das äußere Erscheinungsbild des Bauwerks eine Rolle spielen.

Umfangreiche Zusammenstellungen von Entwurfsaspekten für konstruktive, genormte Leichtbetone finden sich zum Beispiel bei Faust [7]. Er schildert bauphysikalische Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherung, den Frost-Tau-Widerstand, geht auf die Carbonatisierung wie auch den Verschleißwiderstand und Brandverhalten ein. Im Hinblick auf die Baupraxis gibt Faust Hinweise zur Herstellung bzw. zum Mischvorgang, zum Einbau sowie der Verdichtung und der Nachbehandlung. Auch Clarke [35] gibt einen sehr umfangreichen Überblick über Wasseraufnahme, Wasserdampfdurchlässigkeit, Carbonatisierung, Wärmeleitfähigkeit, Schall- und Brandverhalten und den chemischen und mechanischen Widerstand sowie baupraktische Hinweise zur Mischung, zum Pumpen und Einbau, der Verdichtung, der Oberflächengestaltung und zur Wirtschaftlichkeit.

Für die Anwendung von Porenbeton-Bauteilen findet sich in Form des Porenbeton Handbuchs [36] eine hilfreiche Quelle für den entwerfenden Planer, die viele relevante Aspekte beleuchtet. In Bezug auf die Bauphysik werden Wärmeleitfähigkeit, Wärmedurchgangskoeffizient, Wärmespeicherung, sommerlicher Wärmeschutz, Wasserdampfdiffusion, Wasseraufnahme, Schlagregenschutz, Schall- und Brandverhalten beschrieben. Hinsichtlich der Baupraxis werden neben diversen Konstruktionsbeispielen auch die Ver- und Bearbeitung, die Oberflächenbehandlung und die Wirtschaftlichkeit geschildert.

Für haufwerksporige Leichtbetone ist kein zusammenstellendes Werk ähnlich den eben aufgeführten Publikationen vorhanden. Jedoch sind den einschlägigen Normen, insbesondere der DIN 4213 [9], die die Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in

Bauwerken regelt, diverse Hinweise auf Eigenschaften der Bauteile zu entnehmen. Hierzu zählen beispielsweise akustische Eigenschaften, Brandverhalten und Feuerwiderstand, Wärmeleitfähigkeit sowie auch Aspekte der Bauausführung (nachträgliche Bearbeitung, Einbau der Bauteile, Auflagerausbildung etc.).

Für infraleichte Betone können die genannten Literaturstellen zu konstruktiven und haufwerksporigen Leichtbetonen sowie Porenbetonen zwar Anhaltspunkte liefern, sie sind aber aufgrund der Andersartigkeit der Betone nicht direkt übertragbar. Jedoch wurden bereits unterschiedliche einzelne Aspekte von diversen Forschenden an Infraleichtbetonen untersucht.

Thienel und Callsen [22] entwickelten für den Bau eines Einfamilienhauses in Aiterbach (Haus Thalmaier) einen Beton mit Blähglas und Blähton und einer Trockenrohddichte von ca. 750 kg/m^3 . Diverse mechanische Kennwerte (Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Spaltzugfestigkeit, Schwinden und Kriechen), die Wärmeleitfähigkeit und die Hydratationswärmeentwicklung wurden geprüft. Auch die Bauausführung des Einfamilienhauses inkl. Qualitätssicherungsmaßnahmen und Oberflächenschutz wurden geschildert. Später wurde zudem die Pumpbarkeit untersucht [37].

Als Vorarbeit zur Erstellung des Experimentalgebäudes Small House I stellten Schulze und Breit [38] ebenfalls umfangreiche Untersuchungen an. Zum Einsatz kam ein Beton mit Blähglas und einer Trockenrohddichte von ca. 650 bis 700 kg/m^3 . Ergänzend zu den mechanischen Eigenschaften (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Schwinden) wurden die Wärmeleitfähigkeit, die Wasseraufnahme, die Wassereindringtiefe unter Druck sowie die Gaspermeabilität geprüft. An dem Gebäude selbst wurden später die Hydratationswärmeentwicklung und der Feuchteverlauf in der Betonrandzone dokumentiert.

Im Rahmen der Infraleichtbeton-Forschung an der TU Berlin berichteten zunächst Schlaich et al. [2] bzw. Zareef [17] über die Entwicklung der ersten ILC-Rezeptur mit Blähton und einer Trockenrohddichte von ca. 760 kg/m^3 . Mechanische Eigenschaften (Druck- und Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul, Verbundspannung, Kriechen und Schwinden), Wärmeleitfähigkeit und Frost-Tau-Widerstand sowie die Vorgehensweise und die Erfahrungen beim Bau eines Einfamilienhauses in Berlin [2] wurden

geschildert. Später wurden im Zusammenhang mit der Rezeptur-entwicklung weitere einzelne Untersuchungen zu bauphysikalischen Aspekten (Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit [39], Wasserdampfdiffusion [40]) wie auch zur Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik [41] und zum Verhalten bei hohen Temperaturen [42] durchgeführt.

Schließer stellt in [43] den sogenannten „Warmbeton“ mit Blähglas als Gesteinskörnung und einer Trockenrohddichte von 480 kg/m^3 vor und untersuchte neben Druckfestigkeit und E-Modul, Verbundspannung, Schwinden und Kriechen auch die Wärmeleitfähigkeit, die Feuchtesorption, die Wasseraufnahme, den Frost-Tau-Widerstand und die Carbonatisierung.

Spiesz und Hunger [24] entwickelten einen Beton mit Blähglas und einer Trockenrohddichte von 760 kg/m^3 und dokumentieren neben der Festigkeit die Wärmeleitfähigkeit, die im Feldversuch beobachtete Hydrationswärmeeentwicklung und die in der Bauausführung gesammelten Erfahrungen.

Darüber hinaus finden sich zahlreiche Literaturstellen, die die Untersuchung einzelner, entwurflich relevanter Aspekte beinhalten. Beispielsweise untersuchen Yu et al. [44] für einen ultra-lightweight concrete mit Blähglas als Gesteinskörnung das Eindringen von Wasser unter Druck. Chen et al. [26] fügen einem infraleichten Beton Miscanthus Fasern zu und untersuchen entsprechend die Auswirkung des Fasergehalts auf die schallabsorbierenden Eigenschaften und die Wärmeleitfähigkeit. In Roberz et al. [45] wird eine Simulationsmethodik entwickelt, mit der der Einfluss einer Gebäudehülle aus infraleichtem Beton auf die Energieeffizienz und den Raumkomfort anhand materialspezifischer Kennwerte wie Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherkapazität und Dichte abgebildet werden kann. Weitere Untersuchungen beschäftigen sich neben den mechanischen Eigenschaften der jeweils betrachteten infraleichten Betone üblicherweise meist auch mit der Wärmeleitfähigkeit, häufig auch noch mit der Verarbeitbarkeit (siehe z.B. Chen et al. [46], Huiskes et al. [27]).

Wie die obigen Aufführungen zeigen, gibt es zwar umfangreiche Publikationen zu relevanten Aspekten für das Entwerfen mit konstruktiven, genormten Leichtbetonen, Porenbetonen und haufwerksporigen Leichtbetonen sowie diverse Untersuchungen zu einzelnen Entwurfsaspekten

infraleichter Betone. Jedoch sind erstere aufgrund der Andersartigkeit der Betone nicht direkt auf ILC übertragbar, letztere beleuchten hingegen meist nur punktuell Eigenschaften spezifischer Rezepturen oder schildern Vorgehensweisen und Erfahrungen aus einzelnen Praxisbeispielen. Eine umfangreiche Erarbeitung von bauphysikalischen und baupraktischen Aspekten, die dem Planer als Grundlage für das Entwerfen mit Infraleichtbeton dienen kann und dabei möglichst ein gewisses Spektrum an Rezepturen mit unterschiedlichen Trockenrohdichten abdeckt, liegt bislang nicht vor.

2.3 Tragfähigkeit von Wänden aus infraleichten Betonen

Die Tragfähigkeit von Wandbauteilen aus genormten Leichtbetonen unter Druckbeanspruchung lässt sich theoretisch aus den jeweiligen Bemessungsvorschriften ableiten. Für gefügedichte Leichtbetone nach DIN EN 206 [5] sind dies der EC2 [8], für haufwerksporige Leichtbetone die DIN EN 1520 [10]/ DIN4213 [9], für Porenbetone die DIN EN 12602 [12] / DIN 4223-101 [47].

ILC ist in keine dieser Normen einzuordnen (siehe Kap. 2.1.1). Da ILC ähnliche Eigenschaften und ein ähnliches Verhalten wie gefügedichte, genormte Leichtbetone aufweist, werden häufig die Regelungen des EC2 [8] als Grundlage für Bemessungsansätze herangezogen. Auch für die Tragfähigkeit von ILC-Wänden kann der EC2 [8] Ansatzpunkte bieten, jedoch ist bislang nicht geklärt, ob eine direkte Übertragbarkeit gegeben ist.

Experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Leichtbeton-Wänden unter Druckbeanspruchung sind in der Literatur nur wenig zu finden. Häufig geht es dabei um spezielle Fragestellungen, wie z.B. die Tragfähigkeit von schlanken Bauteilen (siehe z.B. Molzahn, DAfStb Hefte 375-1 und -2 [48, 49]) oder die Prüfung gemauerter Systeme (siehe z.B. Bacht et al. [50] zur Tragfähigkeit wandartiger Träger aus haufwerksporigen Leichtbeton-Schalungssteinen, oder Gerber-Balmelli et al. [51] zur Tragfähigkeit von Porenbeton-Mauerwerk). Ein weiteres Beispiel ist die Prüfung von Verbundsystemen, wie z.B. im Bericht von Brameshuber et al. [52] beschrieben, in dem die Tragfähigkeit eines Wandsystems aus einer bauteilintegrierten Schalung aus Textilbeton mit einer Verfüllung aus porosiertem Leichtbeton unter zentrischem Druck untersucht wurde.

Auch infraleichte Wandelemente wurden bislang nur im Hinblick auf spezifische Fragestellungen experimentell geprüft. Marinus [53] führte an der TU Eindhoven Untersuchungen an wandartigen Trägern durch mit dem Ziel, die Bewehrungsverankerung in infraleichtem Beton zu untersuchen. Die Probekörper wurden über die Methode der Stabwerkmodelle bemessen und in einem 4-Punkt-Biegeversuch getestet. Die Ergebnisse zeigten keine Übereinstimmung zwischen dem vorhergesagten und dem tatsächlich eingetretenen Versagen. Eine abschließende Aussage zur Verankerung der Bewehrung war nicht möglich.

Auch Neß [54] an der TU Berlin beschäftigte sich mit wandartigen Trägern aus Infraleichtbeton und untersuchte, ob die Methode der Stabwerkmodelle mit ILC anwendbar ist. Die Konzeption von Prüfkörpern und Prüfeinrichtung war auf ein Biegezugversagen ausgelegt, jedoch wurde bei allen Versuchen bis auf eine Ausnahme ein frühzeitiges Versagen in den Knotenbereichen festgestellt, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse eingeschränkt war.

Untersuchungen zur Tragfähigkeit von Wandbauteilen aus Infraleichtbeton mit geringer Schlankheit unter Druckbeanspruchung liegen bislang nicht vor.

2.4 Bemessungskonzepte für Wände aus infraleichten Betonen

Die Bemessung von genormten Leichtbetonen ist den jeweiligen einschlägigen Regelwerken zu entnehmen. Für gefügedichte Leichtbetone gemäß DIN EN 206 [5] formuliert der EC2 [8] allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, in Kap. 11 werden zusätzliche Regeln für Bauteile und Tragwerke aus Leichtbeton benannt. Aus dem Bereich der internationalen Normung sind in diesem Zusammenhang u.a. der fib Model Code [55], der als Basis zur Entwicklung des EC2 [8] diente, und die amerikanische Beton-Norm ACI 318 (Building Code Requirements for Structural Concrete [56]) zu nennen. Neben den Vorgaben aus der Normung finden sich in der Literatur Werke, die die Konzepte zur Bemessung von konstruktiven Leichtbetonen, auch von druckbeanspruchten Wandbauteilen, ausführlich erläutern. Vorrangig sind hier die Bücher von Faust [7] und Clarke [35] von Bedeutung.

Für Porenbetone sind durch die DIN EN 12602 [12] / DIN 4223-101 [47] ebenfalls Regelwerke vorhanden, die die Bemessung vorgeben.

Ergänzende Informationen können u.a. dem Porenbeton Handbuch [36] entnommen werden, in dem beispielsweise Angaben zu Lastannahmen zu finden sind. Die Bemessung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton wird wiederum in DIN EN 1520 [10] und DIN 4213 [9] beschrieben.

Wie bereits erläutert sind die bekannten Regelwerke und Literaturstellen mit Bemessungskonzepten für genormte Leichtbetone nicht unmittelbar auf Infraleichtbeton übertragbar, da materialspezifische Eigenschaften und Parameter eine wesentliche Grundlage für eine Bemessung darstellen und sich bei Infraleichtbeton von den genormten Betonen unterscheiden. Deutlich wird dies z.B. unter anderem beim Vergleich der Eigenschaften von ILC mit den grundlegenden Ansätzen der DIN EN 1520 [10] für haufwerksporige Leichtbetone. Da die DIN sowohl Rohdichte- als auch Festigkeitsklassen abdeckt, in denen sich auch die Infraleichtbeton-Zusammensetzungen bewegen, liegt eine Orientierung an den Vorgaben der Norm zunächst nahe. Auch Thienel [57] verweist auf die DIN EN 1520 [10] als mögliche Grundlage für eine normgerechte Herstellung von vorgefertigten ILC-Bauteilen. Jedoch ist die direkte Übertragbarkeit aufgrund der abweichenden Materialeigenschaften fraglich. Beispielsweise besitzt der an der TU Berlin entwickelte ILC [19] höhere Bruchdehnungen, niedrigere Elastizitätsmoduln oder auch einen anderen Dauerstandfaktor als die in der Norm gewählten Ansätze für haufwerksporige Leichtbetone (vgl. auch Lösch et al. [15]).

An der TU Berlin wurde als Grundlage für die Bemessung von ILC-Bauteilen insbesondere das Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen durch Hückler [19] untersucht. Der Schwerpunkt lag dabei auf dem Verbundverhalten, dem Riss- und Verformungsverhalten bei Zugbeanspruchung und dem Trag- und Verformungsverhalten bei Biegebeanspruchung. Auf Basis der Untersuchungen wurden Ingenieurmodelle zum Verbund, zur Verformung und zur Bemessung von Biegebalken im GZT erarbeitet.

Ein Bemessungskonzept, das sowohl Grundlagen und Ausgangswerte als auch Bemessungsansätze für druckbeanspruchte ILC-Wandbauteile beinhaltet, existiert bislang nicht.

2.5 Offene Fragestellungen und detaillierte Ziele

Anhand der Erläuterungen der vorangegangenen Abschnitte lassen sich die folgenden Punkte zusammenfassen:

- Zu Aspekten für das Entwerfen liegen zwar umfassende Publikationen für genormte Leichtbetone vor, diese sind jedoch nicht direkt auf ILC übertragbar. Eine umfangreiche Erarbeitung von bauphysikalischen und baupraktischen Aspekten, die dem Planer als Grundlage für das Entwerfen mit Infraleichtbeton dienen kann und dabei möglichst ein gewisses Spektrum an Rezepturen mit unterschiedlichen Trockenrohdichten abdeckt, liegt bislang nicht vor.
- Zur Tragfähigkeit von Infraleichtbeton-Wandbauteilen wurden Untersuchungen bislang nur in Bezug auf spezifische Fragestellungen, insbesondere zu wandartigen Trägern, durchgeführt. Untersuchungen zur Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen mit geringer Schlankheit unter Druckbeanspruchung liegen bislang nicht vor.
- Bemessungskonzepte liegen zwar für genormte Leichtbetone vor, diese sind jedoch nicht direkt auf ILC übertragbar. Ein Bemessungskonzept, das sowohl Grundlagen und Ausgangswerte als auch Bemessungsansätze für druckbeanspruchte ILC-Wandbauteile beinhaltet, existiert bislang nicht.

Aus diesen offenen Punkten lassen sich die folgenden Fragestellungen ableiten:

- Welche Aspekte sind beim Entwurf von Gebäuden mit ILC-Außenwänden zu berücksichtigen?
 - Welche bauphysikalischen Eigenschaften besitzt das Material?
 - Welche baupraktischen Aspekte sind zu beachten?
 - Wie verhält es sich mit Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und rechtlichen Randbedingungen?
- Was ist bei der Bemessung von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung zu beachten?
 - Welche allgemeinen Grundlagen (z.B. Bewehrungsart und Dauerhaftigkeit) sind zu berücksichtigen?
 - Welche Ausgangswerte (z.B. mechanische Kennwerte, Kennwerte des Langzeitverhaltens) sind für die Bemessung anzusetzen?

- Kann die Bemessung im GZT aus bestehenden Normen übertragen werden?
 - Lassen sich experimentelle, maximale Traglasten im Bruchzustand rechnerisch durch Anlehnung an vorhandene Bemessungsansätze korrekt abbilden? Sind Anpassungen der Ansätze notwendig?
 - Welcher Bemessungsansatz ist anwendbar?
- Kann die Bemessung im GZG aus bestehenden Normen übertragen werden?

Da diese offenen Fragen eine sehr große Bandbreite umfassen, können nicht alle Punkte im Rahmen der vorliegenden Arbeit vollumfänglich beantwortet werden. Zur Eingrenzung des Bearbeitungsrahmens werden daher Schwerpunkte gesetzt, die in der folgenden Detaillierung der Ziele aus Kap. 1.1 formuliert werden:

- Erstes Ziel ist die Aufbereitung von Entwurfsaspekten für Gebäude mit ILC-Wänden.
Dabei wird der Fokus auf die wichtigsten Aspekte gelegt, ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht nicht. Die Untersuchungen erfolgen zudem zwangsläufig rezepturabhängig, wobei angestrebt wird, soweit möglich einen übergreifenden Trockenrohdichtebereich abzudecken. Konkret werden folgende Aspekte eingeschlossen:
 - Bauphysikalische Aspekte (Wärmeleitfähigkeit, Wärmedurchgangskoeffizient, Wärmespeicherkapazität, Wasseraufnahme, Wasserdampfdiffusion, Frost-Tau-Widerstand, Schallschutz)
 - Baupraktische Aspekte (Schalung, Herstellung, Einbau, Ausschallfristen und Nachbehandlung, Oberflächenschutz)
 - Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und rechtliche Randbedingungen werden nur kurz angeschnitten und sind nicht eigentlicher Teil der Arbeit.
- Zweites Ziel ist die Erarbeitung eines Vorschlags für ein Bemessungskonzept für ILC-Wandbauteile unter Druckbeanspruchung. Der Fokus liegt dabei auf dem Grenzzustand der Tragfähigkeit. Konkret werden folgende Dinge eingeschlossen:
 - Formulierung von allgemeinen Grundlagen und Ausgangswerten (u.a. Dauerhaftigkeit, Bewehrungswahl, mechanische Eigen-

schaften, Spannungs-Dehnungs-Linien, Kennwerte für Kriechen/Schwinden etc.);

- Vorschlag eines Bemessungsansatzes für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT);

Zur Untermauerung des Bemessungsansatzes sind zunächst Untersuchungen zur Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen unter Druckbeanspruchung durchzuführen. Dies beinhaltet folgende Punkte:

- Analyse von bestehenden Bemessungsansätzen für genormte Leichtbetone unter Druck im GZT, Wahl eines Ansatzes
- experimentelle Untersuchungen der maximalen Traglast von ILC-Wandbauteilen (Fokus: zentrische Druckbelastung)
- Modellbildung durch Formulierung eines Berechnungsansatzes für die maximale Traglast
- Abgleich der rechnerischen und experimentellen Ergebnisse zur maximalen Traglast und Beurteilung der Anwendbarkeit des gewählten Bemessungsansatzes im GZT
- Hinweise für die Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) (vertiefte Untersuchungen zum GZG sind nicht Teil der Arbeit)
- Hinweise zu Konstruktionsgrundlagen (Verbundverhalten und Mindestbewehrung)

Im folgenden Kapitel wird entsprechend der Formulierung des ersten Ziels zunächst die Erarbeitung der Entwurfsaspekte geschildert.

3 Entwurfsaspekte

Wie bereits erläutert sind für den materialgerechten Entwurf mit Infralichtbeton diverse Aspekte zu berücksichtigen, die sich aus den spezifischen Eigenschaften von ILC ergeben. Im Folgenden werden wesentliche bauphysikalische und baupraktische Aspekte erläutert, wobei angestrebt wurde, die Informationen soweit möglich übergreifend für verschiedene Trockenrohdichtebereiche zur Verfügung zu stellen. Ein Anspruch auf Vollständigkeit besteht dabei im Rahmen dieser Arbeit nicht, es soll jedoch ein signifikanter Schritt in Richtung einer umfassenden Zusammenstellung von Aspekten für das Entwerfen mit ILC getan werden. Die Themen Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und rechtliche Randbedingungen sind nicht Teil der Arbeit, abschließend werden hierzu jedoch einige Hinweise gegeben.

3.1 Bauphysikalische Aspekte

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen einige wesentliche bauphysikalische Eigenschaften von Infralichtbeton auf, die für das Entwerfen mit ILC von Bedeutung sind. Es handelt sich dabei um Eigenschaften, die Auswirkungen auf die wärmedämmende Wirkung, die Aufnahme von Feuchtigkeit, die Dauerhaftigkeit und den Schallschutz haben. Viele der Eigenschaften wurden im Rahmen von diversen studentischen Arbeiten für verschiedene ILC-Klassen ermittelt. Weiterführende Informationen zu den jeweiligen Untersuchungen wie auch den zugrunde liegenden ILC-Rezepturen finden sich in den angegebenen Quellen. Informationen zu hier nicht benannten Aspekten wie z.B. zum Brandschutz finden sich unter anderem bei Lösch und Rieseberg [1] und Schlaich et al. [33].

3.1.1 Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizient

Der Wärmedurchgangskoeffizient U ist ein maßgeblicher Parameter für den Entwurf einer Gebäudehülle und bedingt bei ILC die Auswahl der Wanddicke und Rezeptur. Der Koeffizient hängt dabei von der Wärmeleitfähigkeit des Materials ab. Diese wurde für verschiedene ILC-Rezepturen experimentell geprüft. Die Ergebnisse wurden exemplarisch für ILC800 gemäß DIN EN ISO 10456 [58] von den Versuchsrandbedingungen auf Bemessungsrandbedingungen rechnerisch angepasst und die ermittelte prozentuale Erhöhung näherungsweise auf die weiteren ILC-

Klassen übertragen. Die resultierenden U-Werte für exemplarische Wanddicken zwischen 50 und 65 cm sind Tabelle 3-1 zu entnehmen. Hier wird deutlich, dass der üblicherweise für Außenwände angestrebte Referenzwert von $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ [59] meist überschritten wird. Beim Entwurf mit ILC ist daher darauf zu achten, dass diese höheren U-Werte der ILC-Bauteile im Hinblick auf den Transmissionswärmeverlust des Gesamtgebäudes durch andere Bauteile wie z.B. Fenster oder Dächer ausgeglichen werden. Des Weiteren ist eine Staffelung der eingesetzten ILC-Rohdichten über die Gebäudehöhe sinnvoll. In den oberen Geschossen, in denen weniger Lasten anfallen, kann auf Rezepturen mit niedriger Rohdichte zurückgegriffen werden, die einen größeren Beitrag zur Begrenzung des Transmissionswärmeverlustes leisten können. In den unteren Geschossen können hingegen höhere Rohdichten gewählt werden, die maßgeblich dem Lastabtrag dienen. Eine weitere Effizienzsteigerung ist durch die Kombination unterschiedlicher ILC-Klassen in einem Wandquerschnitt möglich, wie beim Forschungsprojekt MultiILC (Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften) [21] untersucht wurde. Hier ergab sich aus der Kombination von speziell entwickeltem Schalenbeton ILC800_{shell} und Kernbeton ILC450_{core}, basierend auf den Bemessungswerten der Wärmeleitfähigkeiten, ein U-Wert von $0,26 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ für eine Wandstärke von insgesamt 45 cm.

Tabelle 3-1: Wärmeleitfähigkeiten und Wärmedurchgangskoeffizienten von ILC ([1, 33] basierend auf [60])

		ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$ [W/(mK)]		0,141	0,153	0,166 ¹⁾	0,178 ¹⁾	0,193
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit ²⁾ λ_{Bem} [W/(mK)]		0,160	0,174	0,189	0,202	0,219
U-Wert [W/(m ² K)] für Wanddicke von	50 cm	0,30	0,33	0,35	0,38	0,41
	55 cm	0,28	0,30	0,32	0,35	0,37
	60 cm	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34
	65 cm	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32
¹⁾ linear interpoliert ²⁾ Zuschlag exemplarisch für ILC800 bei 23°C/80 % Luftfeuchtigkeit berechnet und für ILC600 bis ILC750 übernommen						

3.1.2 Spezifische Wärmespeicherkapazität

Die spezifische Wärmespeicherkapazität c ist ein Maß dafür, wieviel Wärme ein Stoff speichern kann. Sie ist zusammen mit der Rohdichte ρ vor allem für den sommerlichen Wärmeschutz von Bedeutung. Die Höhe des Produkts $c \cdot \rho$ lässt darauf schließen, in welchem Grad ein Baustoff einen Innenraum vor hohen Außentemperaturen schützt (je höher das Produkt, desto besser der Schutz).

Zur Bestimmung der spezifischen Wärmespeicherkapazität von ILC800 wurde das Hot-Disk-Verfahren genutzt [39]. Das Ergebnis liegt etwas unterhalb der Wärmespeicherkapazitäten von z. B. Normalbeton oder Porenbeton (Tabelle 3-2), jedoch in ähnlicher Größenordnung. Die Wärmespeicherkapazität c von ILC fällt daher im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz im Vergleich zu Normalbeton weniger ins Gewicht als die geringe Rohdichte.

Tabelle 3-2: Spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC800 [39] und anderer Baustoffe [61] im Vergleich [1, 33]

Material	Spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/(kgK)]
ILC800	863
Porenbeton	1000
Beton (Rohdichte 2200 kg/m ³)	1000
Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge (ausschließlich Blähton)	1000
Mauerwerk Kalksandstein	1000

3.1.3 Wasseraufnahme

Eine Wasseraufnahme kann bei einer Gebäudehülle mit ILC durch z.B. Beregnung stattfinden, wenn die Feuchtigkeit über kapillare Saugfähigkeit in das Bauteil transportiert wird. Das Ausmaß der Wasseraufnahme ist daher von Interesse, um eine übermäßige Durchfeuchtung und damit u.a. auch eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit zu vermeiden. Der Wasseraufnahmekoeffizient von Beton wird gemäß des Prüfverfahrens nach DIN EN ISO 15148 [62] über 24h ermittelt. Die Ergebnisse von verschiedenen Untersuchungen mit ILC sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Es zeigt sich eine ähnliche Größenordnung des Wasseraufnahmekoeffizienten wie bei Normalbeton ($W_w = 0,1$ bis $1,0 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ für Zementbeton [63]) und eine geringere Ausprägung als bei z.B. Porenbeton ($W_w = 2$ bis $8 \text{ kg/m}^2\text{h}^{0,5}$ [41]). Weitere Prüfungen zur statistischen Untermauerung sind jedoch empfehlenswert. Zudem ist zu beachten, dass das Prüfverfahren, insbesondere hinsichtlich der zeitlichen Begrenzung auf 24h, für Normalbetone ausgelegt wurde. Erfahrungen mit ILC haben ergeben, dass mit einer längerfristigen Aufnahme von Feuchtigkeit gerechnet werden muss [1], weshalb von einer höheren Wasseraufnahme bei einem Zeitraum von über 24h hinaus auszugehen ist. Beim Entwurf mit ILC ist daher in jedem Fall das Hydrophobieren der Außenflächen empfehlenswert.

Tabelle 3-3 Wasseraufnahmekoeffizient von ILC ([33], basierend auf [1, 64, 65])

	ILC600	ILC700	ILC800
Wasseraufnahmekoeffizient W_w [kg/(m ² h ^{0,5})]	0,25	0,45	0,69

3.1.4 Wasserdampfdiffusion

Die Diffusionsoffenheit eines Baustoffes hat u.a. Einfluss auf das Raumklima, da bei zunehmender Diffusionsoffenheit Feuchtigkeit im Raum abgepuffert werden kann. Zur Beschreibung dient die Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ . Je kleiner die Widerstandszahl, desto größer die Diffusionsoffenheit. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen mit unterschiedlichen ILC-Klassen in Anlehnung an DIN EN ISO 12572 [66] im trockenen Zustand sowie entsprechende Werte von üblichen Baustoffen im Vergleich. Es wird deutlich, dass die Diffusionsoffenheit eines ILC600 in der Größenordnung eines Porenbetons oder Lehms einzuordnen ist, während diejenige eines ILC800 geringer ist, jedoch deutlich besser als die eines Normalbetons oder konventionellen Leichtbetons mit geschlossenem Gefüge. Beim Entwurf bzw. der Nutzung von ILC sollte darauf geachtet werden, dass die Diffusionsoffenheit gewahrt bleibt und nicht durch eventuelle nachträgliche, ungeeignete Wandbekleidungen oder -beschichtungen eingeschränkt wird.

Tabelle 3-4: Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ von ILC und anderen Baustoffen im Vergleich [1, 33]

Material	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ (feucht/trocken) [-]
ILC600 [67]	-/11
ILC800 [40]	-/31
Normalbeton (Rohdichte 2200 kg/m ³) [58]	70/120
Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge [68]	70/150
Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge und porigen Zuschlägen [68]	5/15
Dampfgehärteter Porenbeton [68]	5/10
Lehmbaustoffe [68]	5/10

3.1.5 Frost-Tau-Widerstand

Beim Entwurf mit ILC wird dieser in aller Regel als bewittertes, vertikales Außenbauteil in der Gebäudehülle eingesetzt. Dementsprechend ist die überwiegende Mehrheit der ILC-Bauteile in die Expositionsklasse XF1 (mäßige Wassersättigung ohne Taumittel) einzuordnen. Für die Klasse XF3 (hohe Wassersättigung ohne Taumittel) führt der EC2 [8] als Beispiel waagrechte Flächen an, die Regen und Frost ausgesetzt sind. Eine solche Verwendung wäre für ILC zwar möglich, sollte aber immer mit entsprechender Oberflächenbeschichtung geplant werden, so dass hier keine direkte Bewitterung des Materials stattfindet. Im Hinblick auf die Frost-Tau-Beständigkeit ist demnach die Expositionsklasse XF1 für ILC-Bauteile relevant.

Zur Ermittlung des Frost-Tau-Widerstands von Beton wird gemäß DIN CEN/TS 12390-9:2006 [69] nach einer definierten Anzahl von Frost-Tau-Zyklen das Gewicht des abgewitterten Materials bestimmt und mit einem Abnahmekriterium verglichen. Leider existiert für die Klasse XF1 kein Abnahmekriterium, weshalb für die Einordnung der Prüfergebnisse mit Infraleichtbeton auf das Abnahmekriterium für XF3 für Normalbeton (je m² Fläche $\leq 1000 \text{ g/m}^2$ nach 28 Zyklen [70]) zurückgegriffen werden muss.

Dabei wird für ILC der Gewichtsgrenzwert in Anlehnung an Faust [7] über das Verhältnis der Trockenrohichte der betrachteten ILC-Klasse und von Normalbeton modifiziert, um das geringere Gewicht des ILC entsprechend zu berücksichtigen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen aus zwei Versuchsreihen mit unterschiedlichen ILC-Klassen. Bei der ersten Versuchsreihe [64] konnten die abgewitterten Flächen nicht exakt erfasst werden und wurden daher auf der sicheren Seite angesetzt. Die mittleren Abwitterungen von ILC600 lagen oberhalb, von ILC800 unterhalb des modifizierten Abnahmekriteriums für XF3. Trotz der relativ hohen Standardabweichung lagen alle Einzelwerte mit ILC800 unterhalb des Abnahmekriteriums. Die Versuchsreihe 2 mit ILC700 [65], bei der die abgewitterten Flächen genau ermittelt werden konnten, ergab deutlich geringere Werte und eine Einhaltung des XF3-Grenzwerts.

Tabelle 3-5: Mittlere Abwitterung und Standardabweichung von ILC im CF-Verfahren nach 28 Frost-Tau-Wechseln und modifiziertes Abnahmekriterium ([33], basierend auf [64, 65])

	ILC600	ILC700	ILC800
Versuchsreihe	1 [64]	2 [65]	1 [64]
Modifiziertes Abnahmekriterium für XF3 (Mittelwert) [g/m ²]	275	345	374
Abwitterung (Mittelwert) [g/m ²]	1620 ¹⁾	86	262 ¹⁾
Standardabweichung [g/m ²]	322	42	79
¹⁾ In dieser Versuchsreihe konnte die bewitterte Fläche nicht exakt erfasst werden; die Abwitterung wurde auf der sicheren Seite auf die kleinstmögliche Fläche bezogen, was in erhöhten Abwitterungen je Fläche resultiert.			

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Prüfungen ursprünglich für Normalbeton und dessen kapillare Flüssigkeitsaufnahme konzipiert wurden. Da bei ILC von einer Flüssigkeitsaufnahme über einen längeren Zeitraum auszugehen ist, lässt dies einen erhöhten Sättigungsgrad mit zunehmender Dauer der Prüfung vermuten. Dies könnte wiederum zu einer erhöhten Schädigung führen. Solch eine

verstärkte Abwitterung wurde jedoch bei den hier beschriebenen Untersuchungen nicht beobachtet.

Neben der Bestimmung der Abwitterung stellt die Messung des relativen dynamischen E-Moduls $RDM_{UPPT,28}$ eine weitere Möglichkeit zur Bewertung der Schädigung eines Betons durch die Frost-Tau-Beanspruchung dar. Hierdurch wird die Entstehung von inneren Gefügestörungen bewertet. Die Bestimmung von $RDM_{UPPT,28}$ für einen ILC700 ergab eine ausreichende Beständigkeit gegenüber inneren Gefügestörungen [65].

Des Weiteren wurde auch der Einfluss von verschiedenen Hydrophobierungsmitteln auf die Frost-Tau-Beständigkeit untersucht. Anhand der Prüfungen an einem ILC700 ergaben sich für alle gewählten Hydrophobierungsmittel positive Effekte, die Abwitterung wurde je nach Produkt um ca. 40 % bis zu ca. 90 % verringert [65].

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die geprüften Rezepturen des ILC800 und ILC700 mittlere Abwitterungen aufwiesen, die auf eine ausreichende Frost-Tau-Beständigkeit auch ohne Oberflächenschutz für einen Einsatz gemäß Expositionsklasse XF3, und damit indirekt auch XF1, schließen lassen. Bei ILC600 wurde das Abnahmekriterium für XF3 nicht eingehalten. Für die Expositionsklasse XF1, die für die meisten ILC-Bauteile relevant ist, kann aufgrund des fehlenden Abnahmekriteriums keine explizite Aussage getroffen werden. Empfehlenswert ist eine weitere Untersuchung der Klasse ILC600 mit einem Oberflächenschutzsystem in Form einer Hydrophobierung, wodurch sich bereits mit ILC700 eine gute Erhöhung der Beständigkeit gezeigt hatte. Für den Entwurf mit ILC bleibt trotz der teils positiven Ergebnisse auch ohne Oberflächenschutz für alle ILC-Klassen die Empfehlung bestehen, immer eine Hydrophobierung der Außenbauteile vorzusehen, um eine übermäßige Durchfeuchtung zu vermeiden.

3.1.6 Schallschutz

Das Schalldämm-Maß ist je nach Standort eines geplanten Bauvorhabens ein entscheidender Entwurfsaspekt für die Eignung bzw. den Einsatz eines Materials in der Gebäudehülle. Infralichtbeton soll in der Gebäudehülle eingesetzt werden und wird z.B. im Geschosswohnungsbau im städtischen Bereich maßgeblichen schalltechnischen Anforderungen genügen müssen. Im Entwurf mit ILC kann daher das Schalldämm-Maß ebenfalls ein

entscheidender Faktor für die Wahl der Wandstärke und der Trockenrohdichte sein.

Das Schalldämm-Maß von ILC wurde bislang nicht experimentell getestet, kann aber über die flächenbezogene Masse m' (Produkt aus Wandstärke und Trockenrohdichte) in Anlehnung an DIN 4109-32 [71] ermittelt werden. Das bewertete Schalldämm-Maß R_w stellt dabei einen rein bauteilbezogenen Wert dar und berücksichtigt nicht flankierende Bauteile. Je nach Material werden zur Ermittlung von R_w verschiedene Formeln herangezogen. Für Infraleichtbeton wurde näherungsweise die Formel für Leichtbeton gewählt, da diese für Massenbereiche ausgelegt ist, in die auch gängige ILC-Bauteile fallen. Eine Vergleichsrechnung mit der Formel für Porenbetone ergab zudem nur geringfügig abweichende Werte (Differenzen $< 2\%$).

Tabelle 3-6 zeigt die Ermittlung der bewerteten Schalldämm-Maße gemäß der Leichtbetonformel für die unterschiedlichen ILC-Klassen und eine exemplarische Wandstärke von 50 cm. In Tabelle 3-7 sind die Ergebnisse für Wandstärken zwischen 45 cm bis 60 cm und zum Vergleich die Schalldämm-Maße einiger konventioneller Bauweisen aufgeführt (für Verbundsysteme mit Normalbeton und Kalksandstein wird zur Vereinfachung nur die Trägerwand betrachtet, der Einfluss der Dämmschicht kann sowohl positiv als auch negativ ausfallen [72]). Es wird deutlich, dass die bewerteten Schalldämm-Maße mit einem Bereich von 54 bis 62 dB aus Tabelle 3-7 einer durchschnittlichen Größenordnung entsprechen. Sie liegen größtenteils unterhalb der Werte einer schweren Bauweise, jedoch deutlich oberhalb der Werte einer leichten Bauweise wie Porenbeton. Für den Entwurf mit ILC bedeutet dies, dass ein guter Schallschutz durch ILC-Bauteile möglich ist, die projektspezifischen Anforderungen jedoch frühzeitig in die Planung einbezogen werden sollten, da sich hieraus ggf. maßgebliche Randbedingungen für die Wahl der Wandstärke und der Trockenrohdichteklasse ergeben.

Tabelle 3-6 Ermittlung der bewerteten Schalldämm-Maße R_w für unterschiedliche ILC-Klassen gemäß Leichtbetonformel nach DIN 4109-32 [71], exemplarisch für Wanddicke 50 cm (basierend auf [1, 33])

	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
mittlere Rohdichte ρ [kg/m ³]	575	625	675	725	775
Wanddicke d [cm]	50				
flächenbezogene Masse $m' = d \cdot \rho$ [kg/m ²]	288	313	338	363	388
bewertetes Schalldämm-Maß R_w [dB]	56	57	58	59	60

Tabelle 3-7 Bewertete Schalldämm-Maße R_w für unterschiedliche ILC-Klassen gemäß Leichtbetonformel nach DIN 4109-32 [71] und konventioneller Wandkonstruktionen im Vergleich (basierend auf [1, 33])

Konstruktionsart	R_w [dB]
Infraleichtbeton, je nach Klasse (ILC600 bis ILC800) und Wandstärke (45 cm bis 60 cm)	54 - 62
Porenbeton, 350 kg/m ³ , 48 cm, 1 cm Putz beidseitig (1000 kg/m ³) gemäß DIN 4109-32 [71]	51
Kalksandstein, verputzt (1 cm – 2 cm beidseitig, 1000 kg/m ³), je nach Dichte (1,4 kg/dm ³ - 2,2 kg/dm ³) und Wanddicke (11,5 cm – 30 cm) [73]	45 - 65
Normalbeton, 20 cm, gemäß DIN 4109-32 [71]	61

3.2 Baupraktische Aspekte²

Baupraktische Aspekte sind insofern für den Entwurf relevant, als sie sich auf die Gestaltungsmöglichkeiten der Bauteile und Qualität der Oberflächen auswirken und damit auch für das äußere Erscheinungsbild des Bauwerks eine Rolle spielen. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Aspekte der Herstellung und des Einbaus, geeignete Schalungstechniken, das Ausschalen und die Nachbehandlung und auch der Oberflächenschutz zu nennen.

3.2.1 Geeignete Schalungen

Die Eigenschaften der Schalung haben wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Sichtbetonqualität. In der Praxis wird häufig, insbesondere im Ortbetonbau, mit Schalplatten basierend auf Holz gearbeitet. Es steht eine Vielzahl von Produkten zur Verfügung, die sich in Stabilität, Qualität, Beschichtung etc. unterscheiden. Eine Eigenschaft, die wesentlichen Einfluss auf das Erscheinungsbild des Sichtbetons nimmt, ist das Saugverhalten des Schalmaterials. Saugende Schalungen führen in der Regel vermehrt zu dunkleren, leicht rauen und meist lunker- und porenarmen Oberflächen. Nichtsaugende Schalungen hingegen resultieren in glatten, helleren Oberflächen.

Um geeignete Schalmaterialien für Infralichtbeton zu identifizieren, wurden verschiedene Schalplatten getestet [74], die unterschiedliche Beschichtungen und Saugverhalten aufwiesen. Als Betontrennmittel wurde ein teilsynthetisches, nicht wassermischbares und lösemittelfreies Universaltrennmittel verwendet [75]. Die Ergebnisse entsprachen den Erwartungen: Zum Beispiel wurde mit einer Birkenperrholzplatte mit einer einseitigen, leicht saugenden Spezialfilmbeschichtung eine lunker- und porenarme, leicht raue Oberfläche erzielt. Eine nicht saugende Birkenperrholzplatte, die beidseitig mit Phenolharzfilm beschichtet war, ergab hingegen eine glatte Oberfläche mit verteiltem Porenbild (vgl. Bild 3-1).

² Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

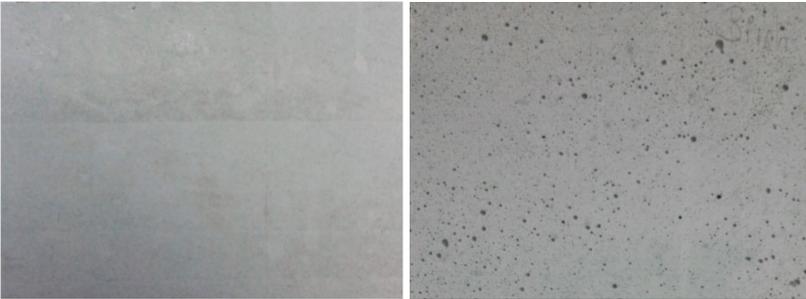


Bild 3-1: Exemplarische Oberflächen von ILC800 mit leicht saugender Spezialfilmbeschichtung (links) und nicht saugender Birkensperrholzplatte (rechts) [76]

Wenn eine porenarme Oberfläche eines Infralichtbetonbauteils gewünscht ist, ist die Verwendung einer saugenden Schalplatte empfehlenswert. Alternativ ist auch der Einsatz von Vlies möglich (vgl. Bild 3-2).

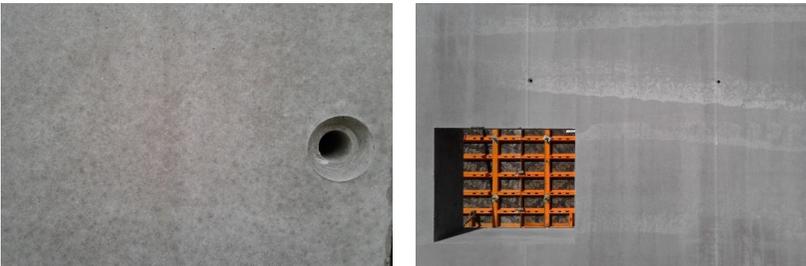


Bild 3-2: Oberflächen des Bauvorhabens Jugendfreizeiteinrichtung Betonoase (vgl. [33]) mit ILC700, geschalt mit Vlies (Fotos: Alex Hückler)

3.2.2 Herstellung und Einbau

3.2.2.1 Herstellung

Die Herstellung von Infralichtbeton ist – wie bei gängigem Normal- und Leichtbeton – nicht auf bestimmte Ausgangsstoffe bzw. eine bestimmte Zusammensetzung festgelegt. So kann und sollte die Herstellung von ILC dem entsprechenden Betonwerk angepasst werden, sowohl in Bezug auf die Ausgangsstoffe als auch auf die Betonzusammensetzung und Mischregime.

Um die betontechnische Qualitätskontrolle für ein konkretes Projekt sicherzustellen, sollten in einem ersten Schritt Probemischungen seitens des Betonlieferanten im Labor erfolgen, um die Zusammensetzung zur Erzielung der in der Ausschreibung zu definierenden Frisch- und Festbetoneigenschaften festzulegen. Die definierten Frischbetoneigenschaften dienen auch der späteren Qualitätssicherung bei der Betonage.

Beim Mischvorgang kommt der leichten Gesteinskörnung besondere Bedeutung zu. Aufgrund ihrer Porosität kann sie dem Zementleim während des Mischens und bis zum Erstarren Wasser entziehen. Daher hat der Feuchtegehalt der leichten Gesteinskörnung und das damit einhergehende Saugverhalten maßgeblichen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften (siehe auch Thienel [4]). Im Vorfeld des Mischprozesses sollte daher zunächst der Eigenfeuchtegehalt der Gesteinskörnung bestimmt werden. Darauf basierend wird der Saugwasseranteil ermittelt, der möglichst im ersten Schritt zugegeben wird. Nach dem anschließenden Mischprozess wird im Werk eine Mischung entstehen, die zunächst eine zu flüssige Konsistenz besitzt, jedoch während des Transports durch weiteres Saugen der Gesteinskörnung die gewünschte Konsistenz schließlich erreicht. Weitere Details zum Saugverhalten der Gesteinskörnung sind bei Hückler [19] zu finden.

In jedem Fall empfiehlt es sich, durch die beauftragte Baufirma eine Probewand erstellen zu lassen, um Herstellung, Einbau, Schalung und Sichtbetonqualität vorab prüfen und optimieren zu können.

3.2.2.2 Einbau

Das Einbringen von Infraleichtbeton in die Schalung erfolgt in der Regel mit Kübeln. Das Pumpen von ILC war bislang nicht zielführend. Einerseits wird das Wasser in die leichte Gesteinskörnung gepresst, wodurch die Rohdichte steigt bzw. die Konsistenz sich versteifen kann, was wiederum zu Verstopfungen führt. Andererseits wird Luft aus dem Leim getrieben, was ebenfalls die Rohdichte erhöht. Im Rahmen neuerer Entwicklungen an der UniBW München in Zusammenarbeit mit der Holcim GmbH konnten die Probleme bzgl. der Pumpbarkeit jedoch ausgeräumt werden [37].

Infraleichtbeton gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 2-1 ist sehr fließfähig, ähnlich selbstverdichtendem Beton. Dies bedeutet, dass ILC

selbstnivellierend ist und Zwischenräume wie z. B. zwischen Bewehrung und Schalung gefüllt werden, der Beton jedoch im Gegensatz zu üblichen, selbstverdichtenden Betonen nicht selbst entlüftet. Dies wäre kontraproduktiv, da der erhöhte Luftporengehalt für die wärmedämmende Eigenschaft erwünscht ist. Eine klassische Verdichtung anhand von Innenrüttlern ist dementsprechend nicht erforderlich und sollte auch nicht erfolgen, da sonst zu viel Luft aus dem Leim ausgetrieben werden könnte, was eine zu hohe Rohdichte bzw. eine Entmischung zur Folge haben könnte. Gegebenenfalls können Verdichtungsmaßnahmen (z. B. Außenrüttler, Stochern) aus optischen Gründen hilfreich sein, um z. B. Betonierhorizonte an der Oberfläche zu vermeiden.

Die Hydratation führt bei Infralichtbeton, genauso wie bei genormten Leichtbetonen, zu einem verstärkten Temperaturanstieg. Die Stärke des Anstiegs hängt dabei vom Zementgehalt z , der Hydratationswärme H des Zements und der Wärmespeicherung (Produkt aus Rohdichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c) ab [7]. Um der Temperaturentwicklung entgegenzuwirken, wurde für die Rezepturen aus Tabelle 2-1 die Zementsorte CEM III für ILC gewählt, da diese eine vergleichsweise geringe Wärmeentwicklung besitzt. Aufgrund des unterschiedlichen Zementgehalts ist für die verschiedenen ILC Zusammensetzungen nach Tabelle 2-1 mit unterschiedlicher Temperaturentwicklung zu rechnen. Für ILC800 beispielsweise wurden im Rahmen des Forschungsprojekts MultiLC (vgl. auch Kap. 3.1.1) bei einer Wanddicke von 45 cm Temperaturen bis zu 82 °C gemessen. Daher ist eine sorgfältige Nachbehandlung (vgl. Kap 3.2.3) zu gewährleisten, um den auftretenden Temperaturgradienten im Bauteil zwischen Kern und Oberfläche zu minimieren. Eine weitere Option, um die Temperaturentwicklung zu verringern, ist der teilweise Ersatz des Wassers durch Scherbeneis, wie bereits beim Projekt Thalmaier in Aiterbach erfolgreich praktiziert [22].

3.2.2.3 Fallhöhen

Um die Auswirkungen von unterschiedlichen Fallhöhen auf die Eigenschaften von Infralichtbeton zu testen, wurden Betoniervorgänge anhand eines Kübels aus unterschiedlichen Höhen (ca. 60, 100 und 150 cm) durchgeführt [74]. Dabei zeigte der ILC bei keiner der Fallhöhen Anzeichen von Entmischung. Nicht abschließend geklärt werden konnte, ob bei einer Fallhöhe von ca. 1,50 m eine Kompaktierung des Materials stattfand. In

jedem Fall ist es ratsam, auch in Abhängigkeit der gewünschten Sichtbetonqualität, die Fallhöhe zu begrenzen (z. B. gemäß »Merkblatt Sichtbeton« maximal 1 m [77]).

3.2.2.4 Vermeidung von Betonierhorizonten

Der Einbau von selbstverdichtenden Betonen (SVB) erfolgt normalerweise kontinuierlich und mittels Pumpen, wobei idealerweise das Schlauchende beim Pumpen ständig im Frischbeton eingetaucht ist (Kontraktorverfahren). Wird der Beton nicht kontinuierlich eingebracht, kann sich die sogenannte Elefantenhaut bilden, eine zähe, zusammenhängende Zementleimschicht an der Oberfläche. Diese verhindert eine Vermischung der Schüttilagen, was sich später auf der Bauteiloberfläche als Betonierhorizont abzeichnen kann [78].

Infraleichtbeton ist ein nahezu selbstverdichtender Beton, der in der Regel mit Kübeln eingebracht wird. Daher sollte mit einer gewissen Diskontinuität und damit auch mit der Bildung einer Elefantenhaut gerechnet werden. Um trotzdem Betonierhorizonte an der Oberfläche vermeiden bzw. begrenzen zu können, wurden verschiedene Maßnahmen mit ILC800 getestet. Neben manuellen Methoden wie Stochern oder punktuell Einsatz des Innenrüttlers wurde auch ein Außenrüttler verwendet. Dies erzielte gute Ergebnisse, eine befürchtete Entmischung zeigte sich nicht. Unabhängig von den gewählten Maßnahmen ist zu empfehlen, den zeitlichen Abstand zwischen den Chargen möglichst gering zu halten, um die Bildung der Elefantenhaut zu begrenzen. Auch das horizontale Fließen über längere Strecken, z.B. bei der Betonage von langen Wänden und einseitigem Einfüllen, sollte vermieden werden. Hier können z.B. auch Maßnahmen wie z. B. die Betonage im Kontraktorverfahren hilfreich sein. Eine weitere Möglichkeit, Betonierhorizonte zu minimieren, ist der Einsatz einer stark saugenden Schalung oder eines Schalungsvlieses. Die genaue Vorgehensweise für ein konkretes Bauprojekt sollte anhand einer vorab zu erstellenden Probewand getestet und festgelegt werden.

3.2.3 Ausschalfristen und Nachbehandlung

Die optimale Ausschalfrist wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten spielen Frühfestigkeit,

Nachbehandlungseffekte, Witterungsbedingungen, Einfluss auf die Farbentwicklung usw. eine Rolle.

Auch wenn unter dem Aspekt der Frühfestigkeit für Infraleichtbeton in Abhängigkeit der Rohdichte und Schalungsart eine Ausschallfrist von ein bis zwei Tagen ggf. technisch möglich ist und bei kleineren Prüfkörpern bereits realisiert wurde, sollte die Ausschallfrist bei größeren Bauteilen bzw. Ortbetonbauwerken länger gewählt werden. Eine längere Ausschallfrist stellt prinzipiell eine gute Möglichkeit der Nachbehandlung dar, kann das Risiko des Klebens von Zementleim an der Schalung verhindern und wirkt sich positiv auf das Schwindverhalten aus. Unter Laborbedingungen wurden gute Erfahrungen mit Ausschallfristen zwischen vier und sechs Tagen gemacht. Gegebenenfalls kann ein längerer Verbleib in der Schalung die Farbgebung des Sichtbetons negativ beeinflussen. Für ein konkretes Projekt sollte die Ausschallfrist individuell festgelegt und an einer Probewand getestet werden.

Die Nachbehandlung von Beton ist in DIN EN 13670 [79] und DIN 1045-3 [80] geregelt. Die dort angegebenen Zeiträume für die Nachbehandlung hängen u. a. von der Festigkeitsentwicklung des Betons und der Umgebungstemperatur ab. Grundsätzlich sollte Infraleichtbeton nicht bei zu niedrigen Temperaturen eingebaut werden, um eine Gefährdung durch Frost oder eine Beeinträchtigung der Festigkeitsentwicklung auszuschließen. Abweichend von DIN 1045-3 bzw. ergänzend zu DIN EN 13670 sollte daher eine Mindestlufttemperatur, z. B. 5°C, für das Einbringen des Betons in Abhängigkeit der jeweiligen Projektbedingungen festgelegt werden.

Die Nachbehandlungsdauer von ILC sollte länger als die in den o. g. Normen für Normalbeton genannten Zeiträume gewählt werden. Gute Erfahrungen wurden bei der Herstellung von Prüfkörpern mit einer Nachbehandlung von etwa sieben Tagen nach dem Ausschalen gemacht.

Die Wahl der Nachbehandlungsmethode und die Nachbehandlungsdauer muss im Hinblick auf die zu erzielende Sichtbetonqualität und in Abhängigkeit der Projektbedingungen gewählt werden und sollte daher für jedes Bauprojekt individuell abgestimmt werden. In jedem Fall ist ein frühzeitiges Austrocknen zu verhindern, und der Beton ist vor schädlichen Umgebungseinflüssen zu schützen. Ein zu schnelles Auskühlen der Oberfläche ist zu vermeiden, zum Beispiel durch den Einsatz einer

ausreichend wärmedämmenden Abdeckung. Auch auf ausreichenden Kantenschutz ist zu achten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Ausschallfrist, Nachbehandlungsdauer und -methoden individuell für jedes Bauprojekt abgestimmt und anhand einer Probewand getestet werden sollten. Bei der Herstellung von Prüfkörpern unter Laborbedingungen wurden gute Erfahrungen mit Ausschallfristen von vier bis sechs Tagen und einer anschließenden Nachbehandlungsdauer von etwa sieben Tagen gemacht.

3.2.4 Oberflächenschutz/ Hydrophobierung

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, sollten Außenflächen aus ILC gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden. Gründe hierfür sind u. a. die Vermeidung eines Anstiegs der Wärmeleitfähigkeit und die Erhöhung des Frost-Tau-Widerstands (vgl. Kap. 3.1.5). Zudem wird eine Schädigung durch wiederkehrendes Eindringen und Austreten von Wasser durch entstehende Oberflächenschwindrisse verhindert. Untersuchungen mit hydrophobierten Flächen zeigten auch positive Effekte in Bezug auf die Carbonatisierung (vgl. Kap. 5.1.1).

Der Schutz gegen Feuchtigkeit sollte einerseits baulich und planerisch (Dachüberstände, Abtropfkanten etc.) und andererseits durch technische additive Maßnahmen, z. B. Hydrophobierung, erfolgen.

Unter Hydrophobierung versteht man eine nachträgliche Behandlung des Betons, die gemäß DIN EN 1504-2 [81] in einer wasserabweisenden Oberfläche resultiert und dabei das Erscheinungsbild wenig oder gar nicht verändert. Die Poren und Kapillaren werden nicht gefüllt, sondern nur ausgekleidet. Gängige Hydrophobierungsmittel basieren häufig auf Silanen oder Siloxanen. Je nach Eindringtiefe werden manche Produkte auch als Tiefenhydrophobierung bezeichnet. Hydrophobierungen müssen in regelmäßigen Abständen erneuert werden. In welchen Zeitintervallen dies erfolgen muss, hängt u. a. von der jeweiligen Einbausituation bzw. Beanspruchung der Oberfläche, dem Gefüge des Betons und den Eigenschaften des konkreten Produkts ab.

Eine silanbasierte Hydrophobierung von Infraleichtbeton wurde bereits beim Einfamilienhaus in Berlin angewendet und hat sich bewährt. Zudem wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt [65, 82], bei denen

verschiedene Hydrophobierungsmittel mit Infralichtbeton getestet wurden und eine gute Wirksamkeit zeigten.

3.3 Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, rechtliche Randbedingungen

Die Nachhaltigkeit eines Baustoffes bzw. der Bauteile und Gebäude, die durch den Baustoff erstellt werden, berücksichtigt unter anderem sowohl die ökologische als auch die ökonomische Qualität. Die Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion wirkt sich damit auch auf die Nachhaltigkeit aus. Neben ökologischer und ökonomischer Qualität sind weitere Qualitäten wie die soziokulturelle und funktionelle Qualität, die technische Qualität sowie die Prozess- und Standortqualität von Bedeutung.

Zur Nachhaltigkeit von Infralichtbeton sind bereits verschiedene vergleichende Untersuchungen durchgeführt worden (vgl. u.a. [15, 83–85]). Dabei wurden für Referenzgebäude und für verschiedene Entwurfsvarianten vergleichende Ökobilanzen und Lebenszykluskostenanalysen aufgestellt sowie zum Teil Einschätzungen weiterer Nachhaltigkeitskriterien vorgenommen. Die ökologischen Auswirkungen der Herstellungsphase des Materials Infralichtbeton sind geprägt durch die leichte Gesteinskörnung, die durch einen energiekonsumierenden Prozess industriell hergestellt wird, und durch den Zement. Bei der Herstellung von Zement fällt CO₂ zum einen durch den Energieaufwand bei der Produktion und zum anderen beim chemischen Prozess der Entsäuerung an. Vorteilhaft bei ILC ist, dass ein Teil des bei der Entsäuerung freigesetzten CO₂ durch das schnelle Carbonatisieren aufgrund der hohen Porosität (vgl. Kap. 5.1.1) über den Lebenszyklus wieder aufgenommen wird. Den ökologischen Auswirkungen der Herstellungsphase eines ILC-Bauteils steht die gute Dauerhaftigkeit des Materials und somit der lange Lebenszyklus positiv gegenüber.

Ähnlich wie bei der Ökologie verhält es sich bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit. Da ILC ein (noch) neues, nicht etabliertes Material ist, bedeutet die Herstellung für die anbietenden Betonwerke meist eine Sonderanfertigung, die mit erhöhten Kosten einhergeht. Auch diese relativieren sich durch den langen Lebenszyklus und durch den geringen Instandhaltungsaufwand von ILC.

Für den Entwurf eines Gebäudes mit ILC ist die Ausnutzung der technisch möglichen langen Lebensdauer für die Nachhaltigkeit essenziell. Im

Entwurf muss daher auf möglichst flexible Nutzungsmöglichkeiten des Gebäudes besonderer Wert gelegt werden.

Infraleichtbeton liegt außerhalb der Normung und ist damit ein nicht zugelassener Baustoff. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit werden allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen angestrebt, wurden aber noch nicht erteilt. Daher ist aktuell für Bauvorhaben eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) erforderlich. Um die Erteilung einer ZiE bzw. vBG zu erleichtern, ist im Entwurf auf einen möglichst materialgerechten Einsatz des Baustoffs zu achten (z.B. Belastung von Wandbauteilen auf mäßigen Druck, Biegebauteile mit durchschnittlichen Spannweiten, Vermeidung von hochbelasteten, ggf. knickgefährdeten Stützen oder extrem auskragenden bzw. weit spannenden Platten oder Trägern).

Weiterführende Informationen zur Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und zu rechtlichen Randbedingungen finden sich bei Lösch und Rieseberg [1] und Schlaich et al. [33].

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

Das folgende Kapitel widmet sich der Fragestellung nach der maximalen Traglast von ILC-Wandbauteilen unter Druckbeanspruchung im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Beurteilung der Anwendbarkeit gängiger Bemessungsansätze. Hierzu werden zunächst Bemessungsansätze aus der aktuellen Normung theoretisch betrachtet und daraus Berechnungsansätze für die maximale Tragfähigkeit ohne Sicherheitsbeiwerte im Bruchzustand abgeleitet. Darauffolgend werden die experimentellen Untersuchungen an ILC-Wandbauteilen zur maximalen Traglast erläutert, die mit rein zentrischer Belastung durchgeführt wurden, um den Betrachtungsrahmen einzugrenzen und um weitere Effekte aus z.B. ausmittigen Belastungen auszuschließen. Hierbei wurden verschiedene Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit identifiziert, die näher untersucht wurden. Einen Überblick gibt die nachfolgende Tabelle.

Tabelle 4-1: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen unter zentrischem Druck und zu Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit

Thema	Kapitel, Seitenzahl
Maximale Traglast von unbewehrten und bewehrten ILC-Wandbauteilen unter zentrischer Druckbeanspruchung	Kap. 4.2, S. 59ff.
Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen:	
Dauerstandfaktor bei einer Belastungsdauer von ca. 20-30 Minuten	Kap. 4.3.2, S. 79ff.
Einfluss der Schlankheit auf die Druckfestigkeit	Kap. 4.3.3, S. 87ff.
Einfluss der Bauteilgröße (Maßstabseffekt) auf die Druckfestigkeit	Kap. 4.3.4, S. 97ff.
Festigkeitsunterschied zwischen Bauwerksbeton und separat geschalttem Normprüfkörper	Kap. 4.3.5, S. 102ff.

Die Erkenntnisse fließen anschließend in die Modellbildung ein, bei der zunächst ein Berechnungsansatz für die maximale Traglast eines Wandbauteils im Bruchzustand unter Versuchsbedingungen formuliert wird.

Darauf aufbauend erfolgt eine Beurteilung der Anwendbarkeit der geschilderten Bemessungsansätze.

4.1 Theoretische Erläuterung von Bemessungsansätzen im GZT und Ableitung von Berechnungsansätzen

Im Folgenden werden die Bemessungsansätze der gängigsten Normungen im Hinblick auf die Tragfähigkeit unter Druckbeanspruchung erläutert und Berechnungsansätze für die maximale Traglast im Bruchzustand unter Versuchsbedingungen abgeleitet. Zunächst wird das Vorgehen im EC2 [8] geschildert, der die Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken behandelt und Leichtbetone gemäß DIN EN 206 [5], d.h. ab einer Trockenrohdichte von $> 800 \text{ kg/m}^3$, betrachtet. Anschließend werden die Ansätze der DIN EN 1520 [10] und DIN 4213 [9] erläutert. Diese Normen gelten für vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und decken Trockenrohdichten von 400 bis 2000 kg/m^3 ab. Aus dem Bereich der internationalen Normung werden zum Vergleich der fib Model Code [86, 87], der als Basis zur Entwicklung von Normen für Betontragwerke wie z.B. des EC2 [8] diente, und die amerikanische Beton-Norm ACI 318, „Building Code Requirements for Structural Concrete“ [56], herangezogen.

4.1.1 Bemessungsansätze gemäß EC2

Die Bemessungsansätze für Normalkraft mit oder ohne Biegung werden in Kapitel 6 und 12 des EC2 [8] für Normalbetone formuliert. Kapitel 11 enthält ergänzende Regelungen für Leichtbetone. Die Nachweisführung unterscheidet sich jedoch mit Ausnahme der anzusetzenden Festigkeiten und Grenzdehnungen nicht vom Vorgehen für Normalbetone.

4.1.1.1 Unbewehrte Bauteile unter Druckbeanspruchung

Die aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} eines unbewehrten Rechteckquerschnitts mit einachsiger Lastausmitte e in der Richtung h_w (vgl. Bild 4-1) wird nach Kapitel 12 des EC2 [8] wie folgt ermittelt:

$$N_{Rd} = \eta \cdot f_{cd,pl} \cdot b \cdot h_w \cdot (1 - 2 \cdot e/h_w) \quad (1)$$

mit

b/h_w : Breite/ Gesamtdicke des Querschnitts

$\eta \cdot f_{cd,pl}$: wirksame Bemessungsdruckfestigkeit (Spannungsblock mit $\eta=1,0$ bei $f_{ck} \leq 50$ MPa)

$f_{cd,pl}$: Bemessungsdruckfestigkeit des unbewehrten Querschnitts; für ILC würde sich $f_{ilcd,pl}$ ergeben zu $f_{ilcd,pl} = \alpha_{ilcc,pl} \cdot f_{ilck} / \gamma_c$, $\alpha_{ilcc,pl} = 0,62$ (Dauerstandbeiwert für unbewehrte Querschnitte (vgl. Kap. 5.2.3)

e : Lastausmitte

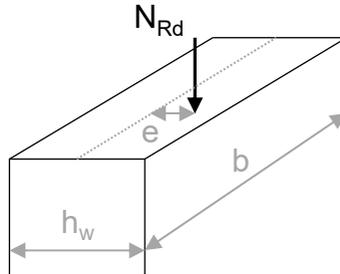


Bild 4-1: Aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} mit Ausmitte e

Unbewehrte Druckglieder sind nach EC2 [8] allerdings immer als schlanke Bauteile zu betrachten. Ein Verzicht auf eine Untersuchung am verformten System ist jedoch bei einer Schlankheit von $\lambda \leq 8,6$ gestattet, die größte zulässige Schlankheit beträgt $\lambda \leq 86$. [61] Dabei ergibt sich die Schlankheit λ aus der Knicklänge l_0 und der Wanddicke h_w zu

$$\lambda = \frac{l_0}{i} = \frac{l_0}{\sqrt{\frac{I}{A}}} = \frac{l_0}{0,289 \cdot h_w} \quad (2)$$

Nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren, zulässig für Bauteile in unverschieblich ausgesteiften Tragwerken, ergibt sich die aufnehmbare Längskraft $N_{Rd,\lambda}$ zu:

$$N_{Rd,\lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{cd,pl} \cdot \phi \quad (3)$$

mit

b/h_w / $f_{cd,pl}$: siehe oben

$$\phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{tot}/h_w) - 0,02 \cdot l_0/h_w \leq 1 - 2 \cdot e_{tot}/h_w \quad (4)$$

unter ideal zentrischer Belastung ($e_{tot} = 0$):

$$\phi = 1,14 - 0,02 \cdot l_0/h_w \leq 1 \quad (5)$$

l_0 : Knicklänge des Bauteils

$$e_{tot} = e_0 + e_i$$

e_0 : Lastausmitte nach Theorie I. Ordnung; e_i : ungewollte zusätzliche Lastausmitte infolge geometrischer Imperfektionen

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Um aus den Bemessungsansätzen die maximale Tragfähigkeit eines Bauteils im Bruchzustand N_u unter Versuchsbedingungen abzuleiten, wird zunächst eine ideal zentrische Belastung angenommen. Im Hinblick auf die zu erwartende Festigkeit werden die Sicherheiten vernachlässigt und zunächst die mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ angesetzt.

Für den Ansatz ohne Berücksichtigung der Schlankheit ergibt sich mit $e = 0$ die aufnehmbare Druckkraft im Bruchzustand N_u zu

$$N_u = f_{cm,cyl} \cdot b \cdot h_w \quad (6)$$

Für den Ansatz mit Berücksichtigung der Schlankheit ergibt sich $N_{u,\lambda}$ mit $e_{tot} = 0$ und $l_0 = \beta \cdot l_w$ (Annahme: $\beta = 1,0$ für zweiseitig gehaltene Wände) zu

$$N_{u,\lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{cm,cyl} \cdot \phi \quad (7)$$

Der Faktor ϕ kann unter ideal zentrischen Bedingungen maximal den Wert 1,0 annehmen (siehe Gl. (5)). Bei einem Verhältnis Wandhöhe / Wanddicke von $l_w/h_w > 7$ (entspricht Schlankheit $\lambda > 24$) fällt ϕ unter 1,0. Dies wäre z.B. bei einer lichten Wandhöhe l_w von mehr als 3,5 m und einer Wanddicke h_w von 50 cm gegeben, was für ILC-Wandbauteile zwar denkbar ist, aber bei gängigen Geschosswohnungsbauten eher unüblich sein wird. Als gängige Kombination kann eine lichte Wandhöhe l_w von 3 m bei einer Dicke h_w von 50 cm betrachtet werden, für welche $l_w/h_w = 6$ entspricht.

4.1.1.2 Bewehrte Bauteile unter Druckbeanspruchung

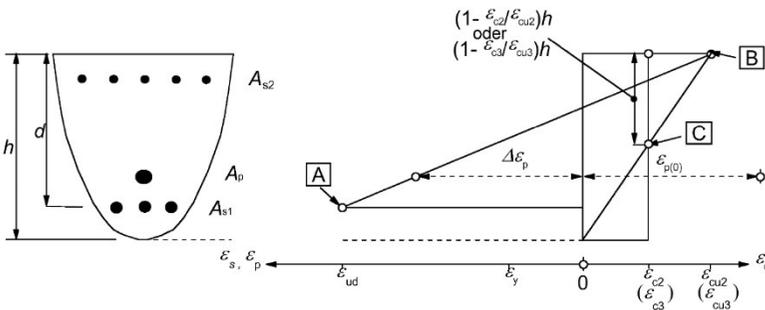
Zur Bemessung von überwiegend auf Normalkraft beanspruchten, stahlbewehrten Biegebauteilen ist über die passende Dehnungsverteilung ein Gleichgewicht der inneren und äußeren Schnittgrößen herzustellen und die

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

Bewehrungsmenge entsprechend zu wählen. Die zulässigen Dehnungsgrenzen sind in Bild 4-2 dargestellt.

Unter näherungsweise zentrischem Druck (Ausmitte / Wanddicke $e_d/h \leq 0,1$) ist die mittlere Stauchung auf ϵ_{c2} (bzw. ϵ_{c3} im Fall des bilinearen Spannungs-Dehnungs-Verlaufs) zu begrenzen. Aufgrund der zu erwartenden Kriechumlagerungen darf die zulässige Betonstauchung ϵ_{c2} für Normalbetone unter Annahme des Parabel-Rechteck-Diagramms von $\epsilon_{c2} = 0,002$ auf $0,0022$ erhöht werden. Für Leichtbetone wird die günstige Wirkung des Kriechens jedoch nicht angesetzt und dementsprechend die zulässige Betonstauchung ϵ_{c2} nicht erhöht, da die Bruchstauchung von Leichtbeton auch unter Dauerlast nicht wesentlich zunimmt [7].

Zur Bemessung von Querschnitten mit Drucknormalkraft ist gemäß EC2 [8] in der Regel eine Mindestausmitte von $e_0 = h_w/30 > 20$ mm anzusetzen.



- A** — Dehnungsgrenze des Betonstahls
- B** — Stauchungsgrenze des Betons
- C** — Stauchungsgrenze des Betons bei reiner Normalkraft

Bild 4-2: Grenzen der Dehnungsverteilung im GZT (Bild 6.1 aus [8])

Aus den zulässigen Grenzdehnungen ergibt sich für einen symmetrisch bewehrten Querschnitt unter zentrischer Druckbeanspruchung durch Addition der Traganteile der Komponenten folgende aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} [88]:

$$N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \sigma_{sd} \quad (8)$$

mit

A_c : Querschnittsfläche Beton

f_{cd} : Bemessungsdruckfestigkeit Beton

A_s : Querschnittsfläche Stahlbewehrung

σ_{sd} : Spannung Stahlbewehrung, zu ermitteln aus der Stahlkennlinie für

$\epsilon_s = \epsilon_{c2}$ (in der Regel ist $\epsilon_{c2} > 2,174 ‰$ und damit $\sigma_{sd} = f_{yd}$)

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Die zu wartende maximale Tragfähigkeit eines Querschnitts im Bruchzustand N_u lässt sich hieraus wiederum über Vernachlässigung der Sicherheitsbeiwerte bei den Festigkeiten der Komponenten ableiten:

$$N_u = A_c \cdot f_{cm,cyl} + A_s \cdot \sigma_s \quad (9)$$

Die Stahlspannung σ_s ist wiederum unter der Annahme zu ermitteln, dass die Stahldehnung ϵ_s gleich der Betonstauchung ist. Die Betonstauchung sollte dabei unter Ansatz der wirklichkeitsnahen Spannungs-Dehnungs-Linie zu ϵ_{c1} angesetzt werden, und damit σ_s für $\epsilon_s = \epsilon_{c1}$ bestimmt werden.

Gemäß EC2 [8] ist eine Untersuchung am verformten System erforderlich, wenn die Schlankheit $\lambda_{crit} > 25$ liegt. Dies würde beispielsweise einer zweiseitig gehaltenen Wand mit Dicke 50 cm und einer lichten Wandhöhe größer 3,60 m entsprechen. Da ILC-Wände in der Regel nicht als schlanke Bauteile ausgebildet und die weiteren Untersuchungen zur Tragfähigkeit an gedrunghenen Wänden durchgeführt werden, wird auf eine Erläuterung der Nachweisführung für schlanke Druckglieder an dieser Stelle verzichtet.

4.1.2 Bemessungsansätze gemäß der DIN EN 1520 und DIN 4213 für haufwerksporige Leichtbetone

Die DIN EN 1520 [10] gilt für vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton (LAC) und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung. Die DIN 4213 [9] regelt die Anwendung solcher Bauteile. ILC als gefügedichter Leichtbeton weist andere Eigenschaften auf als haufwerksporige Leichtbetone und liegt damit außerhalb des Geltungsbereichs der o.g. Normen. Da diese jedoch Trockenrohrichtebereiche von 400 bis 2000 kg/m³ abdecken und damit auch den Rohrichtebereich von ILC erfassen, werden die Regelungen hier trotzdem als Vergleichsbasis näher betrachtet.

4.1.2.1 Querschnitt unter Biegung und Längsdruck

Für die Bemessung von LAC-Querschnitten im GZT unter Biegung in Verbindung mit Längsdruck wird in Abschnitt A.4 der DIN EN 1520 [10] ein bilineares Spannungs-Dehnungs-Diagramm zugrunde gelegt (Bild 4-3). Der Höchstwert der Stauchung ϵ_{cu} ergibt sich durch die Gleichung

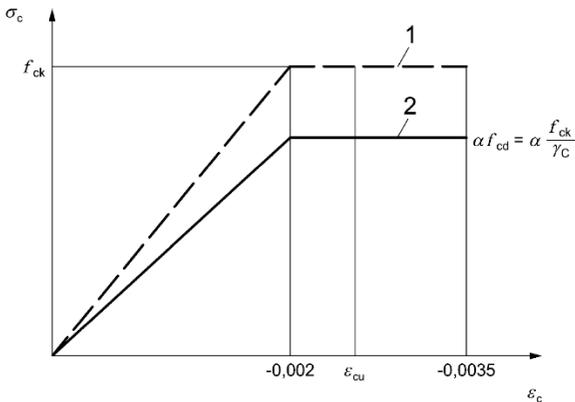
$$\epsilon_{cu} = 0,0035 \cdot \eta_1 \geq 0,002 \quad (10)$$

mit

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200$$

ρ : Trockenrohdichte [kg/m³]

Unter zentrischem Längsdruck ist die Stauchung des LAC auf $\epsilon_{cu} = 0,002$ zu begrenzen. Die sich ergebenden möglichen Grenzdehnungen sind Bild 4-4 zu entnehmen. Es wird davon ausgegangen, dass die Dehnung der Bewehrung gleich groß ist wie die des umgebenden LAC.



Legende

- 1 Idealisiertes Diagramm
- 2 Bemessungsdiagramm

Bild 4-3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur Bemessung von LAC unter Druckbeanspruchung (Bild A.1 aus [10])

$$N_{Rd} = k_s \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot A_c \quad (11)$$

mit

k_s : Knickbeiwert

α : Beiwert für Langzeit-Einflüsse

f_{cd} : Bemessungswert der Druckfestigkeit

A_c : Fläche der Druckzone

Der Knickbeiwert k_s wird in DIN EN 1520 [10] definiert und in DIN 4213 [9] zusätzlich begrenzt, wobei die Begrenzung in der Norm nicht weiter begründet wird:

$$k_s = \frac{1}{1 + \frac{f_{ck}}{(E_{cm} \cdot \pi^2)} \cdot \left(\frac{l_0}{i_c}\right)} \leq 0,71 \cdot (1 - 2 \cdot e_1/h) - 0,013 \cdot l_0/h \quad (12)$$

mit

E_{cm} : Mittelwert Elastizitätsmodul

f_{ck} : charakteristische Druckfestigkeit

l_0 : Knicklänge des Bauteils

i_c : Trägheitsradius des Querschnitts

h : Bemessungswert der Dicke des Querschnitts (für massive Wand gleich der Wanddicke)

e_1 : Summe aus der nach Theorie I. Ordnung berechneten Exzentrizität der Längskraft im mittleren Drittel der Wandhöhe (e_0) und zusätzlicher Exzentrizität infolge geometrischer Imperfektion (e_a ; 1/500 der Bauteilhöhe)

Dabei wird für die Kennwerte von Infraleichtbetonen unter Ansatz gängiger rechteckiger Wandquerschnitte immer die rechte Seite von Gleichung (12) maßgebend.

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Betrachtet man ein ideal zentrisch belastetes Bauteil (Ausmitte $e_1 = 0$) unter kurzzeitiger Druckbelastung (Dauerstandfaktor $\alpha = 1,0$) im Bruchzustand (mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ statt Bemessungswert f_{cd}), zweiseitig gehalten ($\beta = 1,0$, $l_0 = l_w$) ergibt sich der Knickbeiwert k_s aus der rechten Seite

der obigen Gleichung zu $0,71 - 0,013 l_w/h$ und die Tragfähigkeit N_u damit zu maximal

$$N_u = (0,71 - 0,013 \cdot l_w/h) \cdot f_{cm,cyl} \cdot A_c \quad (13)$$

Für eine Wand mit einer beispielhaften, gängigen Kombination aus lichter Höhe $l_w = 3\text{m}$ und Dicke $h = 50\text{ cm}$ würde sich damit $N_u = 0,632 \cdot f_{cm,cyl} \cdot A_c$ ergeben.

Die maximale Tragfähigkeit eines zentrisch belasteten, unbewehrten Wandbauteils wird demnach deutlich geringer eingeschätzt als beim Nachweisverfahren des EC2 [8] (siehe Gleichung (3), Kap. 4.1.1.1), bei dem der Faktor ϕ erst ab einer Schlankheit von $\lambda > 24$ unter 1,0 fällt.

Modifiziertes Modellstützenverfahren

Beim modifizierten Modellstützenverfahren wird der Einfluss der Schlankheit über eine Gesamtexzentrizität e_{tot} erfasst, die mehrere Komponenten beinhaltet:

$$e_{tot} = e_0 + e_m + e_a + e_2 + e_c \quad (14)$$

mit

e_0 : Exzentrizität der Längskraft nach Theorie I. Ordnung im mittleren Drittel der Höhe des Wandbauteils

e_m : Exzentrizität nach Theorie I. Ordnung aus Biegung infolge horizontaler Belastung, geschätzt $e_m = M_h/N_d$ (M_h : Bemessungsbiegemoment aus quergerichteter Belastung)

e_a : Exzentrizität infolge geometrischer Imperfektionen; $1/500$ der Bauteilhöhe

e_2 : Exzentrizität nach Theorie II. Ordnung

e_c : Exzentrizität infolge Kriechen; 0 für Kurzzeit-Lasten, $0,002 \cdot l_0 \cdot \varphi_{LAC} \cdot (e_0/h)^{1/2}$ für Langzeit-Lasten

Für den kritischen Querschnitt werden dann gemäß A.6.3.3.3 (2) folgende Anforderungen an die Bemessungs-Rand-Druckspannungen σ_{cd} gestellt:

Teilweise gerissene Querschnitte ($0,4h \geq e_{tot} > h/6$):

$$\sigma_{cd} = 2 \cdot N_d / (3l_{h,eff}(h/2 - e_{tot})) \leq f_{ck} / \gamma_c \quad (15)$$

Ungerissene Querschnitte ($e_{tot} \leq h/6$):

$$\sigma_{cd} = N_d / (l_{h,eff} \cdot h) + 6 M_d / (l_{h,eff} \cdot h^2) \leq f_{ck} / \gamma_c \quad (16)$$

mit

N_d : Bemessungswert der Längsdruckkraft

$l_{h,eff}$: wirksame horizontale Länge

h : Bemessungswert der Dicke

e_{tot} : Gesamtexzentrizität

M_d : Bemessungswert Biegemoment infolge quengerichteter Belastung

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Betrachtet man ein Wandbauteil unter ideal zentrischer, kurzfristiger Druckbelastung ohne geometrische Imperfektionen im Bruchzustand ergibt sich die maximale Tragfähigkeit N_u aus Formel (16) zu

$$\begin{aligned} \sigma_{cu} &= N_u / (l_{h,eff} \cdot h) \leq f_{cm,cyl} \\ \text{bzw. } N_u &= f_{cm,cyl} \cdot l_{h,eff} \cdot h \end{aligned} \quad (17)$$

Die maximale Tragfähigkeit N_u wird nach dem Modellstützenverfahren demnach deutlich höher eingeschätzt als nach dem Verfahren auf Grundlage der Euler-Formel (vgl. Gleichung (13)).

4.1.2.3 Wände mit statisch anrechenbarer Bewehrung

Die Bemessung von Wänden mit statisch anrechenbarer Bewehrung unter Druckbeanspruchung muss die in Kap. 4.1.2.1 geschilderten Anforderungen erfüllen, eine Bewehrung in der Druckzone darf jedoch nicht angesetzt werden. Effekte nach Theorie II. Ordnung sind zu berücksichtigen, hierzu kommen die im vorangegangenen Abschnitt geschilderten Verfahren zum Einsatz.

Da eine Druckbewehrung nicht angesetzt werden darf, ergeben sich die maximalen Traglasten N_u für eine ideal zentrisch und kurzfristig belastete, bewehrte Wand unter Druckbeanspruchung zu den gleichen Ausdrücken wie im vorherigen Abschnitt für Wände ohne statisch anrechenbare Bewehrung aufgeführt.

4.1.3 Bemessungsansätze gemäß fib Model Code

Die Fédération internationale du béton (fib) ist eine pränormative Organisation, die in Form der Model Codes eine Wissensbasis zur Verfügung stellt, auf der die diversen nationalen Normen aufbauen können. Die Inhalte des Model Code 2010 [86, 87] finden sich daher auch im Eurocode 2 [8] wieder.

Die Definition der Bemessungsdruckfestigkeit in Abschnitt 7.2.3.1.4 des Model Codes [86, 87] entspricht der des EC2 [8]. Es wird jedoch ein Dauerstandfaktor von $\alpha = 1,0$ empfohlen. Der Faktor wird als Koeffizient zur Berücksichtigung von Langzeiteffekten und ungünstigen Effekten der Lastapplikation definiert. Für normale Bemessungssituationen wird davon ausgegangen, dass die Nacherhärtung ab dem Alter von 28 Tagen die Langzeiteffekte ausgleicht, so dass ein Wert von 1,0 für Neubauten als gerechtfertigt angesehen wird.

Für Bauteile im Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Biegung mit und ohne Längskraft werden im Abschnitt 7.3.2 des Model Code [86, 87] die gleichen Dehnungsgrenzen wie im EC2 [8] (Bild 4-2) aufgeführt.

Dementsprechend ergibt sich für symmetrisch bewehrte, zentrisch belastete Bauteile unter Druck die gleiche erwartete Tragfähigkeit wie in Abschnitt 4.1.1.2 beschrieben.

Aufgrund der beschriebenen Abhängigkeiten bzw. Ähnlichkeiten zwischen Model Code [86, 87] und EC2 [8] wird im Weiteren auf die Betrachtung des Model Codes verzichtet.

4.1.4 Bemessungsansätze gemäß ACI 318

Die amerikanische Norm ACI318-19 (Building Code Requirements for Structural Concrete) [56] stellt bei axialer Belastung die Einwirkungsgröße P_u der Widerstandsgröße $\phi \cdot P_n$ gegenüber:

$$P_u \leq \Phi \cdot P_n \quad (18)$$

mit

P_u : factored axial force (einwirkende Längsdruckkraft inkl. Beiwerten)

P_n : nominal axial compressive strength (nomineller Druckwiderstand)

ϕ : strength reduction factor (Abminderungsbeiwert)

Der Abminderungsbeiwert ϕ dient dazu, den folgenden Aspekten Rechnung zu tragen:

- der Wahrscheinlichkeit einer zu geringen Bauteilfestigkeit aufgrund von Schwankungen der Materialfestigkeit und der Bauteildimensionen
- der Ungenauigkeit von Bemessungsgleichungen
- der verfügbare Duktilität und benötigten Zuverlässigkeit der Bauteile unter den betrachteten Lasten
- der Wichtigkeit des Bauteils innerhalb der Konstruktion. [56]

Der Abminderungsbeiwert ϕ wird in Abhängigkeit der Belastung oder der Bauteilart festgelegt. Für bewehrte Bauteile unter axialer Belastung in Form von Druck liegt der Abminderungsfaktor ϕ niedriger als bei Zugbelastung, um der geringeren Duktilität und der höheren Sensitivität gegenüber Schwankungen in der Betondruckfestigkeit Rechnung zu tragen. Für Bauteile mit Spiralbewehrung beträgt $\phi = 0,75$, für Bauteile mit anderen Querbewehrungen $\phi = 0,65$. Für unbewehrte Bauteile beträgt der Abminderungsfaktor unabhängig von der Belastung einheitlich $\phi = 0,60$.

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Zur Ermittlung der maximalen Tragfähigkeit eines zentrisch und kurzfristig belasteten Bauteils, wie es das Ziel der vorliegenden Untersuchungen darstellt, kann von einem Abminderungsfaktor $\phi = 1,0$ ausgegangen werden. Im Folgenden wird daher auf die Bestimmung der nominellen axialen Druckfestigkeit P_n weiter eingegangen, die sich je nach Bauteil unterscheidet. In den nächsten Abschnitten werden die Vorgehensweisen für unbewehrte und bewehrte Wandbauteile kurz geschildert.

4.1.4.1 Unbewehrte Wandbauteile

Gemäß Abschnitt 14 des ACI 318-19 [56] ergibt sich der nominelle axiale Druckwiderstand P_n zu

$$P_n = 0,60 \cdot f'_c \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (19)$$

mit

f'_c : spezifizierte Druckfestigkeit (specified compressive strength of concrete; f'_c wird von der erforderlichen gemittelten Festigkeit f'_{cr}

(required average strength) unter Annahme einer statischen Verteilung abgeleitet)

A_g : Brutto-Betonquerschnitt

l_c : Länge des Druckgliedes (length of compression member, measured center-to-center of the joints)

h : Wanddicke

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Unter Berücksichtigung der mittleren Festigkeit f'_{cr} ergibt sich die maximale Traglast, hier mit P_{nu} benannt, analog:

$$P_{nu} = 0,60 \cdot f'_{cr} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (20)$$

Für eine unbewehrte Wand mit beispielsweise einer Höhe (hier Stützweite, nicht lichte Höhe) von $l_c = 3\text{m}$ und $h = 0,5\text{m}$ Wanddicke unter Ansatz der mittleren Festigkeit würde sich damit eine maximale Traglast von $P_{nu} = 0,58 \cdot f'_{cr} \cdot A_g$ ergeben.

Die maximale Tragfähigkeit eines zentrisch belasteten, unbewehrten Wandbauteils wird demnach ähnlich wie beim Verfahren auf Grundlage von Euler aus Kap. 4.1.2.2 deutlich geringer eingeschätzt als beim Nachweisverfahren des EC2 [8] (siehe Gleichung (3), Kap. 4.1.1.1), bei dem der dortige Abminderungsfaktor ϕ erst ab einer Schlankheit von $\lambda > 24$ unter 1,0 fällt.

4.1.4.2 Bewehrte Wandbauteile

Gemäß Kapitel 11 des ACI 318-19 [56] ergibt sich der nominelle axiale Druckwiderstand P_n einer massiven, bewehrten Wand mit rechteckigem Querschnitt bei einer Lasteinleitung im mittleren Drittel der Wanddicke nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren zu

$$P_n = 0,55 \cdot f'_c \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{k \cdot l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (21)$$

mit

f'_c : spezifizierte Druckfestigkeit (specified compressive strength of concrete)

A_g : Brutto-Betonquerschnitt

k : effektiver Längenfaktor (effective length factor)

l_c : Länge des Druckgliedes (length of compression member, measured center-to-center of the joints,

h : Wanddicke

Der Faktor k dient zur Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen der Wand. Ähnlich dem Faktor β des EC2 [8] ergibt sich für eine zweiseitig gehaltene, nicht eingespannte Wand ein Wert von $k = 1,0$ [56].

Maximale Tragfähigkeit im Bruchzustand

Mit $k=1,0$ und der mittleren Festigkeit f'_{cr} ergibt sich eine maximale Traglast, hier P_{nu} benannt, von:

$$P_{nu} = 0,55 \cdot f'_{cr} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (22)$$

Für die oben genannten exemplarischen Maße ($l_c = 3 \text{ m}$, $h = 0,5 \text{ m}$) würde sich die maximale Tragfähigkeit P_{nu} einer bewehrten, zentrisch belasteten und zweiseitig gehaltenen Wand damit zu $P_{nu} = 0,53 \cdot f'_{cr} \cdot A_g$ ergeben.

An dieser Stelle sei kurz darauf hingewiesen, dass sich die Ausdrücke für unbewehrte und bewehrte Wandbauteile (Gleichungen (20) und (22)) nur im abmindernden Vorfaktor in der Gleichung (hier ist nicht der Abminderungsbeiwert ϕ gemeint) unterscheiden, wobei der Faktor mit 0,60 für unbewehrte Bauteile höher ist als der Faktor 0,55 für bewehrte Bauteile. Die Wahl der Vorfaktoren wird in der Norm nicht näher begründet und erstaunt zunächst, muss aber im Bemessungsfall im Zusammenhang mit dem Abminderungsbeiwert ϕ gesehen werden, der wiederum für bewehrte Bauteile höher liegt (0,65 (sonstige Querbewehrung) statt 0,60 (vgl. Kap. 4.1.4 Anfang)), wodurch sich der Effekt wieder ausgleicht. Dementsprechend fällt die Widerstandsgröße $\phi \cdot P_n$ für bewehrte und unbewehrte Bauteile annähernd gleich groß aus. Unterschiedliche Ansätze, wie z.B. im EC2 [8] zur Berücksichtigung der geringeren Duktilität unbewehrter Bauteile vorgesehen, scheinen hier nicht einzufließen.

4.1.5 Theorie der Stabwerkmodelle

Die Theorie der Stabwerkmodelle wurde insbesondere zur Modellierung von Diskontinuitätsbereichen (D-Bereichen) entwickelt. Diskontinuitäten entstehen z.B. in Form von geometrische Diskontinuitäten (z.B. Veränderungen der Querschnitte) oder statischen Diskontinuitäten (z.B. Krafteinleitungen, Einzelkräfte an Auflagern, Einbauteile).

Zur Bemessung von Wandbauteilen bietet sich die Verwendung von Stabwerkmodellen für die Bemessung von Lasteinleitungsbereichen wie z.B. exzentrischen Deckenauflagern an (vgl. auch 5.3).

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen werden Bemessungsansätze im Hinblick auf ihre Anwendung bei ideal zentrisch, vollflächig belasteten Wandbauteilen untersucht, um die Tragfähigkeit von ILC-Wänden im Versuch möglichst realitätsgetreu einschätzen zu können. Dies entspricht einem B-Bereich, der durch eine ebene Dehnungsverteilung gekennzeichnet ist. Daher werden Stabwerkmodelle an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

4.1.6 Diskussion der abgeleiteten Berechnungsansätze und Auswahl eines Bemessungsansatzes

Im Folgenden werden die aus den obigen Normen abgeleiteten Ansätze für die maximale Traglast im Bruchzustand miteinander verglichen, maßgebliche Unterschiede kurz erläutert und ein Ansatz für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

4.1.6.1 Unbewehrte Wandbauteile

Die nachfolgende Tabelle listet die verschiedenen Berechnungsansätze auf und zeigt exemplarische Ergebnisse für ein Wandbauteil mit $l_w = 3$ m lichter Höhe, zweiseitig gehalten, Wanddicke h bzw. $h_w = 50$ cm, pro Meter Länge und in Abhängigkeit der mittleren Druckfestigkeit bzw. zusätzlich in Abhängigkeit des Betonquerschnitts.

Tabelle 4-2: Berechnungsansätze zur maximalen Traglast von unbewehrten Wandbauteilen unter Versuchsbedingungen

Ansatz	exemplarische Ergebnisse*	Bemerkung
EC2 [8] (Kap. 4.1.1.1, Gleichung (3)):		
$N_{u,\lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{cm,cyl} \cdot \phi$ $\phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{tot}/h_w) - 0,02 \cdot l_0/h_w$ $= 1,14 - 0,02 \cdot l_w/h_w \leq 1$	$1,0 \cdot f_{cm,cyl} \cdot b \cdot h_w$ $= 0,5 \cdot f_{cm,cyl}$	Höchste Traglast, entspricht DIN EN 1520 /Modellst.verf.
DIN EN 1520 [10] / DIN4213 [9] – Euler (Kap. 4.1.2.2, Gleichung (13)):		
$N_u = (0,71 - 0,013 \cdot l_w/h) \cdot f_{cm,cyl} \cdot A_c$	$0,64 \cdot f_{cm,cyl} \cdot A_c$ $= 0,32 \cdot f_{cm,cyl}$	Niedrige Traglast, hauptsächlich aufgrund Beschränkung Knickbeiwert
DIN EN 1520 [10] / DIN4213 [9] - Modifiziertes Modellstützenverfahren (Kap. 4.1.2.2, Gleichung (17)):		
$N_u = f_{cm,cyl} \cdot l_{h,eff} \cdot h$	$1,0 \cdot f_{cm,cyl} \cdot h \cdot l_{eff}$ $= 0,5 \cdot f_{cm,cyl}$	Höchste Traglast, entspricht EC2 [8]
ACI 318 [56] (Kap.4.1.4.1, Gleichung (20)):		
$P_{nu} = 0,60 \cdot f'_{cr} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right]$	$0,58 \cdot f'_{cr} \cdot A_g$ $= 0,29 \cdot f'_{cr}$	Niedrigste Traglast; jedoch sind weitere Faktoren im Bemessungskonzept zu beachten
*Randbedingungen: $h_w=h=0,5m$, $b=l_{h,eff}=1,0m$, $l_0=3m$; $A_c=A_g=b \cdot h$; zweiseitig gehaltenes Wandbauteil, $\beta=1,0$; $l_w=l_0=3m$; zentrische, kurzfristige Belastung ($e_{tot}=0$)		

Alle Berechnungsansätze mit Ausnahme des modifizierten Modellstützenverfahrens berücksichtigen die Schlankheit über das Verhältnis Bauteilhöhe zu Querschnittsdicke. Beim Modellstützenverfahren geht die Schlankheit über die Gesamtausmitte e_{tot} ein. Diese wird bei der Bestimmung des

Widerstands jedoch nur bei einer Gesamtausmitte $e_{tot} > h/6$ berücksichtigt (vgl. 4.1.2.2).

Je nach Berechnungsansatz kann eine bis zu annähernd Faktor 2 unterschiedliche Tragfähigkeit N_u bzw. P_{nu} ermittelt werden. Die Verfahren nach DIN EN 1520 [10] / DIN4213 [9] (Euler) sowie nach ACI 318 [56] führen zu den stärksten Abminderungen des Produkts aus mittlerer Festigkeit und Betonquerschnitt, was jedoch weniger in den schlankheitsabhängigen Abminderungen begründet ist, sondern vielmehr aus den niedrigen Vorfaktoren (Euler 0,71, vgl. Kap. 4.1.2.2; bzw. ACI 0,60, vgl. Kap. 4.1.4.1) resultiert. Im Fall des Ansatzes nach ACI muss der Vorfaktor im Zusammenhang mit weiteren Sicherheitsfaktoren des dortigen Bemessungskonzepts gesehen werden (vgl. Kap. 4.1.4.2). Der niedrige Vorfaktor beim Euler-Verfahren resultiert aus der zusätzlichen Beschränkung des Knickbeiwerts (vgl. Kap. 4.1.2.2) in DIN 4213 [9].

Das Ziel der im Rahmen dieser Arbeit durchzuführenden Betrachtungen ist es, anhand der Bemessungsansätze der Normen realitätsgetreue Berechnungsansätze für die maximale Traglast unter Versuchsbedingungen abzuleiten. Aufgrund der Vorfaktoren bei den Verfahren nach Euler und ACI, die im Hinblick auf Bemessungssituation definiert sind, sind diese Verfahren als weniger geeignet einzustufen. Zwischen den beiden verbleibenden Verfahren (EC2 [8] und modifiziertes Modellstützenverfahren) ergibt sich für die exemplarisch gewählten Abmessungen kein Unterschied; die Schlankheit geht nicht ein. Ab einem Verhältnis $l_w/h_w > 7$ (bzw. $\lambda > 24$) würden sich Differenzen ergeben und der Ansatz nach EC2 [8] eine Abminderung aufgrund der Schlankheit erfahren.

Die weiteren Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden an Wandbauteilen mit $l_w/h_w = 6,67$ durchgeführt (vgl. Kap. 4.2). Als Grundlage für die Berechnungen der maximalen Traglast N_u von unbewehrten Wandbauteilen wird der Ansatz nach EC2 [8] gewählt.

4.1.6.2 Bewehrte Wandbauteile

Für die Tragfähigkeit von zentrisch belasteten, bewehrten Wandbauteilen unter Versuchsbedingungen ergeben sich die folgenden Ansätze:

- EC2 [8] (Kap. 4.1.1.2, Gleichung (9)):
$$N_u = A_c \cdot f_{cm,cyl} + A_s \cdot \sigma_s \quad (23)$$
mit σ_s für $\varepsilon_s = \varepsilon_{c1}$
- DIN EN 1520 [10]/ DIN4213 [9]:
Da Druckbewehrung nicht angesetzt werden darf, ergibt sich die Berechnung analog zu den oben erläuterten Ansätzen für unbewehrte Wände.
- ACI 318 [56] (Kap. 4.1.4.2, Gleichung (22)):

$$P_{nu} = 0,55 \cdot f'_{cr} \cdot A_g \cdot \left[1 - \left(\frac{l_c}{32 \cdot h} \right)^2 \right] \quad (24)$$

Unter der Annahme einer zentrischen Belastung findet die Schlankheit im Ansatz des EC2 [8] keine Berücksichtigung. Im Vergleich zum Ansatz für unbewehrte Bauteile wird der Traganteil der Bewehrung unter Berücksichtigung der entsprechenden Stahldehnung mit angesetzt. Die Ansätze nach der Normung für haufwerksporige Betone vernachlässigen den Einfluss der Bewehrung, berücksichtigen je nach Verfahren jedoch die Schlankheit (Euler bzw. modifiziertes Modellstützenverfahren). Der Ansatz nach ACI 318 [56] wiederum berücksichtigt wie zuvor die Schlankheit, erneut mit einem vergleichsweise niedrigen Vorfaktor, der im Zusammenhang mit der Bemessungssituation steht. Der Grad der Bewehrung geht hier nicht explizit ein, ein Unterschied zum Ansatz für unbewehrte Bauteile ist lediglich im Vorfaktor und im Abminderungsbeiwert ϕ zu sehen (vgl. Kap. 4.1.4 Anfang).

Eine Verwendung der Ansätze für unbewehrte Wandbauteile gemäß DIN EN 1520 [10]/ DIN4213 [9] erscheint für die im Rahmen dieser Arbeit angestrebten Zwecke aufgrund der Vernachlässigung der Bewehrung nicht realitätsgetreu. Der Ansatz gemäß ACI 318 [56] wiederum nutzt wie für unbewehrte Wände einen vergleichsweise geringen Vorfaktor, der im Zusammenhang mit der Bemessung gesehen werden muss. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit ist daher eine Abschätzung der Tragfähigkeit gemäß EC2 [8] am zielführendsten.

4.2 Experimentelle Untersuchungen unter zentrischer Druckbeanspruchung

4.2.1 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm zur Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen setzt sich aus insgesamt 6 Versuchsreihen (VR) mit jeweils 2 bzw. 3 Wandbauteilen zusammen. Um die Zusammenstellung der Versuchsreihen besser nachvollziehbar zu machen, soll an dieser Stelle kurz der Hintergrund erläutert werden. Im Rahmen des Forschungsprojekts MultiLC (Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften) [21] wurden zunächst mehrschichtige Wandbauteile aus ILC auf ihre Tragfähigkeit unter Druckbeanspruchung untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die erwartete maximale Traglast, die basierend auf den mittleren Zylinderdruckfestigkeiten und jeweiligen Querschnitten bestimmt wurde, nicht erreicht werden konnte, zum Teil versagten die Wände bei sehr geringen Lasten [21]. Dies machte weiterführende Untersuchungen an einschichtigen Wandbauteilen insbesondere zum Bereich der Lasteinleitung notwendig (VR1-3). Als Referenzprüfung mit anderer Maschinenteknik wurde eine weitere Prüfreihe an der TU Dresden, Otto-Mohr-Laboratorium, durchgeführt (VR4). Im Anschluss an das Projekt MultiLC wurden im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten ebenfalls Prüfungen an Wandbauteilen vorgenommen (VR5 siehe Jünke [89] und VR6 siehe Schubert [90]), die die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen relevant sind.

ILC ist kein fest definierter Baustoff mit genormter Klassifizierung und Güteüberwachung, vielmehr befinden sich die Zusammensetzungen in der ständigen Weiterentwicklung. Es liegt daher in der Natur der ILC-Forschung, dass in verschiedenen Forschungsarbeiten mit unterschiedlichen ILC-Zusammensetzungen gearbeitet wird. Auch die im Folgenden geschilderten experimentellen Untersuchungen greifen daher zwangsläufig auf unterschiedliche Mischungen zurück. Die genauen Zusammensetzungen sind jeweils dem Anhang bzw. den zitierten Quellen zu entnehmen.

Prüfkörper

Die Abmessungen der Prüfkörper orientierten sich am Maßstab 1:2 einer Wand mit Höhe 3m und Dicke 45 cm (letztere wurde in Anlehnung an die mehrschichtigen Bauteile des Projekts MultiLC [21] gewählt, zu dessen

Unterstützung einige der Versuche durchgeführt wurden). Die Breite der Bauteile ergab sich aus der Bedingung für Wandbauteile $b/h \geq 4$. Das Versuchsprogramm beinhaltete damit insgesamt 15 Prüfkörper mit Abmessungen von Höhe x Dicke x Breite von ca. 150 cm x 22,5 cm x 100 cm (0,338 m³). Je nach Schalungsaufbau variierten die exakten Abmessungen von Höhe und Breite um einige Zentimeter.

Die Versuchsreihen enthielten sowohl unbewehrte als auch bewehrte Wände. Die Flächenbewehrung wurde dabei aus Stabstahl $\varnothing 8$ vertikal und horizontal bei einer Betondeckung von 3 cm erstellt. Die horizontalen Stirnflächen wurden bei allen Prüfkörpern verbügelt, die vertikalen Stirnflächen wurden nur bei Wand 3.3 und VR6 verbügelt (siehe Tabelle 4-2).

Da die Prüfkörper im Zusammenhang mit verschiedenen Projekten mit unterschiedlichen Zielsetzungen hergestellt wurden, ergaben sich Abweichungen im Aufbau (konkret Bewehrungsanteil, Betonrezeptur und Wandlänge). Die Unterschiede sind gering und werden bei der Auswertung entsprechend über die Festigkeit der zugehörigen Prüfkörper, die jeweilige Bewehrungsmenge und die Abmessungen berücksichtigt, wodurch die Aussagekraft der Ergebnisse sichergestellt ist. Detaillierte Angaben zu Maßen, Bewehrung und ILC-Güten der Versuchsreihen sind Tabelle 11-1 und Tabelle 11-2 im Anhang zu entnehmen.

Versuchsreihen und Lasteinleitung

Einen Überblick über die Versuchsreihen gibt Tabelle 4-3. Die Herstellung der Wände erfolgte bei allen Versuchsreihen in liegender Betonage, mit Ausnahme der Wand 1.1, die stehend hergestellt wurde. Ziel war es, einen eventuellen Einfluss der Schüttilagen zu erfassen. Infraleichtbeton zeigt ein Leichtbeton-übliches, schollenartiges Abplatzen beim Versagen, das in der geringen Festigkeit der Zuschläge begründet ist. Sollte bei einer liegenden Betonage ein unzureichender Verbund zwischen den Schüttilagen auftreten, könnte dies das schollenartige Versagen unterstützen. Es zeigte sich jedoch bei Wand 1.1 wie zu erwarten kein abweichendes Versagen aufgrund der stehenden Herstellung.

Die Lasteinleitung wurde bei den Prüfungen variiert, um verschiedene Einflüsse wie z.B. Querdehnung der Ausgleichsschichten und ggf. unplanmäßige Ausmitte zu untersuchen. Für VR1 erfolgte die Lasteinleitung bei Wand 1.1 mit einer Gummilage zwischen Kopffläche der Wand und

Druckplatte der Prüfmaschine, 1.2 und 1.3 wurden mit direktem Kontakt zwischen Beton und Druckplatte belastet. Bei VR2 wurde der Lasteinleitungsbereich der Wände zusätzlich mit einer Normalbetonschicht verstärkt, in die im Fall der bewehrten Wände auch die Bewehrung geführt wurde, um eine direkte Lasteinleitung in die Bewehrung zu gewährleisten. Des Weiteren wurde der entstehende Querzug auf der Normalbetonschicht durch eine weichere bzw. steifere (mit und ohne Gummilage) Lasteinleitung variiert. Die Wände der VR3 wurden in Kopf- und Fußpunkt jeweils in ein Mörtelbett gesetzt, wobei eine Schiefstellung händisch mittels Wasserwaage so gut wie möglich ausgeschlossen wurde. Zusätzlich wurde bei der Prüfung eine Gummilage auf die Kopffläche gelegt, um eine ggf. noch vorliegende, unzureichende Planparallelität zwischen Druckplatte und Mörtelbett auszugleichen. Um zusätzlichen Querzug auf das Mörtelbett durch die Gummilage zu verhindern, wurde ein dünnes Blech zwischen Mörtel und Gummi eingelegt. Bild 4-5 zeigt exemplarisch die Lasteinleitungsbereiche im Kopfpunkt der VR2 und VR3. VR4 wurde an der TU Dresden geprüft. Dabei wurde analog zum Mörtelbett bei VR3 eine Ausgleichsschicht aus Schnellzement im Kopf- und Fußpunkt verwendet.

Tabelle 4-3: Übersicht der Versuchsreihen an ILC-Wandbauteilen (basierend auf [21, 89, 90])

Versuchsreihe	Wand Nr.	ILC Güte / Rezeptur	Beschreibung	Lasteinleitung
VR1	1.1	ILC800 (Blähton)/ Anhang Bild 11-1	unbewehrt, stehend betoniert	mit Gummilage
	1.2		bewehrt, liegend betoniert	ohne Zwischenschicht
	1.3		unbewehrt, liegend betoniert	ohne Zwischenschicht
VR2	2.1	ILC800 (Blähglas)/ Anhang Bild 11-2	bewehrt	Normalbetonschicht
	2.2		bewehrt	Normalbetonschicht/ Gummilage
	2.3		unbewehrt	
VR3	3.1	ILC800 (Blähglas)/ Anhang Bild 11-3	unbewehrt	Mörtelbett/ Blech/ Gummilage
	3.2		unbewehrt	
	3.3	ILC800 (Blähglas/ Blähton)/ Anhang Bild 11-4	bewehrt	
VR4	4.1	ILC800 (Blähglas/ Blähton)/ Anhang Bild 11-4	unbewehrt	Schnellzementschicht (TU Dresden)
	4.2		unbewehrt	
VR5	5.1	ILC700 (Blähglas)/ Anhang Bild 11-5	unbewehrt	Mörtelbett (Anpressdruck Maschine)
	5.2		unbewehrt	
VR6	6.1	ILC750 (Blähton)/ Anhang Bild 11-6	bewehrt	Mörtelbett (Anpressdruck Maschine)
	6.2		bewehrt	
VR1-4 siehe auch [21]; VR5 siehe auch [89]; VR6 siehe auch [90]				



Bild 4-5: Lasteinleitungsbereich der VR2 (Normalbetonschicht/ Gummilage; links) und VR3 (Mörtelbett/ Blech/ Gummilage; rechts) [21]

Die Wandbauteile der VR5 wurden ebenfalls in Kopf und Fuß in ein Mörtelbett gesetzt, wobei hier die Steuerung der Mauerwerkspresse so angepasst werden konnte, dass es möglich war, die Druckplatte an das Bauteil heranzufahren und eine Anpresskraft von 100 kN bis zum Anziehen des Mörtels aufzubringen. Das analoge Vorgehen wurde für VR6 gewählt.

Versuchsaufbau und -durchführung

Die Prüfungen wurden in einer Mauerwerkspresse der Firma Seidner durchgeführt. Es handelt sich um eine Säulenprüfmaschine für Wandscheiben, bei der der Prüfkörper während des Versuchs über einen Hydraulikzylinder von unten gegen die Druckplatte des Querhaupts gepresst wird, welche über eine Kalotte angeschlossen ist. Die Kalotte dient dabei zur Anpassung an eine eventuelle Schiefstellung der Prüffläche. Die maximale Druckkraft beträgt 5000 kN. Der mögliche Prüfraum erstreckt sich über eine Breite von 250 cm, eine Höhe von 620 cm und eine Tiefe von 150 cm.

In VR2 bis 4 mit Ausnahme VR3.3 wurde Messtechnik eingesetzt, die sich hauptsächlich auf die Aufnahme der Längs- und Querdehnungen in den D-Bereichen unterhalb der Lasteinleitung bzw. oberhalb des Fußpunktes konzentrierte. Über Wegaufnehmer wurde die gesamte Stauchung über die Wandhöhe (WG9), die vertikale Dehnung im Kopf- und Fußbereich (WG 4 und 8) als auch die Querdehnung in verschiedenen Ebenen (WG 1-3 und 5-7) gemessen (Bild 4-6).

Die Versuchsdurchführung erfolgte mittels kraftgesteuerter Belastung. Da die Durchführung im Zusammenhang mit verschiedenen Projekten erfolgte, ergaben sich Abweichungen im Prüfablauf zwischen den Versuchsreihen. Die Last wurde bei VR1-4 zunächst langsam auf 500 bis 600 kN gesteigert, anschließend bis zum Versagen erhöht und die maximale Traglast dokumentiert. In VR5 wurde die Last kontinuierlich bis zum Bruch gesteigert, in VR6 wurde bei mehreren Laststufen die Last jeweils kurz konstant gehalten, bevor bis zum Versagen erhöht wurde. Die Prüfdauer der Versuche bewegte sich je nach erreichter Maximallast zwischen 20 und 54 Minuten. Details zum Prüfablauf je Versuchsreihe sind Tabelle 11-3 im Anhang zu entnehmen.

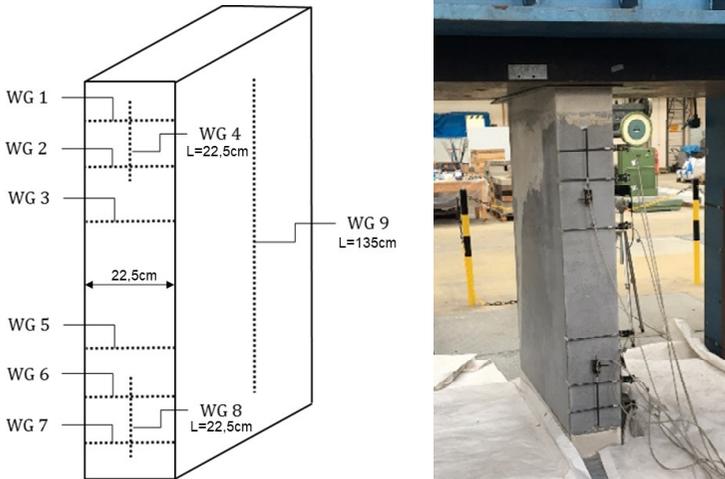


Bild 4-6: Darstellung der angebrachten Messtechnik mit Wegaufnehmern (WG mit Länge L) (links) [21]; Wandbauteil inkl. Messtechnik in der Seidner Mauerwerkspresse (rechts)

4.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Die nachfolgende Tabelle zeigt zunächst für alle Wandbauteile die mittleren Zylinderdruckfestigkeiten, die auf Basis des 5%-Quantils abgeleiteten charakteristischen Festigkeiten, die an Würfeln ermittelten Trockenrohdichten (soweit vorhanden), die Prüfrohdichten der Zylinder bzw. Würfel zum Zeitpunkt der Druckfestigkeitsprüfung sowie die experimentell ermittelte Traglast $N_{u,exp}$ unter zentrischer Druckbelastung.

Tabelle 4-4: Kennwerte und experimentelle Traglasten der Wandbauteile 1.1 bis 6.2

Wand Nr.	ILC Güte	$f_{t,ILC,cyl}$ [MPa]	$f_{t,ck,cyl}$ [MPa]	Trockenrohdichte [kg/m ³] (Würfel)	Prüfrohdichte [kg/m ³] (Zylinder/Würfel)	exp. Traglast $N_{u,exp}$ [kN]
1.1	ILC800	19,33	17,73	916	1100	1454
1.2	ILC800	16,63	14,98	886	1055	2263
1.3	ILC800	18,62	16,93	921	1101	2505
2.1	ILC800	17,01	13,67	936	1133	2734
2.2	ILC800	17,10	14,54	917	1085	2401
2.3	ILC800	15,77	14,52	-	1071	2684
3.1	ILC800	16,12	14,01	-	1016	1999
3.2	ILC800	17,95	14,25	-	957	1650
3.3	ILC800	17,26	16,09	-	968	2716
4.1	ILC800	18,60	16,07	-	988	3298
4.2	ILC800	18,60	16,07	-	988	3001
5.1	ILC700	11,48	10,74	707	899	1516
5.2	ILC700	12,06	11,13	706	908	1681
6.1	ILC750	8,80	8,03	759	976	1741
6.2	ILC750	8,97	7,75	792	1012	1895

Die experimentell ermittelten maximalen Traglasten $N_{u,exp}$ aller Versuchsreihen werden in Bild 4-7 den rechnerischen, maximalen Traglasten $N_{u,cal,film}$ gegenübergestellt (die experimentellen und rechnerischen Ergebnisse finden sich zudem im Anhang in Tabelle 11-4 und Tabelle 11-5). Zur Ermittlung von $N_{u,cal,film}$ werden für die unbewehrten und bewehrten Wandbauteile die in Kap. 4.1.6 erläuterten Ansätze verwendet. Das Verhältnis von Wandhöhe zu Dicke beträgt bei den Prüfkörpern $1,5 \text{ m} / 0,225 \text{ m} = 6,67$. Damit ergibt sich der Faktor ϕ für unbewehrte Wände zu 1,0 (Gleichung (25)). Für bewehrte Wandbauteile wurde der Traganteil der vertikalen Bewehrung unter Ansatz der Stahldehnung bei der erwarteten Bruchdehnung ϵ_{c1} ermittelt (Gleichung (26)). Für die Bruchdehnung lagen nur bei VR6 belastbare Werte aus den Zylinderdruckprüfungen vor. Für die bewehrten Bauteile der VR1-3 wurden die Bruchdehnungen abgeschätzt, indem das Verhältnis der mittleren Würfeldruckfestigkeit $f_{cm,cube,150}$ und ϵ_{c1} von Hückler [19] extrapoliert und ϵ_{c1} für die jeweiligen Würfeldruckfestigkeiten der Wandbauteile abgeleitet wurde.

Rechnerische, maximale Traglast, unbewehrt:

$$N_{u,cal,film} = N_{u,\lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{ilm,cyl} \cdot \phi = b \cdot h_w \cdot f_{ilm,cyl} \quad (25)$$

Rechnerische, maximale Traglast, bewehrt:

$$N_{u,cal,film} = N_u = A_c \cdot f_{ilm,cyl} + A_s \cdot \sigma_s; \quad \sigma_s \text{ für } \epsilon_s = \epsilon_{c1} \quad (26)$$

Das Verhältnis aus experimenteller und rechnerischer Traglast wird als erreichte Auslastung bezeichnet und prozentual aufgeführt.

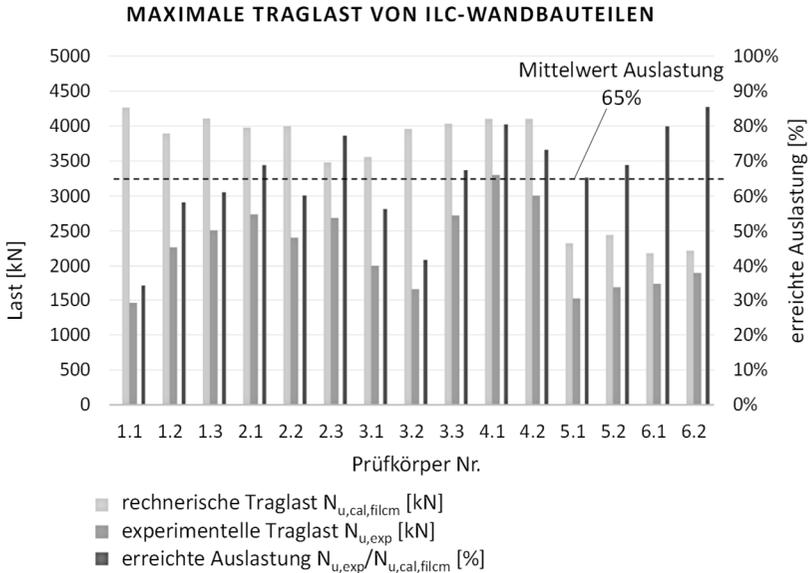


Bild 4-7: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

In keiner der Prüfungen wird die rechnerische Traglast erreicht. Die Auslastungen bewegen sich zwischen 34 % (VR1.1) und 85 % (VR6.2). Der Mittelwert der Auslastung aller Prüfungen liegt bei 65 %.

Zusammenhang zur Lasteinleitung

Die Bauteile selbst wiesen keine Anzeichen von Inhomogenitäten bzw. ungleichmäßiger Betonqualität auf, die die starken Schwankungen begründen könnten. Das frühe Versagen von VR1.1 trat im Lasteinleitungsbereich durch erhöhten Querzug auf, der durch die verwendete Gummilage entstand und in Kombination mit der geringen Zugfestigkeit des ILC ein „Aufblättern“ der Kopffläche bewirkte. Bei VR1.2 und VR1.3 mit direktem Kontakt zwischen Kopffläche und Druckplatte blieb diese Versagensart aus und es wurden höhere Traglasten erreicht. Jedoch lagen auch diese deutlich

unterhalb der rechnerischen Werte. Aufgrund des fehlenden Ausgleichs von Unebenheiten können hier Spannungsspitzen ein Grund für eine Traglastminderung sein.

Der mit Normalbeton ergänzte Lasteinleitungsbereich der VR2 wirkte sich wie zu erwarten positiv aus. Aufgrund der im Vergleich zum ILC höheren Zugfestigkeit des Normalbetons hatte hier der Querzug aus der Gummilage keinen negativen Effekt. Auch hier wurde die rechnerische Traglast jedoch nicht erreicht, die Auslastung lag im Mittel für VR2 bei 69 %. Die Versuchsreihe VR3 mit Mörtelbett wies ebenfalls ein positives Verhalten im Lasteinleitungsbereich auf, jedoch zeigten sich hier stark schwankende Ergebnisse.

Insgesamt konnte durch die Variation des Lasteinleitungsbereichs bei VR2 und 3 ein frühzeitiges Versagen in diesem Bereich vermieden werden, jedoch blieben die maximalen Traglasten weiterhin hinter den rechnerischen Traglasten zurück. Die zum Teil starken Schwankungen sowie Beobachtungen während der Versuchsdurchführungen, insbesondere bei Bauteil 3.2, ließen darauf schließen, dass der Prüfaufbau weiterhin Mängel aufwies, die von der Maschinenteknik herrührten (hauptsächlich unzureichender Ausgleich von Schiefstellungen der Kopffläche durch die Kalotte der Prüfmaschine und somit Eintrag unplanmäßiger Ausmitte). Aus diesem Grund wurde die Referenzprüfung zweier unbewehrter Wandbauteile an der TU Dresden (VR4) veranlasst. Die mit der dortigen Maschinenteknik und unter Nutzung einer Ausgleichsschicht aus Schnellzement ermittelten experimentellen Traglasten lagen vergleichsweise hoch, erreichten mit Auslastungen von 73 % und 81 % jedoch nicht die rechnerische Traglast.

Die Prüfungen der VR5 und VR6 wurden nach einer teilweisen Überarbeitung der Prüfmaschine durchgeführt. Durch die Erstellung des Mörtelbetts mit Hilfe des Anpressdrucks über die Druckplatte der Maschine konnte das Auftreten unplanmäßiger Ausmitte verringert werden. Die erreichten Auslastungen lagen im Mittel für VR5 bei 67 %, bei VR6 bei 83 %.

Versagensbilder unbewehrter und bewehrter Wände

Das Versagensbild der unbewehrten Wände war überwiegend durch Vertikalrisse in den Längs- und Stirnseiten gekennzeichnet (Bild 4-8, links). Dies gilt auch für die Prüfungen an VR4 an der TU Dresden. Bei den bewehrten Wänden wurden diese Effekte nicht beobachtet, die eingelegte Bewehrung wirkte hier der Vertikalrissbildung in der Fläche entgegen. Das Versagen trat hier meist im Kopf- oder Fußpunkt auf und kündigte sich zunächst durch die Ausbildung eines Druckkegels an. Darauf folgend trat meist ein schollenartiges Abplatzen des Betons entlang der Bewehrungslage in Kombination mit einem Ausknicken der Längsbewehrung auf (Bild 4-8, rechts).



Bild 4-8: Exemplarische Versagensbilder unbewehrter (links: VR3.1) und bewehrter Wandbauteile (rechts: VR2.1) [21]

Trotz der unterschiedlichen Versagensmechanismen lag die erreichte Auslastung sowohl bei unbewehrten als auch bewehrten Wandbauteilen deutlich unterhalb der rechnerischen Traglast. Bild 4-9 und Bild 4-10 sind die jeweiligen Traglasten und Auslastungen zu entnehmen. Die Auslastung der

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

bewehrten Wände lag im Mittel mit 70 % etwas höher als die der unbewehrten Wände mit 62 %.

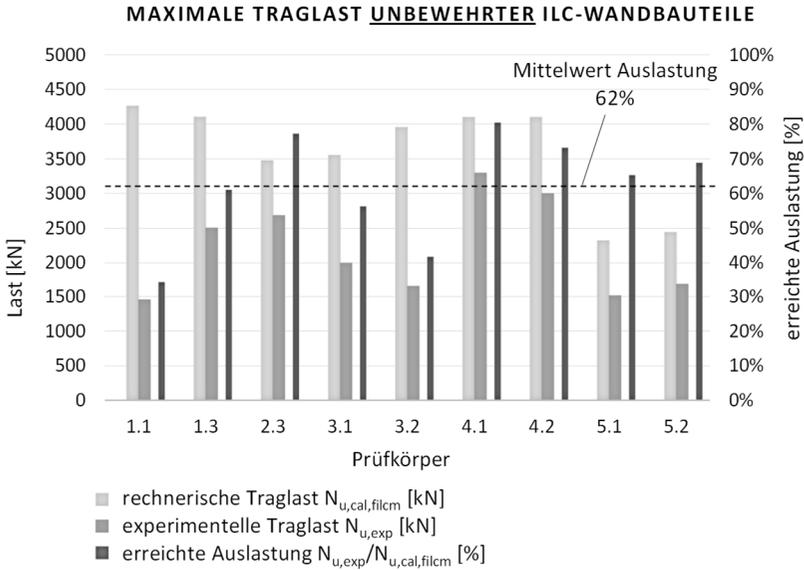


Bild 4-9: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der unbewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

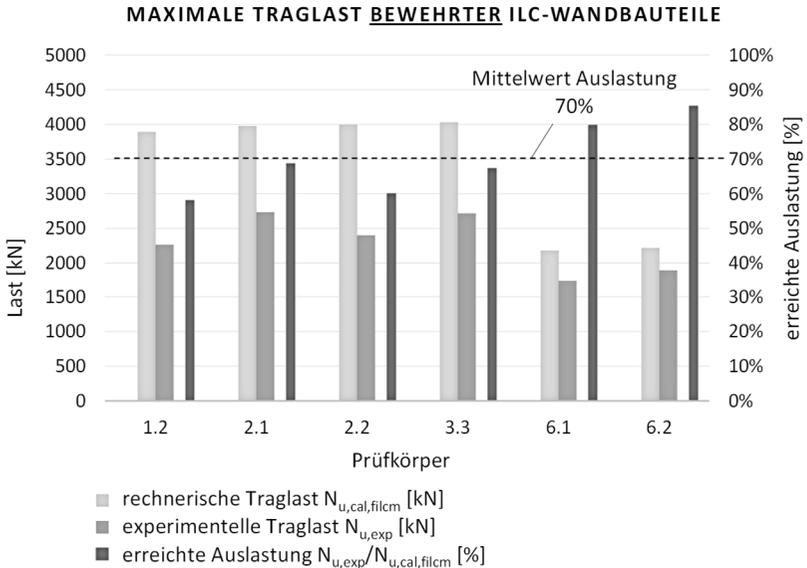


Bild 4-10: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der bewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

Querdehnung

Über die im vorigen Abschnitt genannte Messtechnik wurden Längs- und Querdehnungen hauptsächlich in den D-Bereichen aufgenommen. Die Querdehnungen wurden in drei Ebenen unterhalb des Kopf- bzw. oberhalb des Fußpunktes gemessen. Die Auswertungen ergaben nur zum Teil belastbare Ergebnisse. Mehrfach zeigte sich wie zu erwarten eine zunehmende Querdehnung mit größerem Abstand von Kopf und Fußpunkt, was durch den geringeren Einfluss der Querdehnungsbehinderung durch den Kontakt zu Druckplatte bzw. Bodenplatte der Prüfmaschine zu begründen ist. Aus den horizontalen Dehnungen $\Delta h/h$ über die Wanddicke im Verhältnis zur Längsstauchung $\Delta l/l$ wurden die Querdehnzahlen μ abgeleitet:

$$\mu = - \frac{\Delta h/h}{\Delta l/l} \quad (27)$$

Hierzu wurde die Stauchung des Gesamtbauteils genutzt (WG9), im Verhältnis zu den lokalen Längsdehnungen (WG4 und 8) ergaben sich keine aussagekräftigen Verläufe. Bild 4-11 zeigt exemplarisch die Querdehnzahlen in Abhängigkeit der Spannung für VR2.3 und VR4.2. Insgesamt ergaben sich über alle Versuchsreihen hinweg überwiegend Querdehnzahlen von kleiner 0,2, die maximal ermittelten Querdehnzahlen lagen bei ca. 0,4. Trotz nur mäßig belastbarer Daten lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse nicht auf eine übermäßige Querdehnung der D-Bereiche der ILC-Wandbauteile hindeuten, die ein möglicher Grund für frühzeitiges Versagen sein könnte. Auch frühere Untersuchungen ergaben keine Hinweise auf erhöhte Querdehnung von ILC [91].

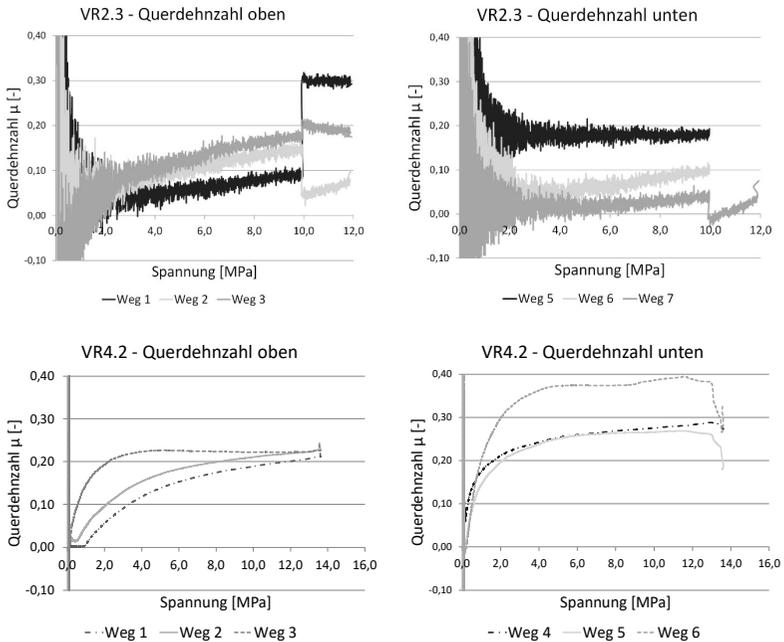


Bild 4-11: Querdehnungsverläufe in den D-Bereichen der Kopf- und Fußbereiche, exemplarisch für VR2.3 und VR4.2 (hier sind die horizontalen Wegaufnehmer unten mit 4-6, nicht 5-7, benannt)

Zusammenfassend lässt sich aufgrund der Ergebnisse festhalten, dass die rechnerischen Traglasten experimentell nicht erreicht werden konnten. Dies war in Teilen in der Ausführung des Lasteinleitungsbereichs und mangelhafter Maschinentechnik begründet. Eine Optimierung dieser Aspekte führte zwar zu einer Verbesserung, jedoch nicht zum Erreichen der rechnerischen Traglast. Dies machte deutlich, dass es weitere Faktoren geben muss, die Einfluss auf die Tragfähigkeit eines Wandbauteils in der experimentellen Prüfung nehmen. Daher wurden im Folgenden Untersuchungen zu solchen Faktoren durchgeführt, deren Erkenntnisse im nächsten Abschnitt geschildert werden.

4.3 Einflussfaktoren auf die maximale Traglast im Bruchzustand

Mögliche Einflüsse auf die Tragfähigkeit aus Prüfaufbau (Ausbildung der Lasteinleitung, Maschinentchnik), Inhomogenitäten des Betons und übermäßiger Querdehnungen wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt kommentiert. Darüber hinaus wurden Überlegungen zu weiteren Faktoren angestellt, von denen einige hier kurz erläutert und anschließend die wichtigsten Faktoren abgeleitet werden. Diese werden dann in den darauffolgenden Unterkapiteln sowohl theoretisch als auch experimentell näher untersucht.

ILC ist kein fest definierter Baustoff mit genormter Klassifizierung und Güteüberwachung, vielmehr befinden sich die Zusammensetzungen in der ständigen Weiterentwicklung. Auch die zur Untersuchung der Einflussfaktoren genutzten Mischungen greifen auf unterschiedliche Rezepturen zurück und unterscheiden sich von den Rezepturen der geprüften Wandbauteile. Die genauen Zusammensetzungen sind jeweils dem Anhang bzw. den zitierten Quellen zu entnehmen.

4.3.1 Allgemeines

- Zulässige Bruchdehnung bei überdrücktem Querschnitt

Bei Normalbetonen wird die zulässige Bruchdehnung ϵ_{c2} (Parabel-Rechteck-Diagramm) bei überdrücktem Querschnitt gegenüber ϵ_{c2u} auf $\epsilon_{c2} = 2,0\text{‰}$ begrenzt (unter Berücksichtigung der günstigen Wirkung des Kriechens $\epsilon_{c2,k} = 2,2\text{‰}$). Fraglich war, ob bei ILC eine ähnliche Begrenzung der Bruchdehnung anzuwenden ist.

Die Begrenzung wird für Normalbetone vorgenommen, da bei Biegedruck von einer Spannungumlagerung von der stärker beanspruchten Randfaser in weniger gestauchte Fasern ausgegangen wird, die bei überdrücktem Querschnitt nicht möglich ist. Voraussetzung für die Spannungumlagerung ist eine ausreichende Verformungsfähigkeit. Letztere nimmt mit wachsender Druckfestigkeit der Betone ab. Dementsprechend nähern sich ϵ_{c2} und ϵ_{c2u} für Betone höher C55/67 einander an, die zulässige Randstauchung ϵ_{c2u} wird reduziert.

Leichtbetone besitzen eine hohe Sprödigkeit und geringe Verformungsfähigkeit. Im EC2 [8] wird die zulässige Randstauchung unter Biegedruck

daher gegenüber Normalbetonen um den Faktor η_1 in Abhängigkeit der Rohdichte reduziert. Die zulässige Dehnung für überdrückte Querschnitte wird auf $\epsilon_{lc2} = 2\text{‰}$ begrenzt (eine Erhöhung aufgrund günstiger Kriechwirkung ist nicht zulässig). Für höherfeste Leichtbetone gleichen sich ϵ_{lc2} und ϵ_{lc2u} bzw. analog für die bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie ϵ_{lc3} und ϵ_{lc3u} zunehmend an. Bei Kombinationen von hoher Druckfestigkeit bei geringer Rohdichte kommt es zu $\epsilon_{lc2} = \epsilon_{lc2u}$ bzw. $\epsilon_{lc3} = \epsilon_{lc3u}$.

Infraleichtbeton besitzt einen linearen Spannungs-Dehnungs-Verlauf. Eine Verformungsfähigkeit liegt aufgrund der Sprödigkeit nur in sehr geringem Maße vor, von einem Umlagerungsvermögen unter Biegedruck ist nicht auszugehen. Es gilt dementsprechend analog zu höherfesten, leichten Leichtbetonen mit geringer Verformungsfähigkeit $\epsilon_{ilc3} = \epsilon_{ilc3u}$. Eine Abminderung für überdrückte Querschnitte im Vergleich zu Biegedruck entfällt damit, da für beide Anwendungen die gleiche zulässige Bruchstauchung anzusetzen ist.

- Vorzeitiges Versagen aufgrund von schollenartigem Abplatzen bzw. fehlender Rissverzahnung

Das Versagen von ILC-Wandbauteilen geht häufig mit schollenartigen Abplatzungen einher. Die Risse verlaufen meist unverzahnt und setzen sich annähernd geradlinig fort. Fraglich war, ob dieses Verhalten gegebenenfalls eine verringerte Tragfähigkeit bewirkt.

Hochleistungsleichtbetone (HPLWAC) mit ausschließlich Leichtzuschlägen sind in ihrem Tragverhalten häufig dadurch geprägt, dass die Zuschläge eine geringere Festigkeit oder Steifigkeit als die Matrix besitzen. Die Matrix erfährt eine höhere Beanspruchung, was zunächst zur Rissbildung oberhalb und unterhalb des Zuschlagkorns und schlussendlich zum Kornbruch und damit der Verbindung der Matrixanrisse führt [7]. Als Folge werden längliche Schollen des Betonkörpers abgespalten.

Infraleichtbeton ist ein gefügedichter Leichtbeton mit ausschließlich Leichtzuschlägen und damit als HPLWAC einzustufen. Das Materialverhalten unter Druckbeanspruchung wurde unter anderem mittels optischer Verformungsanalyse untersucht. Dabei konnte das

oben beschriebene Verhalten, das zu Kornbruch und schlussendlich zu schollenähnlichen Abplatzungen führt, bestätigt werden [19].

Die an den ILC-Wandbauteilen beobachteten Abplatzungen sind daher als leichtbetonübliches Verhalten einzustufen und kein Anzeichen für frühzeitiges Versagen bzw. verringerte Tragfähigkeit.

- Ansatz der mittleren Zylinderdruckfestigkeit als Bauteilfestigkeit

Der Betonanteil der erwarteten, maximalen Traglast $N_{u,cal,filcm}$ war denkbar einfach als Produkt aus mittlerer Zylinderdruckfestigkeit und Betonfläche zu ermitteln (vgl. Gleichung (25), (26)). Dieses Vorgehen basiert auf der Annahme, dass die im Bauteil vorliegende Festigkeit der mittleren Zylinderdruckfestigkeit $f_{ilcm,cyl}$ entspricht. Für die Erwartung an die zu erreichende Traglast im Versuch ist dies eine Annahme, die nicht die Realität widerspiegelt, da die Druckfestigkeit eines Bauwerksbetons in der Regel niedriger ist als die Druckfestigkeit separater Prüfkörper. Der Ansatz der mittleren Zylinderdruckfestigkeit als Grundlage zur Nachrechnung von Versuchen ist trotzdem gängige Praxis. In der Literatur finden sich Beispiele für zentrische Druckversuche an gedrungenen Bauteilen, bei denen die mittlere Zylinderdruckfestigkeit als Vergleichsbasis herangezogen, jedoch nicht erreicht wird (z.B. Druckprüfungen von unbewehrten, gedrungenen UHPC Stützen [92]; Untersuchungen an gedrungenen, bewehrten Stützen aus ultrahochfestem Faserbeton [93]).

Im EC2 [8] wird dem Unterschied zwischen mittlerer Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ und der anzusetzenden Festigkeit für die Bauwerksbemessung f_{cd} durch entsprechende Faktoren Rechnung getragen:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} * \frac{f_{cm,cyl}}{\gamma_c} \quad (28)$$

Fraglich ist, auf welchem Niveau zwischen der mittleren Zylinderdruckfestigkeit und der Bemessungsdruckfestigkeit sich die im Versuch tatsächlich vorliegende bzw. realistisch zu erwartende Druckfestigkeit eines Wandbauteils einstellt. Es ist also zu klären, inwiefern die Faktoren α_{cc} und γ_c die Unterschiede zwischen Zylinder und Bauteil sowie die Unterschiede zwischen den jeweiligen Versuchsrandbedingungen abdecken. Hierzu sollen die beiden Faktoren zunächst näher erläutert werden.

Beiwert α_{cc}

Der Beiwert wird in der aktuellen Fassung des EC2 [8] als der Beiwert „zur Berücksichtigung von Langzeitauswirkungen auf die Betondruckfestigkeit und von ungünstigen Auswirkungen durch die Art der Beanspruchung“ bezeichnet. In den Erläuterungen zum Eurocode, DAFStb Heft 600 [94], wird α_{cc} darüber hinaus als Faktor zur Berücksichtigung

- der gegenüber der Kurzzeitfestigkeit geringeren Dauerstandfestigkeit des Betons sowie
- der deterministisch beschreibbaren Unterschiede zwischen der am Probekörper ermittelten Druckfestigkeit und der Festigkeit im Bauteil

beschrieben. Die im zweiten Punkt genannten Unterschiede werden von Zilch und Zehetmaier [88] als Abweichungen der Zylinderdruckfestigkeit von der tatsächlichen, einaxialen Druckfestigkeit im Bauteil spezifiziert. Die beiden Bestandteile von α_{cc} werden z.B. von Steven und Empelmann [93] auch als Dauerstandfaktor und Bauteilfaktor bezeichnet. Jedoch findet sich in der Norm kein Hinweis auf die Größenordnung der beiden Bestandteile. Vielmehr entsteht der Eindruck, als sei die Festlegung des Wertes $\alpha_{cc} = 0,85$ für Normalbeton hauptsächlich nur auf Versuchen zur Dauerstandfestigkeit begründet ([88, 95]; vgl. auch Kap. 4.3.2.1).

Im Hinblick auf eine realistische Einschätzung der Druckfestigkeit eines Wandbauteils unter Versuchsbedingungen stellen sich in diesem Zusammenhang zwei Fragen:

- Dauerstandfaktor: Treten bei einer Versuchsdauer von ca. 20 - 60 Minuten bereits Dauerstandeffekte auf, die die Druckfestigkeit des Bauteils gegenüber der Kurzzeitfestigkeit eines Prüfzylinders verringern?
- Bauteilfaktor: Wie groß ist der Unterschied zwischen der Zylinderdruckfestigkeit und der tatsächlichen, einaxialen Druckfestigkeit im Bauteil?

Der ersten Frage wird in Kapitel 4.3.2 nachgegangen. Um die zweite Frage zu behandeln, hilft zunächst ein Blick in die Literatur. Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Gestalt eines Probekörpers ist allseits bekannt. Die Zusammenhänge wurden zahlreich untersucht bzw. kommentiert (z.B. [96–99]). Dabei sind vorrangig die Schlankheit und die Größe (Maßstabseffekt bzw. size effect) als Einflussparameter zu nennen. Diese beiden Aspekte

werden im Hinblick auf ILC-Wandbauteile in den Abschnitten 4.3.3 und 4.3.4 näher erläutert.

Beiwert γ_c

Der Teilsicherheitsbeiwert γ_c für Beton berücksichtigt die Modellunsicherheiten bei den Bauwerkswiderständen und die Unsicherheiten der Baustoffeigenschaften und ergibt sich allgemein zu [95]:

$$\gamma_c = \gamma_M \cdot \gamma_{conv} = 1,3 \cdot 1,15 \approx 1,5 \quad (29)$$

γ_M setzt sich im Wesentlichen aus Anteilen für die Materialstreuung, für die geometrische Streuung und die Modellunsicherheit zusammen [95]. Auf Basis entsprechender Variationskoeffizienten ergibt sich damit γ_M zu

$$\gamma_M = \exp(\alpha_R \cdot \beta \cdot V_R - 1,645 \cdot V_f) \quad (30)$$

mit

α_R : Wichtungsfaktor Widerstand $\alpha_R = 0,8$

β : Zuverlässigkeitsindex (GZT, Nutzungsdauer 50 Jahre) $\beta = 3,8$ in der ständigen und vorübergehenden Bemessungssituation

V_R : Variationskoeffizient Widerstand $V_R = \sqrt{V_m^2 + V_G^2 + V_f^2}$

V_m : Variationskoeffizient Modellunsicherheit $V_m = 0,05$

V_G : Variationskoeffizient Geometrie $V_G = 0,05$

V_f : Variationskoeffizient Materialfestigkeit $V_f = 0,15$

Im Hinblick auf die realistische Festigkeit eines Wandbauteils im Versuch ist keiner der Variationskoeffizienten als signifikant zu betrachten. Modellunsicherheiten und Geometrieunsicherheiten können nahezu ausgeschlossen werden, da es sich beim Ansatz Druck \cdot Fläche um ein sehr einfaches, realitätsgetreues Modell handelt (eine zentrische Belastung ohne unplanmäßige Ausmitte vorausgesetzt) und sich die tatsächlich belastete Fläche des Bauteils messtechnisch prüfen lässt. Eine wesentliche Streuung der Materialfestigkeit ist hier ebenfalls nicht relevant, da die Druckfestigkeit anhand von Prüfkörpern aus der gleichen Betoncharge ermittelt wird.

Der Faktor $\gamma_{conv} = 1,15$ dient zur Berücksichtigung von Unterschieden zwischen der Festigkeit eines separat geschalteten Laborprüfkörpers (Zylinder) und der Festigkeit des Betons im Bauwerk. Für die Einschätzung einer

realistischen Festigkeit im Bauteil unter Versuchsbedingungen ist dieser Faktor relevant, da es sich beim Wandbauteil zwar nicht um ein größeres, unter Baustellenbedingungen hergestelltes Bauwerk handelt, jedoch trotzdem signifikante Unterschiede zum Prüfzylinder vorliegen. Dieser Aspekt wird daher in Abschnitt 4.3.5 weiter untersucht.

4.3.2 Dauerstandeffekt

4.3.2.1 Theoretischer Hintergrund

An dieser Stelle soll der Frage nachgegangen werden, ob bei einer Belastungsdauer von 20 bis zu 60 Minuten bereits Dauerstandeffekte und damit eine Festigkeitsreduktion gegenüber der Kurzzeitfestigkeit auftreten.

Ursache für die Festigkeitsreduzierung unter Dauerlast ist das Kriechen der Matrix, die sich hierdurch teilweise der Last entzieht und diese auf den Zuschlag umlagert. Bei Normalbetonen führt dies zu einer erhöhten Beanspruchung der Kontaktzone zwischen den steifen Zuschlägen und der weichen Matrix. Die Folge sind Mikrorisse an der Oberfläche der Zuschläge und der frühzeitige Bruch. [88] Die Dauerstandfestigkeit, d.h. die Druckspannung, die ein Beton gerade noch unendlich lang halten kann, wurde für Normalbetone nach Rüsç [100] zu 80 % der Kurzzeitfestigkeit ermittelt. Gegenläufig zur Festigkeitsreduktion aus Dauerbelastung ist der Effekt der Nacherhärtung, der in der Normung teils unterschiedlich bewertet wird [88]. Für Normalbetone gilt im EC2 [8] im Regelfall ein Dauerstandbeiwert von $\alpha_{cc} = 0,85$ [8].

Bei Leichtbetonen tritt unter Dauerlast ebenfalls ein Kriechen der Matrix auf. Die Tragfähigkeit unter Dauerlast hängt jedoch davon ab, inwieweit der Leichtzuschlag unter Kurzzeitbelastung noch Tragreserven besitzt, um zusätzliche Lasten aus Umlagerung aufzunehmen. HPLWAC, zu denen auch Infraleichtbeton gehört, nutzt das Festigkeitspotential des Leichtzuschlags weitestgehend aus, weshalb von keinem nennenswerten Umlagerungsvermögen auszugehen ist. Eigentlich müsste die Festlegung des Dauerstandbeiwerts von Leichtbeton in Abhängigkeit der Art der Gesteinskörnung erfolgen. In den meisten Normen ist eine solche Überprüfung jedoch nicht vorgesehen, sondern es wird eine generelle Abminderung des Dauerstandbeiwerts für Leichtbetone vorgenommen. [7]

Leichtbetone weisen in der Regel eine geringere Nacherhärtung in höherem Alter auf, daher wird die Festigkeitsreduktion aus Dauerlast nur weniger stark gemindert. Aus diesem Grund tritt bei Leichtbetonen das Festigkeitsminimum meist deutlich später, teilweise erst nach Monaten auf, während bei Normalbetonen das Versagen bereits nach kurzer Zeit, höchstens einigen Tagen eintritt. [101]

Bislang liegen nicht viele experimentelle Untersuchungen der Dauerstandfestigkeit mit Leichtbeton vor. In der Literatur finden sich Angaben von 75 % [101] bzw. 70-75 % [102] der Kurzzeitfestigkeit. Der EC2 [8] sieht $\alpha_{lcc} = 0,75$ (Parabel-Rechteck-Diagramm bzw. Spannungsbloc) bzw. 0,80 (bilineare Spannungs-Dehnung-Linie) vor.

Für Infraleichtbeton wurden ersten Versuche zum Dauerstandbeiwert von Schlaich und Hückler [103] durchgeführt. Hierbei wurden Zylinder langsam innerhalb von 7h bis zur Kurzzeitfestigkeit belastet. Die Ergebnisse sowie die einer Referenzprüfung an Normalbeton sind in Bild 4-12 dargestellt. Alle Prüfkörper versagten vor Erreichen der Kurzzeitfestigkeit. Für ILC ergab sich im Mittel ein Dauerstandbeiwert von $\alpha_{ilcc,m} = 0,78$, für Normalbeton zu $\alpha_{cc,m} = 0,87$. Der Dauerstandbeiwert für ILC wurde mit $\alpha_{ilcc} = 0,75$ vorgeschlagen [19].

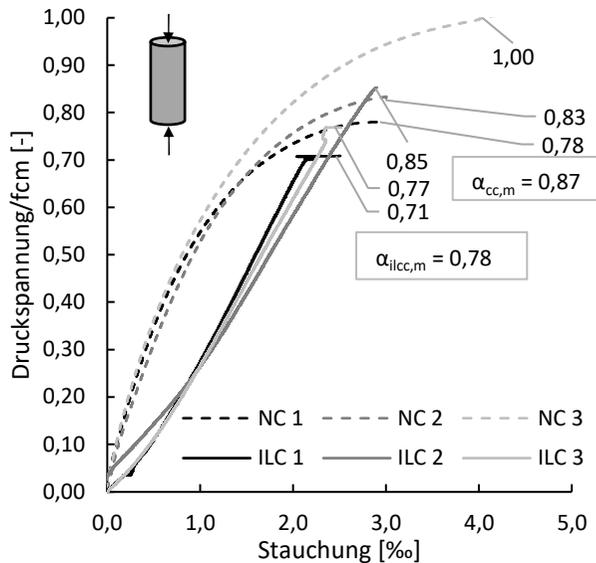


Bild 4-12: Spannungs-Dehnungs-Linien der Dauerstandversuche an ILC800 und Normalbeton [103]

Die geschilderten Erkenntnisse beziehen sich auf den Dauerstandbeiwert zur Ermittlung der Tragfähigkeit für einen unendlich langen Zeitraum. Rückschlüsse, ob bei einer kürzeren Zeitspanne unter einer Stunde ebenfalls bereits Dauerstandeffekte in kleinerem Maße auftreten, können nicht gezogen werden. Dies soll anhand der im nächsten Abschnitt beschriebenen Prüfungen untersucht werden.

4.3.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Das Dauerstandverhalten von Infralichtbeton in einem Zeitraum bis zu 60 Minuten wurde anhand von verschiedenen Versuchsreihen geprüft (Tabelle 4-5). In VR1 wurde zunächst die Kurzzeitdruckfestigkeit von ILC800 an insgesamt 6 Zylindern (jeweils 3 aus der Betonage der VR2, 3 aus der Betonage VR3) gemäß DIN EN 12390-3 [104] ermittelt. In VR2 wurden 3 Zylinder langsam über einen Zeitraum von 30 Minuten bis zur mittleren Kurzzeitfestigkeit aus VR1 belastet und Zeitpunkt und Last beim Versagen dokumentiert. In VR3 wurden jeweils 2 Zylinder mit einem konstanten

Lastniveau zwischen 70 % und 85 % der Kurzzeitfestigkeit belastet und die Zeit bis zum Bruch dokumentiert bzw. nach einer Stunde die Last bis zum Versagen erhöht. VR4 und 5 dienten als Referenzprüfung mit Normalbeton C35/45, wobei in VR4 anhand von 2 Zylindern die Kurzzeitfestigkeit ermittelt und in VR5 2 Zylinder entsprechend der VR2 belastet wurden.

Tabelle 4-5: *Versuchsprogramm der Dauerstanduntersuchungen (basierend auf [21])*

Material/ Rezeptur	Versuchs- reihe	Anzahl Probekörper	Versuch
ILC800/ Anhang Bild 11-4	Zylinderdruckfestigkeit		
	VR1	6	Druckfestigkeit kurzzeitig ($f_{cm,cyl}$)
	Dauerstandversuche		
	VR2	3	langsam auf $f_{cm,cyl}$ über 30 min
	VR3	2	$0,70 \times f_{cm,cyl}$
		2	$0,75 \times f_{cm,cyl}$
2		$0,80 \times f_{cm,cyl}$	
2		$0,85 \times f_{cm,cyl}$	
C35/45 / Anhang Bild 11-7	Zylinderdruckfestigkeit		
	VR4	2	Druckfestigkeit kurzzeitig ($f_{cm,cyl}$)
	Dauerstandversuche		
	VR5	2	langsam auf $f_{cm,cyl}$ über 30 min

Bild 4-13 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der VR2 mit langsamer Steigerung der Belastung über 30 Minuten. Zwei Zylinder versagten nach 23 Minuten bei einem Lastniveau von ca. 83 % der in VR1 ermittelten Kurzzeitfestigkeit, der dritte Zylinder versagte nach 28 Minuten bei 101 %. Allerdings besitzen diese Ergebnisse nur begrenzte Aussagekraft. Tabelle 4-6 zeigt die Werte in Zusammenhang mit der Dichte. Wie dort zu sehen, liegt neben der Streuung der erreichten Druckfestigkeit auch eine Streuung der Dichte vor. Auch bei VR1 ergaben sich signifikante Streuungen der Dichte und Festigkeiten (Tabelle 11-6 im Anhang). Da zwangsläufig nicht Kurzzeit- und Dauerstandfestigkeit am gleichen Zylinder geprüft werden können,

bedarf es einer hohen Anzahl an Versuchen, um statistisch gesicherte Aussagen treffen zu können. Diese Problematik findet sich auch in der Literatur wieder [105].

ILC800 - Druckfestigkeit über 30min

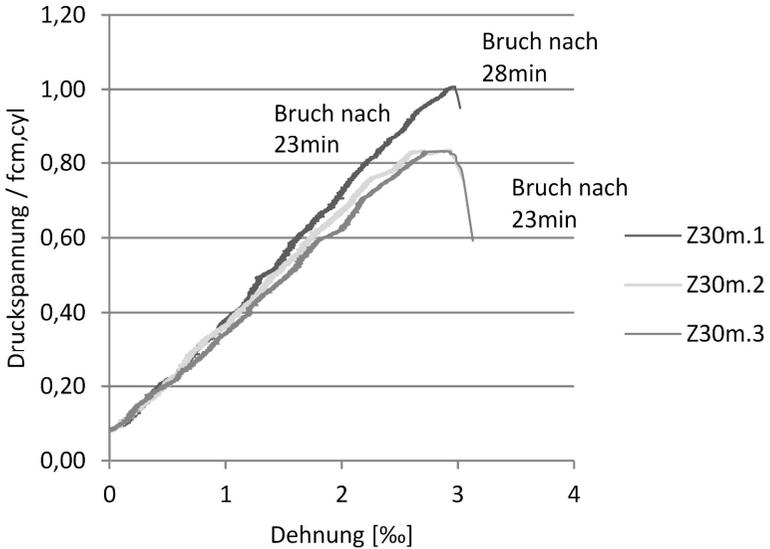


Bild 4-13: Ergebnisse der Dauerstandversuche ILC800, VR2 [21]

Tabelle 4-6: Ergebnisse der Dauerstandversuche über 30 min mit ILC800 (VR2) [21]

Prüfkörper Nr.	Prüfroh-dichte [g/cm ³]	max. Spannung σ_{max} [N/mm ²]	$\sigma_{max}/f_{cm,cyl, kurz}$	gebrochen nach [min]
Z 30m.1	0,940	12,77	1,01	28
Z 30m.2	0,917	10,57	0,83	23
Z 30m.3	0,921	10,54	0,83	23

Auch die Ergebnisse der VR3 verdeutlichen den Zusammenhang zur Dichte. Tabelle 4-7 zeigt die Resultate für die unterschiedlichen Lastniveaus der in

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

VR1 ermittelten Kurzzeitdruckfestigkeit. Beim Lastniveau von 75 % $f_{cm,cyl}$ beispielsweise liegt eine Dichtedifferenz von 46 kg/m^3 vor, was Ursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der Festigkeiten und Versagenszeitpunkte (20 bzw. > 60 min) sein kann. Ähnliches gilt für das Lastniveau von 70 %. Bei 80 % und 85 % lagen die Rohdichten, Festigkeiten und Versagenszeitpunkte der jeweiligen Zylinder relativ nah beieinander. Für 80 % ergab sich ein Versagen nach 15 bzw. 20 Minuten, bei 85 % ein annähernd direktes Versagen nach 1 Minute.

Die Ergebnisse der Referenzprüfung mit C25/30 sind im Anhang in Tabelle 11-7 und Tabelle 11-8 dargestellt. Aufgrund der geringen Prüfkörperanzahl ergaben sich keine belastbaren Erkenntnisse.

Tabelle 4-7: Ergebnisse der Dauerstandversuche mit konstanten Lastniveaus, ILC800, VR3 (basierend auf [21, 89, 90])

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm^3]	σ_{\max} [N/mm^2]	$\sigma_{\max} / f_{cm,cyl}$	Versagen nach [min]
Dauerlast 70 % $f_{cm,cyl} = 10,1 \text{ N/mm}^2$				
Z 70.1	0,935	13,23	0,92	> 60
Z 70.2	0,915	10,20	0,71	5
Mittelwert:		-*	-*	
Dauerlast 75 % $f_{cm,cyl} = 10,8 \text{ N/mm}^2$				
Z 75.1	0,908	10,92	0,76	20
Z 75.2	0,954	15,46	1,07	> 60
Mittelwert:		-*	-*	
Dauerlast 80 % $f_{cm,cyl} = 11,5 \text{ N/mm}^2$				
Z 80.1	0,925	11,65	0,81	20
Z 80.2	0,925	11,64	0,81	15
Mittelwert:		11,65	0,81	
Dauerlast 85 % $f_{cm,cyl} = 12,2 \text{ N/mm}^2$				
Z 85.1	0,921	12,36	0,86	1
Z 85.2	0,910	12,36	0,86	1
Mittelwert:		12,36	0,86	

*kein Mittelwert gebildet, da Unterschiede Rohdichten zu groß

Trotz der statistischen Unsicherheiten lässt sich an den Ergebnissen mit ILC erkennen, dass sich bereits bei einer Prüfdauer von 20 - 30 Minuten ein Dauerstandeffekt bzw. eine Festigkeitsreduktion zeigt. Aus VR2 und VR3 ergibt sich eine Tendenz zu einer Dauerstandfestigkeit zwischen 80 % und 85 % der Kurzzeitfestigkeit.

Zur Verifikation der Ergebnisse wurden im Rahmen der Arbeit von Jünke [89] weitere Versuchsserien an ILC700 durchgeführt, hier mit VR6 und VR7 bezeichnet (Tabelle 4-8). In VR6 wurde die Kurzzeitfestigkeit ermittelt, wobei jeweils 6 Zylinder aus der Betoncharge eines Lastniveaus hergestellt wurden. In VR7 wurden anhand von jeweils 6 Zylindern die Lastniveaus von 75 %, 80 % und 85 % der Kurzzeitfestigkeit analog zur VR3 nochmals untersucht.

Tabelle 4-8: Zusätzliche Versuchsreihen Dauerstandprüfungen, ILC700 (basierend auf [89])

Versuchsreihe/ Rezeptur	Anzahl Prüfkörper	Versuch
Zylinderdruckfestigkeit		
VR6/ Anhang Bild 11-5	18	Druckfestigkeit kurzzeitig ($f_{cm,cyl}$)
Dauerstandversuche		
VR7/ Anhang Bild 11-5	6	$0,75 \times f_{cm,cyl}$
	6	$0,80 \times f_{cm,cyl}$
	6	$0,85 \times f_{cm,cyl}$

Auch hier ergaben sich Streuungen in den Dichten und Festigkeiten (vgl. Anhang Bild 11-8), insbesondere bei den Prüfkörpern des Lastniveaus von 80 %, da hier Probleme beim Mischvorgang auftraten. Aufgrund der umfangreicheren Datenlage wurde für VR7 eine Auswertung analog zum Vorgehen von Rüschi [100] gewählt, bei dem die Dehnung über die Zeit (logarithmisch) dargestellt wird. Dabei wurde der dargestellte Zeitraum auf 1h begrenzt, für Prüfkörper, die erst danach bei gesteigerter Last versagten, ist der Verlauf über 1h hinaus nicht dargestellt. Jeweils ein Prüfzylinder von jedem Lastniveau ergab keine verwertbaren Ergebnisse, da entweder das

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

Versagen vor Erreichen der Lastniveauspannung eintrat oder bereits vor der Prüfung optische Mängel auf ungünstige Resultate schließen ließen. Bild 4-14 zeigt neben den Ergebnissen der VR7 als Referenz zusätzlich exemplarisch den Verlauf eines Zylinders unter Kurzzeitbeanspruchung (100 %). [89]

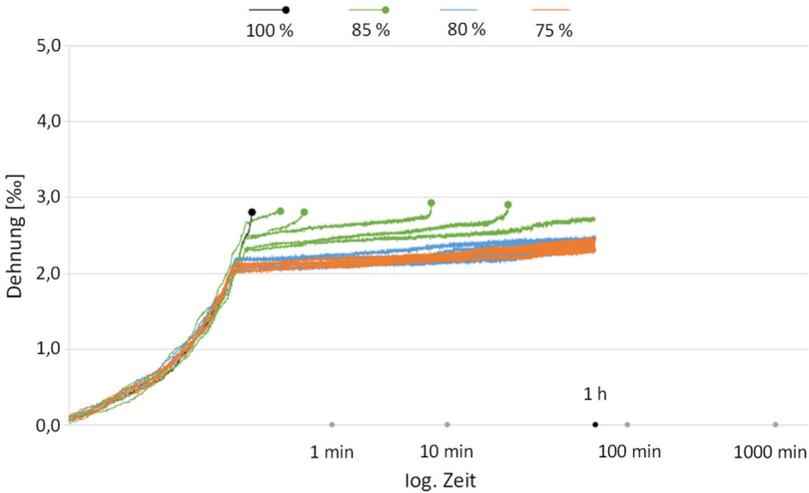


Bild 4-14: Ergebnisse der Dauerstandversuche ILC700, VR7, mit unterschiedlichen Lastniveaus (ausgedrückt in % der Kurzzeitfestigkeit; basierend auf [89])

Aus den Verläufen lässt sich ablesen, dass die Zylinder unter Lastniveaus von 75 % und 80 % innerhalb von 60 Minuten Belastungsdauer kein Versagen zeigten. Bei 85 %iger Belastung hingegen versagten vier von fünf Proben in einem Zeitraum von 15 Minuten oder weniger.

Diese Ergebnisse bestätigen die Tendenz aus den Versuchsreihen VR2 und 3. Es kann festgehalten werden, dass bei einer Versuchsdauer von 20 Minuten oder mehr von einer Festigkeitsreduktion auf ein Niveau zwischen 80 und 85 % der Kurzzeitfestigkeit auszugehen ist.

Im Hinblick auf die erwartete Bauteilfestigkeit von ILC-Wandbauteilen im Versuch bedeutet dies, dass bei einer Prüfdauer von 20 Minuten oder mehr nur mit einer Festigkeit von maximal 85 % der Kurzzeitfestigkeit zu rechnen ist. Um die erwartete Traglast als Vergleichsbasis für die experimentelle Traglast konservativ abzuschätzen, muss der obere Grenzwert verwendet

werden. Dementsprechend wird der Reduktionsfaktor für den Dauerstandeffekt, an dieser Stelle mit $\alpha_{ilcc,20min}$ bezeichnet, zu 0,85 gesetzt (Anm.: in früheren Veröffentlichungen der Autorin [21, 106] wurde der Faktor auf Basis des damaligen Kenntnisstandes auf 30 Minuten ($\alpha_{ilcc,30min}$) bezogen; dies wurde hier korrigiert).

Zusätzliche Untersuchungen zur Untermauerung dieses Ansatzes sind unbedingt empfehlenswert, da wie erwähnt bei dieser Form der Prüfung eine hohe Anzahl an Versuchen für statistisch vollumfänglich belastbare Ergebnisse erforderlich ist. Zudem sollten weitere Referenzprüfungen an Normalbeton erfolgen.

4.3.3 Bauteilschlankheit

4.3.3.1 Theoretischer Hintergrund

In diesem Abschnitt wird die Frage behandelt, inwiefern die höhere Schlankheit der ILC-Wandbauteile einen Festigkeitsabfall gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit bewirkt. Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Schlankheit der Prüfkörper wurde bereits vielfach untersucht und diskutiert [96–99, 107–109]. Die Ursache hierfür liegt in der Querdehnungsbehinderung, die durch die starren Platten der Prüfmaschine auf die Kontaktzone des Prüfkörpers ausgeübt wird. Durch die Querdehnungsbehinderung werden die Querspannungen überlagert und die Festigkeit dadurch in einem lokalen Bereich nahe der Druckplatten erhöht. Mit zunehmender Schlankheit des Probekörpers verliert die Querdehnungsbehinderung in den Randbereichen an Einfluss und die Druckfestigkeit des Probekörpers nimmt ab (vgl. Bild 4-15). Die Querdehnungsbehinderung kann beispielsweise durch die Nutzung von Stahlbürsten statt starren Druckplatten vermieden werden.

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

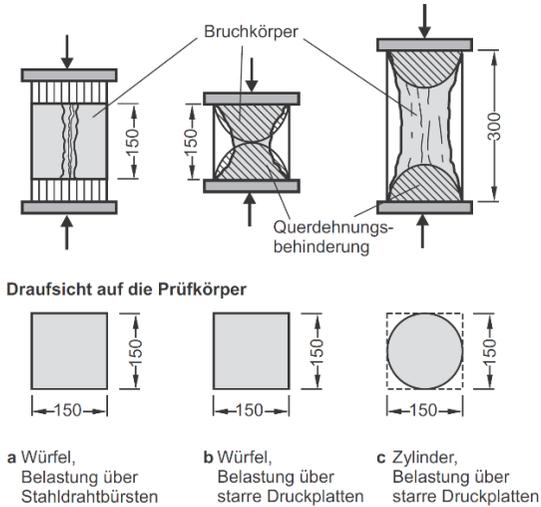


Bild 4-15: Druckfestigkeitsprüfung mit Standardversuchskörpern [88]

Der Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit f und Schlankheit h/d hängt dabei von der Querschnittsform der Prüfkörper, vom Verhältnis von Zug- und Druckfestigkeit sowie von der Betonfestigkeit ab [99, 101]. Nach Bonzel [96] wirkt sich die Schlankheit bei Betonen geringer Festigkeit stärker aus. Tabelle 4-9 zeigt Verhältniszerte der Druckfestigkeiten in Abhängigkeit der Schlankheit. Bei $h/d < 2$ gelten die höheren Werte für Betone geringer Festigkeit, die niedrigeren Werte für Betone hoher Festigkeit; bei $h/d > 2$ dreht sich dies gemäß [96] um. Hieraus lässt sich schließen, dass bei Leichtbetonen mit niedrigen Festigkeiten und Schlankheiten $h/d > 2$ die Druckfestigkeit stärker abnimmt.

In anderen Literaturstellen wird festgehalten, dass bei Leichtbetonen der Einfluss der Geometrie deutlich kleiner ist als bei Normalbetonen [7]. Grund ist die geringere Querdehnung unter Maximallast, wodurch die festigkeitssteigernde Wirkung der Querdehnungsbehinderung bei gedungenen Probekörpern verringert ist. Daher rührt die bei Leichtbetonen abweichende Umrechnung der Zylinder- zur Würfeldruckfestigkeit $f_{lc,cyl} = 0,95 \cdot f_{lc,cube,150}$, die auch für Infraleichtbeton experimentell bestätigt wurde [19].

Tabelle 4-9: Verhältniswerte der Druckfestigkeit von Prüfkörpern verschiedener Schlankheit [99]

Schlankheit h/d	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Verhältniswerte	1,40 bis 2,00	1,10 bis 1,20	1,03 bis 1,07	1,00	0,95 bis 1,00	0,90 bis 0,95

In der Regel wird davon ausgegangen, dass ab einem Verhältnis $h/d \geq 2$ keine wesentliche Änderung der Druckfestigkeit mit zunehmender Schlankheit auftritt (vgl. z.B. [88, 110]). Dementsprechend wird als Basisgröße für die Bemessung nach EC2 [8] die an einem Zylinder ermittelte Druckfestigkeit verwendet. Die untersuchten Schlankheitsbereiche liegen dabei meist bei $h/d < 4$ [98, 101, 110]. Von Schickert [98] und Grübl et al. [101] wird dargestellt, dass nach einem konstanten Bereich ein weiterer Abfall der Festigkeit bei erhöhter Schlankheit auftreten kann. Bild 4-16 ist der prinzipielle Verlauf der Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Schlankheit zu entnehmen. Im Bereich B-C ändert sich die Druckfestigkeit kaum, so dass hier Probekörperschlankheiten vorliegen, die praktisch keinen geometriebedingten Einfluss auf das Festigkeitsergebnis haben. Dieser Bereich weist demnach die einaxiale Druckfestigkeit aus [98]. Im Bereich C-D hingegen fällt die Festigkeit mit zunehmender Schlankheit weiter ab.

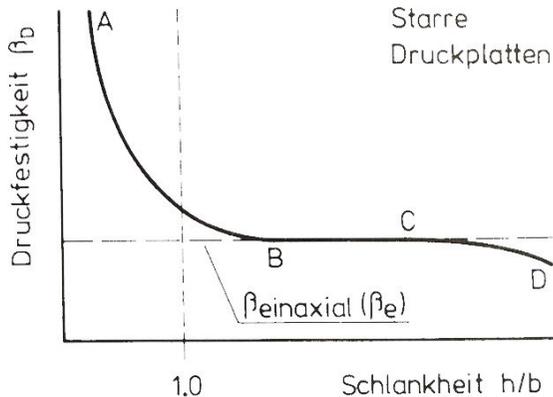


Bild 4-16: Prinzipielle Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit (in [98] mit β bezeichnet) von der Probekörperschlankheit [98]

Der weitere Festigkeitsabfall bei hohen Schlankheiten wird von Sangha und Dhir [108] sowie Schickert [111] durch unterschiedliche Bruchvorgänge begründet. Während bei gedrungenen Zylindern das Versagen vorrangig in den Endbereichen beginnt, die durch die Querdehnungsbehinderung beeinflusst sind, kündigt sich bei schlankeren Zylindern das Versagen im unbeeinflussten, mittleren Bereich durch Zugrisse an der Oberfläche an. Dieser mittige Bruchvorgang wird durch elastische Verformungsenergie aus den unebrochenen Endbereichen weiter verstärkt [108].

Der Zusammenhang zwischen Schlankheit und Druckfestigkeit kann nach Wesche [110] mit Verweis auf Voellmy [112] durch den folgenden Ausdruck beschreiben werden, wobei Voellmy die Druckfestigkeit mit β_D bezeichnet:

$$\beta_D = \beta_{D1} \cdot (2 + d/h)/3 \quad \text{mit } \beta_{D1} = \beta_D \text{ für } h/d = 1 \quad (31)$$

Wendet man diese Formel auf eine Schlankheit von 6,7 entsprechend den in Kapitel 4.2 geprüften ILC-Wandbauteilen an ($\beta_{D6,7}/\beta_{D1} = 0,72$) und setzt dies ins Verhältnis zum Ergebnis für $h/d=2$ analog zum Zylinder ($\beta_{D2}/\beta_{D1} = 0,83$) ergibt sich ein Verhältniswert der Druckfestigkeit von $\beta_{D6,7}/\beta_{D2} = 0,86$. Demnach wäre für ILC-Wandbauteile aufgrund der Schlankheit mit einem Festigkeitsabfall auf 86 % der Zylinderdruckfestigkeit zu rechnen, wobei hier ein Einfluss aus unterschiedlicher Querschnittsgeometrie vernachlässigt wird.

Experimentelle Erkenntnisse, wie groß ein Festigkeitsabfall bei einer Schlankheit im Bereich von 6,7 gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit insbesondere bei Infraleichtbeton tatsächlich ist, liegen nicht vor. Um diesen Sachverhalt näher zu beleuchten, wurden die im nächsten Abschnitt erläuterten Untersuchungen durchgeführt.

4.3.3.2 Experimentelle Untersuchungen

Um die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Schlankheit für Infraleichtbeton zu prüfen, wurden mehrere Versuchsreihen an kleinformatigen Probekörpern durchgeführt. Einen Überblick gibt Tabelle 4-7. In VR1 wurden für Schlankheiten h/d zwischen 1 und 6 jeweils zwei quaderförmige Probekörper aus ILC800 im Alter von 28 Tagen in einer Kurzzeitdruckprüfung in Anlehnung an DIN EN 12390-3 [104] auf ihre Bruchlast untersucht. VR2 entsprach VR1 und diente als Referenzprüfung mit Normalbeton. VR3 wurde im Rahmen der Arbeit von Jünke [89] durchgeführt. Hier wurden jeweils 6

Probekörper mit Schlankheiten zwischen 2,2 und 6,6 geprüft. Angaben zu den Rezepturen, Dichten und Festigkeiten der Versuchsreihen finden sich in der nachfolgenden Tabelle und im Anhang 11.3.

Tabelle 4-10: Prüfkörper der Versuchsreihen zur Schlankheit

Versuchsreihe/ Material	Grund- fläche bxd [cm ²]	Höhe h [cm]	Schlankheit h/d [-]	Anzahl Prüf- körper	Herstellung
VR1 (ILC800, Rezeptur Bild 11-2)	10x10	10	1	2	Würfelschalung
	5x10	10	2	2	Würfel geschnitten
VR2 (C35/45, Rezeptur Bild 11-7)	5x10	20	4	2	Würfel geschnitten
	5x10	30	6	2	Zylinder geschnitten
VR3 [89] (ILC700, Rezeptur Bild 11-5)	30x7,5	16,5	2,2	6	separate Schalungen
	30x7,5	24,8	3,3	6	
	30x7,5	33	4,4	6	
	30x7,5	50	6,6	6	



Bild 4-17: Prüfkörper der VR3 mit h/d = 2,2 bis 6,6 [89]

Die Ergebnisse der Druckprüfungen sind in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt. Bei VR1 und 2 wurden die Probekörper aus Würfeln oder Zylindern geschnitten, weshalb die resultierenden Dimensionen nochmals nachgemessen und die tatsächlich vorliegenden Schlankheiten berechnet wurden. Die Druckfestigkeiten werden ins Verhältnis zur mittleren Festigkeit der Probekörper mit $h/d \approx 2$ (tatsächlich vorliegend $h/d = 2,09$ (VR1) bzw. $2,13$ (VR2)) gesetzt.

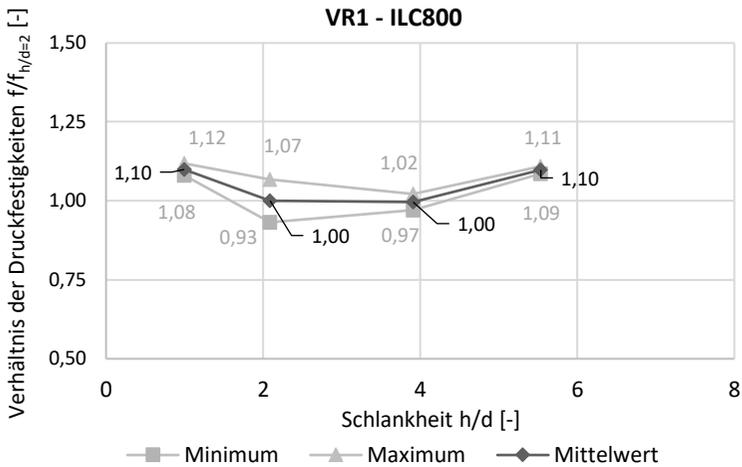


Bild 4-18: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 1 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d \approx 2$

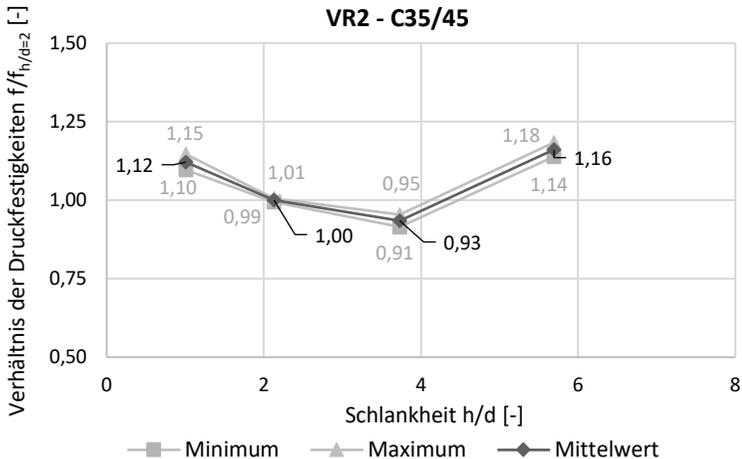


Bild 4-19: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 2 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d \approx 2$

Wie den Bildern Bild 4-18 und Bild 4-19 zu entnehmen liegt für VR1 und 2 das Druckfestigkeitsverhältnis für $h/d < 2$ wie zu erwarten größer 1. Dabei weisen die Prüfkörper bei den Schlankheiten 1 und 2 unterschiedliche Grundfläche auf, was ggf. ebenfalls Einfluss auf die Festigkeit nimmt. Bei $h/d \approx 2$ und 4 liegt der Verhältniswert für ILC800 ca. bei 1,0, was sich mit den annähernd konstanten Verläufen aus der Literatur deckt (vgl. Kap. 4.3.3.1). Für Normalbeton ist bei Schlankheit 4 ein weiterer Abfall zu beobachten. Nicht nachvollziehbar sind die Verhältniswerte beider Versuchsreihen bei $h/d \approx 6$ (tatsächlich 5,54 bzw. 5,69), die einen Festigkeitsanstieg gegenüber der Schlankheit $h/d = 2$ ausweisen. Hier wäre gemäß der Literatur ein weiterer Abfall oder ggf. ein konstanter Verlauf zu erwarten gewesen. Es ist fraglich, ob die Ergebnisse aussagekräftig sind. Vorstellbar ist beispielweise, dass der unterschiedliche Herstellprozess, d.h. das Schneiden des quaderförmigen Probestücks aus einem Zylinder anstatt das Teilen eines Würfels, zu unterschiedlichen Resultaten führt.

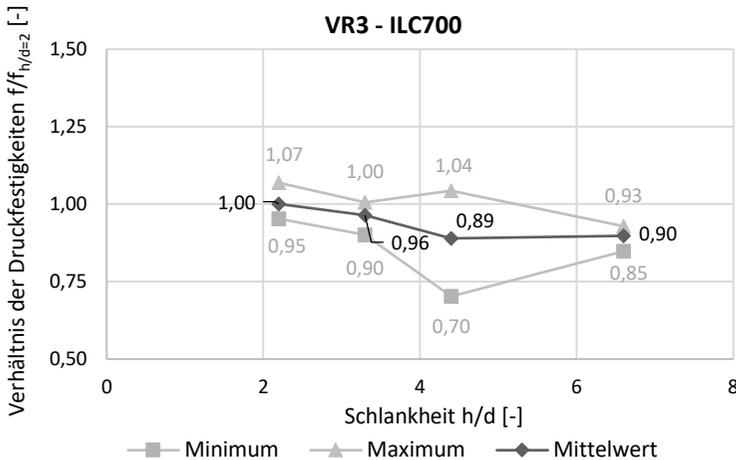


Bild 4-20: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 3 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d = 2,2$ (basierend auf [89])

Für VR3 wurden alle Probekörper in passenden Holzschalungen hergestellt [89]. Bild 4-20 zeigt die Verhältniswerte der Druckfestigkeiten bezogen auf die Schlankheit $h/d = 2,2$. Im Mittel fallen die Werte bis zur Schlankheit 4,4 ab, wobei hier teils große Schwankungen vorliegen. Der mittlere Verhältniswert bei Schlankheit 6,6 bleibt gegenüber dem Mittelwert bei 4,4 annähernd konstant. Aus den Werten lässt sich schlussfolgern, dass Probekörper mit Schlankheit 6,6 gegenüber einer Schlankheit von 2,2 eine Festigkeitsreduktion um 10 % erfahren.

Die Ergebnisse der VR1 bis 3 stehen bis zu Schlankheit von ca. 4 größtenteils im Einklang mit Verhältniswerten aus der Literatur (vgl. Tabelle 4-9). Im Vergleich zwischen Infraleichtbeton und Normalbeton bestätigt sich jedoch nicht, dass die Schlankheit bei Betonen niedriger Festigkeit größeren Einfluss nimmt. Des Weiteren ist auch keine weitere Festigkeitsreduktion zwischen den Schlankheiten von ca. 4 und ca. 6 zu verzeichnen. Ein abfallender Ast wie im Bereich C-D in Bild 4-16 dargestellt bildet sich nicht aus, wobei nicht ausgeschlossen werden kann, dass die weitere Reduktion bei $h/d > 6,6$ auftritt. Die Ergebnisse der VR1/2 und VR3 für Schlankheiten von 6 bzw. 6,6 widersprechen einander. Die Resultate der VR3 stehen eher im Einklang mit der Literatur und basieren auf einer größeren Prüfkörperanzahl, die zudem

in einem weniger fehleranfälligen Prozess hergestellt wurden. Die Ergebnisse der VR3 werden daher als aussagekräftig angesehen.

Über die Formel (31) kann der Festigkeitsabfall in Abhängigkeit der Schlankheit ausgedrückt werden. Bild 4-21 zeigt die rechnerischen Ergebnisse im Vergleich zu den mittleren Verhältniswerten der VR3, wobei auch für die rechnerische Bestimmung die Schlankheit 2,2 als Bezugsgröße gewählt wurde. Es ergeben sich Abweichungen zwischen den berechneten und den experimentellen Werten von ca. 2 %.

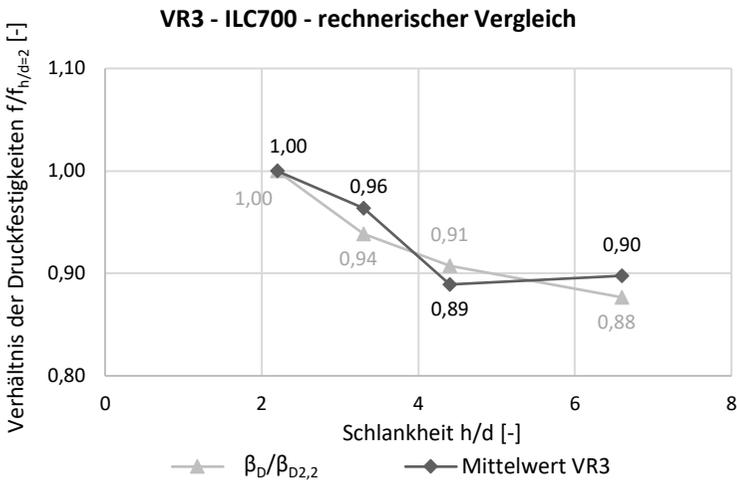


Bild 4-21: Rechnerische Verhältniswerte der Druckfestigkeiten β_D und mittlere Verhältniswerte der experimentellen Druckfestigkeiten f der VR3 (basierend auf [89])

Die Schlankheit des Bezugskörpers 2,2 ist dabei annähernd gleich der Schlankheit eines Prüfzylinders. Geometrie und Abmessungen unterscheiden sich jedoch, was weitere Festigkeitsunterschiede zur Folge haben kann. Daher werden in Bild 4-22 die Druckfestigkeiten der VR3 zusätzlich ins Verhältnis zur Zylinderdruckfestigkeit mit $h/d = 2$ gesetzt. Hier wird ein mittlerer Festigkeitsabfall zwischen Zylinder und quaderförmigem Prüfkörper mit $h/d = 2,2$ um 9 % deutlich. Die mittlere Festigkeitsreduktion bei Schlankheit 6,6 bezogen auf den Zylinder liegt bei 19 %.

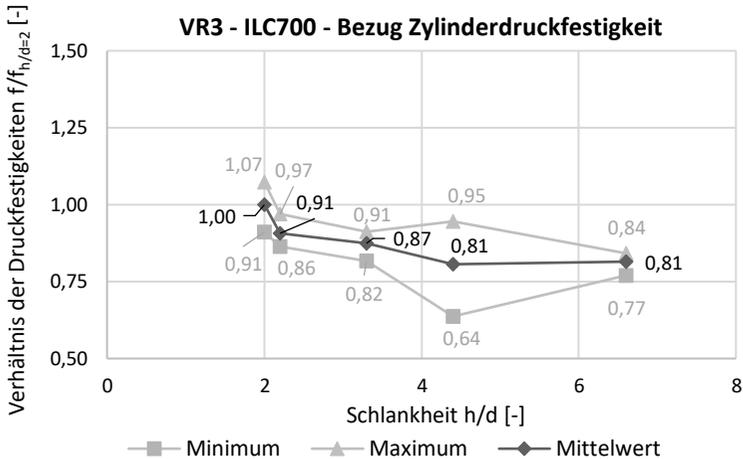


Bild 4-22: Verhältnismerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 3 bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit $h/d = 2,0$ (basierend auf [89])

Anhand der experimentellen Untersuchungen lässt sich feststellen, dass eine Festigkeitsreduktion bei Bauteilen der Schlankheit $h/d = 6,6$ gegenüber der Festigkeit eines Bauteils der Schlankheit 2 auftritt. Der Verhältnismerte der Druckfestigkeit der quaderförmigen Probekörper gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit liegt im Mittel bei 0,81.

Übertragen auf die ILC-Wandbauteile bedeutet dies, dass aufgrund der höheren Schlankheit inkl. Geometrieinflüssen mit einer Festigkeitsreduktion gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit, hier mit Faktor $\eta_{ilc,sl}$ bezeichnet, von $\eta_{ilc,sl} = 0,81$ zu rechnen ist.

Mit 6 Prüfwerten je Prüfkombination besitzen die Ergebnisse der VR3 bereits eine solide statistische Aussagekraft. Trotzdem sind weitere Untersuchungen analog zur VR3 zu empfehlen, um die widersprüchlichen Ergebnisse der VR1/2 klar als nicht aussagekräftig einordnen zu können. Zudem sind weitere Referenzprüfungen an Normalbeton analog VR3 notwendig, um eventuell unterschiedliche Einflüsse der Schlankheit bei ILC und NB ausschließen zu können. Des Weiteren wären Prüfungen im 1:1 Maßstab von Interesse, um einen ggf. unterschiedlichen Einfluss der Schlankheit aufgrund unterschiedlicher Maßstäbe zu erkennen.

4.3.4 Bauteilgröße (Maßstabeffekt)

4.3.4.1 Theoretischer Hintergrund

Die Abhängigkeit der Druckfestigkeit von der Größe eines Probekörpers wurde bereits vielfach untersucht und diskutiert. Bonzel [96] führt eine Zusammenstellung der bis zum damaligen Zeitpunkt erfolgten empirischen Untersuchungen und Erklärungsansätze auf. Als Ursachen wurden vielfältige Gründe diskutiert. Dazu gehören z.B. unterschiedliches Verdichten, Absetzen oder Entmischen bei größeren Probekörpern während der Herstellung, unterschiedliche Erhärtungsbedingungen und verschieden starke Einflüsse der Endflächenreibung bzw. Querdehnungsbehinderung an den Prüfoberflächen. Ein häufig erwähnter Aspekt ist auch die Verformung der Druckplatten der eingesetzten Prüfmaschinen. Durch Dehnungen und Biegungen der Platten kann die Endflächenreibung beeinflusst und so die resultierende Druckfestigkeit vermindert werden. In diesem Zusammenhang erläutert Anderegg [113], dass bei Leichtbetonen die Größe eine deutlich kleinere Rolle spielt als bei Normalbetonen. Dies wird als Untermauerung der These der Druckplattenverformung interpretiert [96]: Leichtbetone könne aufgrund geringer Festigkeit kaum entsprechende Verformung bewirken, so dass hier eine Veränderung der Festigkeit mit zunehmender Prüfkörpergröße ausbleibt.

Auch in neuerer Literatur wird der Einfluss der Größe noch kontrovers diskutiert. Gemäß Grübl et al. [101] besteht weiterhin keine eindeutige Erklärung, neben den oben genannten möglichen Ursachen wird als wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansatz der Weibull-Effekt als weitere Begründung angeführt [99, 101].

Die Weibull-Theorie geht davon aus, dass der Spröbruch von der lokalen Spannung an der größten Fehlstelle bestimmt wird, d.h. dass das Versagen immer vom schwächsten Glied in der Kette ausgeht. Die Festigkeiten bzw. Fehlstellen sind dabei statistisch verteilt. Mit größerem Volumen ergibt sich eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Defekten und damit eine geringere Festigkeit des Gesamtbauteils. [99, 114]

Der Einfluss der Größe wird auch durch weitere theoretische Modelle untermauert, insbesondere das size effect law (SEL) nach Bažant [109, 115]. Dabei wird unter size effect bzw. Maßstabeffekt die Abhängigkeit der Nennfestigkeit σ_N von der charakteristischen Bauteilgröße D verstanden. Die

theoretischen Modelle zum size effect sind komplex und sind nicht Teil dieser Arbeit, weshalb der Hintergrund hier nur in aller Kürze benannt werden soll: Der Maßstabeffekt entsteht nach Bažant [115] durch die Freisetzung von Energie infolge Rissbildung. Die über ein Rissbandmodell beschreibbare, freigesetzte Energie in Abhängigkeit der Nennfestigkeit σ_N nimmt mit Größe des Bauteils zu und muss gleich der an der Bruchoberfläche kompensierten Energie sein. Letztere hängt von der Bruchenergie G_f ab, die als Materialkennwert unabhängig von der Bauteilgröße annähernd konstant bleibt. Hieraus leitet sich ab, dass die Nennspannung in einem größeren Bauteil kleiner sein muss. Voraussetzung für das Auftreten eines Maßstabeffekts ist ein ausgedehntes Risswachstum vor Erreichen der Bruchlast. Falls die Konstruktion hingegen direkt bei beginnender Rissbildung versagt, tritt der Effekt nicht auf. [115, 116]

Erkenntnisse zum Einfluss der Bauteilgröße auf die Festigkeit bzw. zum Maßstabeffekt mit Infraleichtbeton liegen bislang nicht vor. Um zu untersuchen, ob bzw. in welchem Grad ein solcher Effekt bei ILC-Wandbauteilen im Vergleich zu kleinformatigen Prüfkörpern auftritt, wurden erste Tastversuche durchgeführt, die im folgenden Abschnitt beschrieben werden.

4.3.4.2 Experimentelle Untersuchungen

Die Prüfungen wurden an Bauteilen mit rechteckigem Querschnitt in den Maßstäben 1:6, 1:4 und 1:2 (Tabelle 4-11) im Rahmen der Arbeit von Jünke [89] durchgeführt. Verwendet wurde ein ILC700 (Rezeptur: Anhang Bild 11-5), die Dichten und Festigkeiten sind Bild 4-23 zu entnehmen. Das Verhältnis von Breite b zu Dicke d der Prüfkörper entspricht dem Faktor $b/d = 4$ und orientiert sich an der Vorgabe des EC2 [8] für Wandbauteile. Die beiden Bauteile im Maßstab 1:2 besitzen die Abmessungen der ILC-Wandbauteile und entsprechen der VR5 der Wandversuche (Kap. 4.2.1, Tabelle 4-3). Alle Bauteile besitzen die gleiche Schlankheit $h/d = 6,6$. Aufgrund der unterschiedlichen Größen war die Nutzung verschiedener Prüfmaschinen notwendig.

Tabelle 4-11: Prüfkörper der Versuchsreihe zum Maßstabseffekt, ILC700 (basierend auf [89])

Maßstab	Grundfläche bxd [cm ²]	Höhe h [cm]	Schlankheit h/d [-]	Anzahl Prüf- körper	Prüfmaschine
1:6	30x7,5	50	6,6	6	Toni Technik
1:4	45x11,3	75	6,6	3	Form+Test Prüfsystem
1:2	90x22,5	150	6,6	2	Mauerwerkspresse

Für die Druckprüfung wurden die Bauteile im Maßstab 1:2 und 1:4 jeweils in Kopf- und Fußpunkt in ein Mörtelbett gesetzt. Bei Maßstab 1:4 geschah dies für das untere Mörtelbett außerhalb der Maschine, als ebene Basis wurde eine Glasplatte genutzt. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde für die Bauteile 1:4 und 1:2 mit $0,00638 \text{ N}/(\text{mm}^2\cdot\text{s})$ so gewählt, dass die an Zylindern ermittelte Kurzzeitfestigkeit innerhalb von 30 Minuten theoretisch erreicht wird. Die Belastung der Prüfkörper 1:6 erfolgte normkonform [104] mit $0,6 \text{ N}/(\text{mm}^2\cdot\text{s})$. Aufgrund organisatorischer Schwierigkeiten konnten die Prüfungen nicht immer im Alter von 28 Tagen durchgeführt werden, zum Teil waren die Probekörper bereits 32 bzw. 35 Tage alt [89].

Während der Bauteilbetonage wurden je Betoncharge 4 Zylinder hergestellt. Entsprechend der benötigten Chargen ergaben sich damit für die Bauteile des Maßstabs 1:2 16 Zylinder, für 1:4 4 Zylinder, für 1:6 8 Zylinder. Bild 4-23 zeigt die resultierenden Prüfröhdichten und Druckfestigkeiten der Zylinder je zugehörigem Maßstab. Die Mittelwerte der Prüfröhdichten der unterschiedlichen Maßstäbe weisen mäßige Abweichungen auf, wobei die Dichte beim Maßstab 1:6 gegenüber den anderen Maßstäben abfällt. Bei den Druckfestigkeiten fällt der höhere Wert beim Maßstab 1:2 auf. Zudem bestehen teils große Schwankungen, insbesondere beim Maßstab 1:4, die in diesem Fall auf unregelmäßiges Schleifen der Zylinder zurückzuführen sind. [89]

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

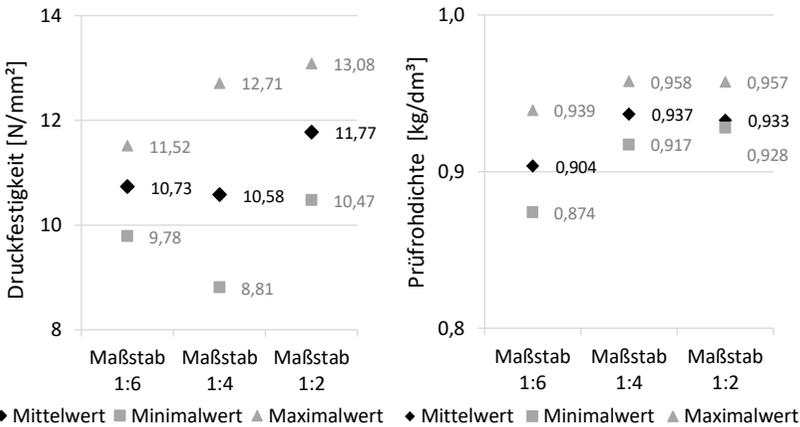


Bild 4-23: Druckfestigkeiten und Prüfrohddichten der zum jeweiligen Maßstab zugehörigen Zylinder (basierend auf [89])

In Bild 4-24 sind die Ergebnisse der Druckprüfungen an den Bauteilen der unterschiedlichen Maßstäbe dargestellt. Innerhalb einer Maßstabsgruppe sind keine allzu großen Schwankungen zu verzeichnen. Es ergibt sich jedoch nicht, wie beim Maßstabeffekt theoretisch erwartet, eine mit zunehmender Bauteilgröße abfallende Festigkeit. Die Druckfestigkeiten des Maßstabs 1:4 liegen deutlich höher als die des Maßstabs 1:6 bzw. 1:2. Zu beachten ist auch, dass hier noch nicht die unterschiedliche Prüfdauer beim Maßstab 1:6 eingeflossen ist. Würde man gemäß der Erkenntnisse aus 4.3.2 die Ergebnisse der Kurzzeitprüfung der Bauteile 1:6 mit dem Faktor $\alpha_{ilcc,30\text{min}} = 0,85$ reduzieren, würde sich ein Mittelwert von 7,43 MPa ergeben. In diesem Fall wäre auch vom Maßstab 1:6 zu 1:2 kein Festigkeitsabfall zu verzeichnen.

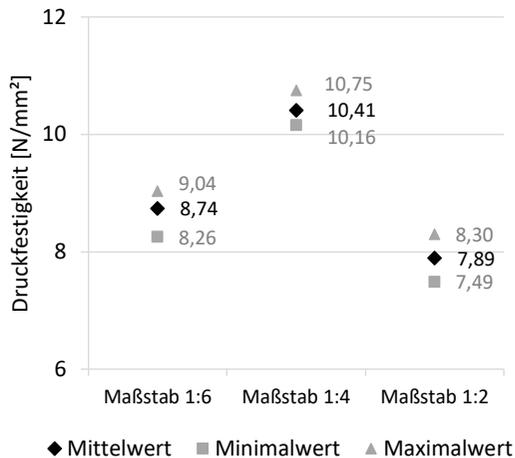


Bild 4-24: Druckfestigkeiten der Bauteile in Abhängigkeit des Maßstabs (basierend auf [89])

Anhand der vorliegenden Ergebnisse lässt sich keine Gesetzmäßigkeit ablesen. Auch im Zusammenhang mit den Prüfrohdichten und Zylinderdruckfestigkeiten sind die vorliegenden Verhältnisse der Druckfestigkeiten der unterschiedlichen Maßstäbe nicht erklärbar. Die Aussagekraft der Ergebnisse muss daher in Frage gestellt werden. Denkbar wäre, dass sich die Nutzung unterschiedlicher Prüfmaschinen je Maßstabsgruppe negativ auf die Vergleichbarkeit auswirkt. Weitere Untersuchungen mit einheitlichem Prüfaufbau, sowohl mit ILC als auch mit Normalbeton als Referenz, sind notwendig, um eine Aussage zum Maßstabseffekt treffen zu können.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Betrachtungen zur realistischen Abschätzung der Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen im Versuch wird der Maßstabseffekt aufgrund der mangelnden Aussagekraft der Ergebnisse nicht weiter berücksichtigt. Trotzdem kann das Auftreten eines Maßstabeffekts zwischen der Druckfestigkeit der Wand und der Zylinderdruckfestigkeit nicht ausgeschlossen werden.

4.3.5 Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton und genormten Probekörpern (Faktor γ_{conv})

4.3.5.1 Theoretischer Hintergrund

Die charakteristische Festigkeit von Normprobekörpern liegt ca. 15 % über der Festigkeit von eingebautem Bauwerksbeton [95]:

$$\gamma_{conv} = f_{ck}/f_{ck,in-situ} = 1,15 \quad (32)$$

Als Ursache für die Festigkeitsunterschiede werden verschiedene Bedingungen beim Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln benannt [117, 118], auch Feuchtigkeits- und Temperatureinflüsse bzw. Witterungseinflüsse können eine Rolle spielen. Der Faktor γ_{conv} ist daher für die Einschätzung einer realistischen Festigkeit im Bauteil unter Versuchsbedingungen relevant. Zylinder und ILC-Wandbauteil unterscheiden sich hinsichtlich der Abmessungen und des Volumens. Zwar werden sowohl Zylinder als auch die geprüften Wandbauteile unter Laborbedingungen hergestellt und die Lagerungsbedingungen soweit möglich angeglichen, jedoch können Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede im Inneren und einhergehende Einflüsse auf die Festigkeitsentwicklung schon aufgrund der unterschiedlichen Abmessungen nicht ausgeschlossen werden. Auch eine unterschiedliche Verdichtung kann aufgrund der Größe und der dadurch bedingten verschiedenen Einfüllvorgänge auftreten.

Der Wert $\gamma_{conv} = 1,15$ findet sich auch invers ($1/1,15 \approx 0,85$) in der Literatur wieder [117]. Der Wert 0,85 entspricht dem im EC2 [8] vorgeschlagenen Wert für den Umrechnungsfaktor η , mit dem γ_c reduziert werden darf, wenn die Betonfestigkeit am fertigen Tragwerk bzw. Bauteil bestimmt wurde. Im nationalen Anhang [119] wird dies konservativer geregelt und $\eta = 1,0$ für Ortbeton, $\eta = 0,9$ für Fertigteile gesetzt. Der empfohlene Wert 0,85 findet sich auch in der Normung zur Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und Bauwerksteilen. In der Version von 2008 der DIN EN 13791 [120] wurde noch explizit das Verhältnis der charakteristischen Druckfestigkeit von Bohrkernen aus Bauwerksbeton zur charakteristischen Druckfestigkeit von genormten Probekörpern für gefügedichte Leichtbetone mit 0,85 angegeben.

In der Normung wird also von einem Verhältnis der charakteristischen Druckfestigkeiten von Bauwerksbeton und Prüfzylinder von minimal 85 %

ausgegangen wird. Für den Beton eines konkreten Bauteils bedeutet dies, dass die Druckfestigkeit den Anforderungen genügt, solange diese mindestens 85 % der Probekörperfestigkeit beträgt. Für die erwartete Tragfähigkeit eines ILC-Wandbauteils im Versuch heißt das, dass das Bauteil die normativen Erwartungen erfüllt, wenn die Grenze von 85 % nicht unterschritten wird. Daraus kann abgeleitet werden, dass die erwartete Tragfähigkeit mit 85 % der Zylinderdruckfestigkeit berechnet werden kann, um den Nachweis ausreichender Tragfähigkeit zu erbringen. Diskussionswürdig ist jedoch, dass für ein unter Laborbedingungen hergestelltes, vergleichsweise kleines Bauteil wie den geprüften ILC-Wandbauteilen sicher weniger negative Auswirkungen zu erwarten sind als für ein unter Realbedingungen erstelltes Ortbetonbauwerk.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich das Verhältnis von 85 % auf den 5 %-Fraktilwert der Festigkeit $f_{ck,5\%} = f_{cm} - 1,645\sigma_x$ bezieht. Überträgt man das Verhältnis näherungsweise auf den Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit (siehe auch [21, 106]; Index B: Bauteil, Index cyl: Zylinder;)

$$f_{cm,B} = 0,85 \cdot f_{cm,cyl} \approx f_{cm,cyl} / \gamma_{conv} \quad (33)$$

ergibt sich ein gewisser Fehleranteil aus der Vernachlässigung des Einflusses der Standardabweichung σ_x :

$$f_{ck,B} = 0,85 \cdot f_{ck} \quad (34)$$

$$\text{bzw. } f_{cm,B} - 1,645 \cdot \sigma_{x,B} = 0,85 \cdot (f_{cm,cyl} - 1,645 \cdot \sigma_{x,cyl}) \quad (35)$$

$$\text{bzw. } f_{cm,B} = 0,85 \cdot f_{cm,cyl} - 1,398 \cdot \sigma_{x,cyl} + 1,645 \cdot \sigma_{x,B} \quad (36)$$

Unter der näherungsweisen Annahme einer gleichen Standardabweichung für Bauteil und Zylinder würde die Annahme $f_{cm,B} = 0,85 \cdot f_{cm,cyl}$ als Basis für die Bestimmung der rechnerischen Tragfähigkeit eines Wandbauteils die zu erwartende Bauteilfestigkeit demnach um den Faktor $0,25 \cdot \sigma_{x,cyl}$ unterschätzen.

Gemäß den obigen Erläuterungen zum Unterschied zwischen Bauwerksbetonfestigkeit und Zylinderdruckfestigkeit würde ein ILC-Wandbauteil die normativen Anforderungen erfüllen, wenn die erwartete Tragfähigkeit nicht unter Ansatz von $f_{cm,cyl}$, sondern unter Berücksichtigung von Gleichung (36)

bzw. bei Vernachlässigung des Einflusses der Standardabweichung näherungsweise über $f_{\text{ILCM,B}} = f_{\text{ILCM,cyl}} / \gamma_{\text{conv}}$ bestimmt wird.

Ob der durch γ_{conv} beschriebene Festigkeitsunterschied zwischen Bauwerksbeton und Zylinder in gleichem Maß auch bei ILC auftritt, wurde bislang nicht untersucht. Es stellt sich die Frage, welche Druckfestigkeit des Betons der Wandbauteile im Verhältnis zur Zylinderdruckfestigkeit tatsächlich vorliegt. Um dies zu untersuchen wurden erste Tastversuche durchgeführt, die im Folgenden geschildert werden.

4.3.5.2 Experimentelle Untersuchung

Die Druckfestigkeit von ILC-Bauteilen und ILC-Zylindern wurde im Rahmen der Arbeit von Jünke [89] anhand eines Bauteils mit $b \times d \times h = 0,6 \text{ m} \times 0,45 \text{ m} \times 0,6 \text{ m}$ und 7 Prüfzylindern verglichen. Eine Bohrkernentnahme direkt aus den in Kap. 4.2.1 beschriebenen Wandbauteilen war nicht möglich, daher wurde für diese Zwecke der o.g. Quader separat unter gleichen Herstellungs- und Lagerungsbedingungen wie die Wandbauteile hergestellt. Das Volumen des Quaders bestimmte sich dabei aus der Kapazität des zur Verfügung stehenden Zwangsmischers, da sowohl Bauteil als auch Zylinder aus der gleichen Betoncharge hergestellt wurden, um Einflüsse aufgrund unterschiedlicher Mischungen zu vermeiden. Die Dicke d wurde mit 45 cm an eine realistische Wandstärke eines ILC-Wandbauteils angelehnt. Der Quader verblieb nach der Betonage in der Holzschalung und wurde mit einer Folie abgedeckt. Die Zylinder wurden nach ca. 24 Stunden ausgeschalt und anschließend bei 95 % rel. Luftfeuchte gelagert. [89] Die Rezeptur des verwendeten ILC700 ist dem Anhang, Bild 11-5, die Dichte und Festigkeiten sind Bild 4-26 zu entnehmen.

Nach 28 Tagen wurde die Druckfestigkeitsprüfung nach DIN EN 12390-3 [104] durchgeführt. Hierzu wurden aus dem Quader einen Tag vor der Prüfung 7 Bohrkern mit $d = 150 \text{ mm}$ entnommen und auf die Höhe der Normzylinder gekürzt (vgl. Bild 4-25).



Bild 4-25: Bohrkerne und Zylinder zur Untersuchung des Druckfestigkeitsverhältnisses Bauteil/Probekörper [89]

Bild 4-26 zeigt die Ergebnisse der Druckprüfungen und die zugehörigen Prüfröhdichten. Sowohl für die separat geschaltene Zylinder als auch die Bohrkerne ergeben sich nur geringe Schwankungen in den Prüfröhdichten. Hinsichtlich der Festigkeiten sind bei den Ergebnissen der Bohrkerne etwas stärkere Schwankungen festzustellen als bei den Zylindern.

Die Mittelwerte der Festigkeit von Normzylinder und Bohrkerne sind mit 11,40 und 11,47 MPa annähernd gleich. Hier zeigt sich also kein Unterschied zwischen Bauteilbeton und Beton des separat geschaltene Prüfkörpers. Die gute Druckfestigkeit des Bauteils kann auf mehrere Umstände zurückzuführen sein. Zum einen besaß der Quader im Vergleich zu realitätsgetreuen Bauteilen insgesamt ein sehr geringes Volumen, was in der begrenzten Kapazität des Mischers begründet war. Zum anderen wurde das Bauteil in sehr geregelten Umgebungsbedingungen hergestellt, die Nachbehandlung führte zu ähnlichen Randbedingungen während der Erhärtung von Bauteil und Zylindern. Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede, wie sie bei realen Bauwerken zu erwarten sind, wurden hierdurch minimiert, Witterungseinflüsse waren ausgeschlossen.

Um den maximalen Abfall der Festigkeit von realem ILC-Bauwerksbeton auf der Baustelle gegenüber separat geschaltene Prüfkörpern zu beurteilen, sind

die hier geschilderten Ergebnisse demnach nicht geeignet. Dies wäre nur über eine hohe Anzahl empirischer Daten aus realen Bauwerksproben realisierbar. Die Ergebnisse geben andererseits auch keine Hinweise auf erhöhte negative Auswirkungen bei ILC bzw. die Notwendigkeit einer Erhöhung des Faktors $\gamma_{\text{conv}} = 1,15$. Für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wird daher zunächst die Annahme getroffen, dass auch für ILC die Abweichungen zwischen Bauwerksbeton und Prüfkörper über $\gamma_{\text{conv}} = 1,15$ ausreichend abdeckt sind. Weitere experimentelle Untersuchungen hierzu, idealerweise anhand von Bohrkernen aus in-situ Bauwerken in hoher Anzahl, sind notwendig.

Da die Herstellungs- und Lagerungsbedingungen der untersuchten ILC-Wandbauteile aus Kap. 4.2 denen des hier untersuchten Quaders gleichen, besitzen die Ergebnisse eine gewisse Aussagekraft hinsichtlich des Unterschieds zwischen Festigkeit der Wandbauteile und der separat geschalteten Prüfkörper. Es lässt sich schließen, dass hier ebenfalls nicht von einem wesentlichen Festigkeitsunterschied zwischen Wandbauteil und Zylinder auszugehen ist. Weitere experimentelle Prüfungen zur statistischen Untermauerung sind auch hier empfehlenswert.

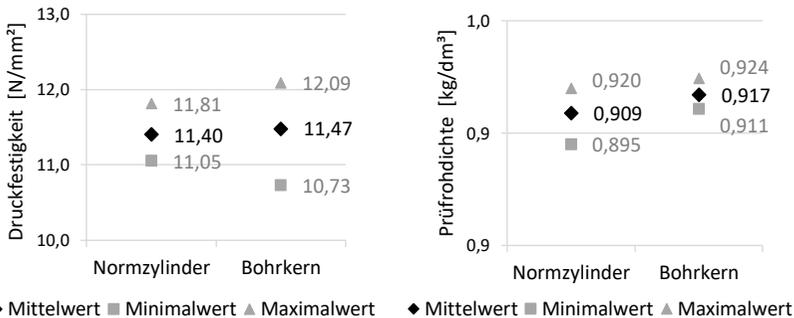


Bild 4-26: Druckfestigkeiten und Prüfröhdichten der Zylinder und Bohrkern (basierend auf [89])

4.4 Modellbildung

4.4.1 Formulierung eines Berechnungsansatzes zur maximalen Traglast im Bruchzustand

An dieser Stelle sollen die Erkenntnisse aus den Untersuchungen der verschiedenen Einflussfaktoren zusammengeführt und ein Berechnungsansatz für eine realistische Abschätzung der maximalen Traglast unter Versuchsbedingungen formuliert werden.

Aus den vorherigen Kapiteln ergeben sich zur Bestimmung der anzusetzenden Festigkeit die folgenden relevanten Faktoren:

- Dauerstandeinfluss: Bei einer Prüfdauer von 20 Minuten oder mehr ist nur mit einer Festigkeit von maximal 85 % der Kurzzeitfestigkeit zu rechnen: $\alpha_{ilcc,20min} = 0,85$.
- Schlankheit: Aufgrund der höheren Schlankheit inkl. Geometrieinflüssen ist mit einer Festigkeitsreduktion der Wandbauteile auf 81 % gegenüber der Zylinderdruckfestigkeit zu rechnen: $\eta_{ilc,sl} = 0,81$.
- Maßstabeffekt: Trotz der in der Literatur klar belegbaren Einflüsse der Bauteilgröße wird der Aspekt an dieser Stelle nicht weiter berücksichtigt, da die experimentellen Daten nicht aussagekräftig sind und die Erwartungen nicht bestätigten.
- Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton zu genormten Probekörpern: In der Annahme, dass $\gamma_{conv} = 1,15$ auch für ILC gilt, werden die normativen Anforderungen erfüllt, wenn die Tragfähigkeit unter Ansatz von

$$f_{cm,B} = 0,85 \cdot f_{cm,cyl} - 1,398 \cdot \sigma_{x,cyl} + 1,645 \cdot \sigma_{x,B}$$

ermittelt wird. Näherungsweise kann die Bauteilfestigkeit unter Vernachlässigung der Standardabweichung über

$$f_{cm,B} \approx 0,85 \cdot f_{cm,cyl} \approx \frac{f_{cm,cyl}}{\gamma_{conv}}$$

abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen deuten jedoch nicht darauf hin, dass nennenswerte Unterschiede zwischen den Druckfestigkeiten von den unter laborähnlichen Bedingungen hergestellten Wandbauteilen und Prüfzylindern vorliegen.

Unter Berücksichtigung der Faktoren $\alpha_{ilcc,20min}$ und γ_{conv} ergibt sich die hier mit $f_{ilc,e,conv}$ bezeichnete Bauteilfestigkeit unter Versuchsbedingungen (Index e: experimental) zu

$$\begin{aligned} f_{ilc,e,conv} &= \alpha_{cc,20min} \cdot \frac{f_{ilcm,cyl}}{\gamma_{conv}} \\ &= 0,85 \cdot \frac{f_{ilcm,cyl}}{1,15} = 0,74 \cdot f_{ilcm,cyl} \end{aligned} \quad (37)$$

Die Zuordnung des Einflusses der Schlankheit $\eta_{ilc,sl}$ bietet an dieser Stelle Diskussionspotential. Einerseits beinhaltet der Faktor α wie in Kap. 4.3.1 erläutert gemäß DAFStb Heft 600 [94] neben dem Dauerstandeinfluss auch deterministisch beschreibbare Unterschiede zwischen der am Probekörper ermittelten Druckfestigkeit und der Festigkeit im Bauteil. Der Einfluss der Schlankheit kann als solch ein deterministisch beschreibbarer Unterschied eingeordnet werden. Jedoch macht es beim Blick in die Literatur den Anschein, als würde der anzuwendende Wert für α hauptsächlich (bzw. ausschließlich) auf Basis der Erkenntnisse zum Dauerstand festgelegt (vgl. Kap. 4.3.2.1). Andererseits geht die Schlankheit im Rahmen der Bemessungsansätze teils separat ein, vgl. Kap. 4.1.6, z.B. Ansatz des EC2 [8] für unbewehrte Wände. Hier jedoch zielt die Berücksichtigung der Schlankheit auf den Nachweis der Tragfähigkeit hinsichtlich Knicken, nicht auf eine Reduktion der Festigkeit. Die Fragestellung, inwiefern die Festigkeitsreduktion bei schlanken Bauteilen mit $h/d > 2$ Eingang in die Bemessungsregeln findet, bedarf weiterer Untersuchungen und liegt außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Festzuhalten bleibt, dass die Thematik Normalbetone und Leicht- bzw. Infraleichtbetone gleichermaßen betrifft.

Für die hier formulierten Berechnungsansätze soll der Einfluss der Schlankheit als separater Faktor $\eta_{ilc,sl} = 0,81$ eingeführt werden. Damit ergeben sich die rechnerischen, maximalen Traglasten eines unbewehrten bzw. bewehrten Wandbauteils auf Basis von Gleichung (25) und (26) zu

Rechnerische, maximale Traglast, unbewehrt:

$$\begin{aligned}
 N_{u,cal,e,conv} &= b \cdot h_w \cdot \eta_{ilc,sl} \cdot f_{ilc,e,conv} \\
 &= b \cdot h_w \cdot \eta_{ilc,sl} \cdot \alpha_{cc,20min} \cdot \frac{f_{ilcm,cyl}}{\gamma_{conv}} \\
 &= b \cdot h_w \cdot 0,81 \cdot 0,85 \cdot \frac{f_{ilcm,cyl}}{1,15} = 0,60 \cdot b \cdot h_w \cdot f_{ilcm,cyl}
 \end{aligned} \tag{38}$$

Rechnerische, maximale Traglast, bewehrt:

$$N_{u,cal,e,conv} = 0,60 \cdot b \cdot h_w \cdot f_{ilcm,cyl} + A_s \cdot \sigma_s; \tag{39}$$

σ_s für $\epsilon_s = \epsilon_{c1}$

Die maximalen Traglasten $N_{u,cal,e,conv}$ sind als diejenigen zu verstehen, die ein Bauteil mit Schlankheit 6,7 unter Annahme von $\gamma_{conv} = 1,15$ bei einer Belastungsdauer ≥ 20 min aufweisen muss, um die Anforderungen der Norm zu erfüllen. Der Wert $N_{u,cal,e,conv}$ ist insbesondere für die Beurteilung der Anwendbarkeit der Bemessungsansätze relevant und wird im folgenden Kap. 4.4.2 weiter ausgewertet.

Geht man auf der – zur Beurteilung der Wandversuche – konservativen Seite davon aus, dass der Bauteilbeton gegenüber Zylindern keine reduzierte Festigkeit aufweist, wie es bei den experimentellen Untersuchungen aus Kap. 4.3.5.2 der Fall war, wäre $\gamma_{conv} = 1,0$ zu setzen. In diesem Fall ergeben sich höhere erwartete Traglasten, hier mit $N_{u,cal,e}$ bezeichnet:

Rechnerische, maximale Traglast, unbewehrt ($\gamma_{conv} = 1,0$):

$$\begin{aligned}
 N_{u,cal,e} &= b \cdot h_w \cdot \eta_{ilc,sl} \cdot f_{ilc,e} \\
 &= b \cdot h_w \cdot \eta_{ilc,sl} \cdot \alpha_{cc,20min} \cdot \frac{f_{ilcm,cyl}}{1,0} = 0,69 \cdot b \cdot h_w \cdot f_{ilcm,cyl}
 \end{aligned} \tag{40}$$

Rechnerische, maximale Traglast, bewehrt ($\gamma_{conv} = 1,0$):

$$N_{u,cal,e} = 0,69 \cdot b \cdot h_w \cdot f_{ilcm,cyl} + A_s \cdot \sigma_s; \quad \sigma_s \text{ für } \epsilon_s = \epsilon_{c1} \tag{41}$$

Die nachfolgende Abbildung stellt den rechnerischen Ansatz für $N_{u,cal,e}$ im Vergleich zur experimentellen Traglast $N_{u,exp}$ der ILC-Wandbauteile aus Kap. 4.2 dar. Das Verhältnis zwischen experimenteller und rechnerischer Traglast

liegt über alle Prüfkörper zwischen 49 % und 124 %, im Mittel bei 94 %. Betrachtet man die Verhältnisse ohne die Ausreißer 1.1 und 3.2 (vgl. Kap. 4.2.2) liegen die entsprechenden Werte bei 81 % und 124 %, im Mittel bei 101 %. Zu beachten ist hier allerdings, dass bei den Versuchsreihen VR1-3 noch wesentliche Mängel in der Prüftechnik vorlagen. Am meisten Aussagekraft besitzen daher die Ergebnisse der VR4-6, bei denen die experimentellen Lasten die rechnerischen Traglasten zum Teil deutlich überschreiten. Im Mittel beträgt die Auslastung bei VR4-6 109 %.

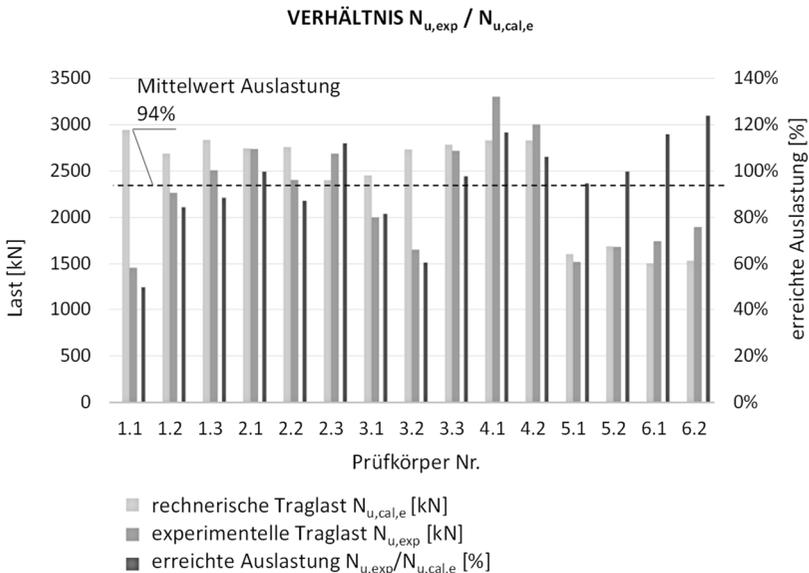


Bild 4-27: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

In den nachfolgenden Abbildungen sind die Ergebnisse nochmals getrennt für unbewehrte und bewehrte Bauteile aufgeführt. Es ergibt sich eine mittlere Auslastung der unbewehrten Wände von 90 %. Ohne Ausreißer liegen die Auslastungen zwischen 81 % und 117 %, im Mittel bei 100 %.

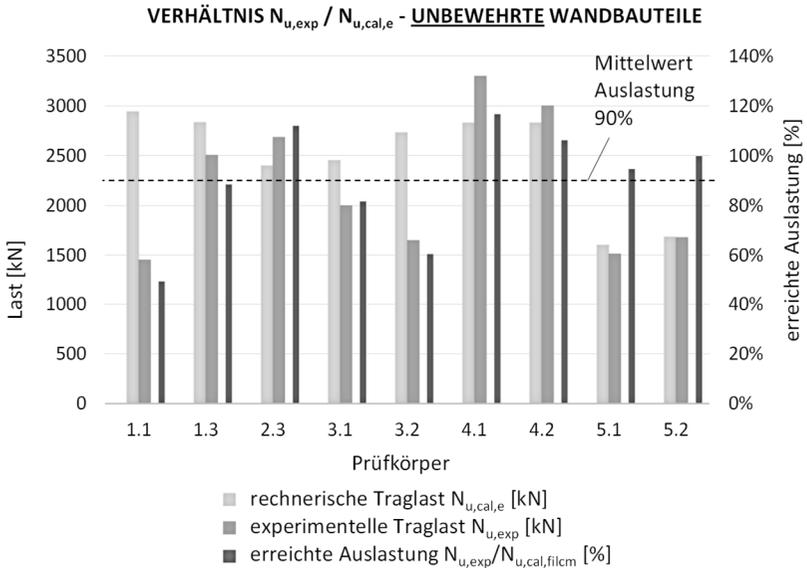


Bild 4-28: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der unbewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

Bei den bewehrten Wandbauteilen liegt das Verhältnis von $N_{u,exp} / N_{u,cal,e}$ zwischen 84 % und 124 %, der Mittelwert liegt bei 101 %. Es ist also hier kein wesentlicher Unterschied zwischen unbewehrten und bewehrten Wänden zu verzeichnen.

4 Tragfähigkeit von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung

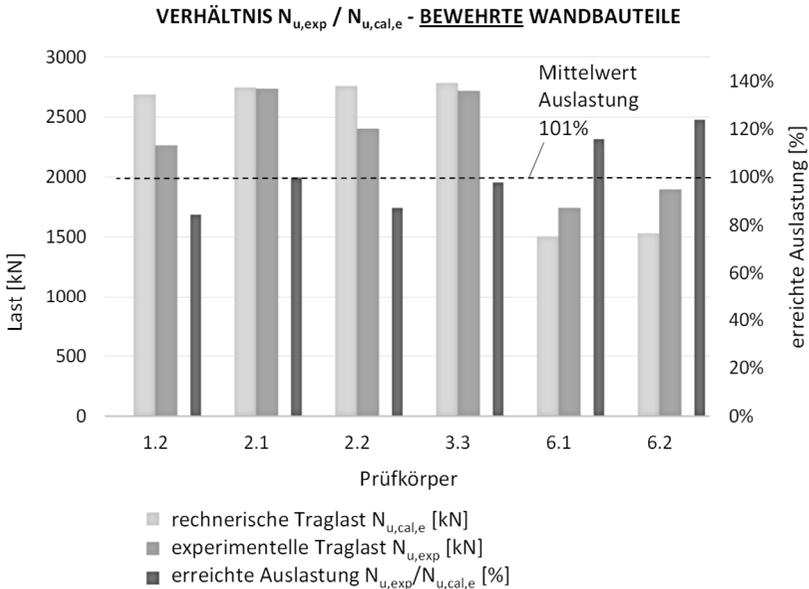


Bild 4-29: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der bewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

Insgesamt ist durch den Berechnungsansatz für $N_{u,cal,e}$ aus Gleichung (40) und (41) eine deutlich bessere Übereinstimmung zwischen rechnerischer und experimenteller Traglast zu erkennen als unter Berücksichtigung der mittleren Zylinderdruckfestigkeit ($N_{u,cal,filcm}$; vgl. Bild 4-7). Allerdings werden die Traglasten der Versuchsreihen mit größter Aussagekraft (VR4-6) unterschätzt.

4.4.2 Beurteilung der Anwendbarkeit des gewählten Bemessungsansatzes

Um die Anwendbarkeit der gewählten Bemessungsansätze nach EC2 [8] (vgl. Kap. 4.1.6) auf ILC-Wandbauteile zu beurteilen soll zunächst die als Referenz gewählte rechnerische Traglast $N_{u,cal,e,conv}$ (vgl. Gleichung (38) und (39)) kommentiert werden. Diese kann als die Traglast verstanden werden, die ein Bauteil mit Schlankheit 6,7 unter Annahme von $\gamma_{conv} = 1,15$ bei einer Belastungsdauer ≥ 20 min aufweisen muss, um den Anforderungen der Norm gerecht zu werden. In diesem Zusammenhang sind jedoch zwei Punkte zu beachten:

- Die Untersuchungen zum Verhältnis der Druckfestigkeit von Bauwerksbeton zu Prüfkörper aus Kap. 4.3.5 zeigten zwar keine Hinweise auf Unterschiede in Größenordnungen, die über $\gamma_{conv} = 1,15$ hinausgehen. Aufgrund der begrenzten Aussagekraft kann aus den Untersuchungen jedoch keine abschließende Aussage zur Gültigkeit abgeleitet werden.
- Der Eingang des Einflusses der Schlankheit auf die Festigkeit in die Normung ist nicht eindeutig (vgl. Anmerkung in Kap. 4.4.1). Dieser Sachverhalt betrifft zwar sowohl Normal- als auch Leicht- und Infraleichtbeton, jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Schlankheit je nach Betonart unterschiedlich großen Einfluss besitzt. Sollte z.B. ILC größere Festigkeitsabfälle bei hohen Schlankheiten aufweisen als Normalbeton, wäre in Bezug auf die Bemessung eventuell ein geringeres Sicherheitsniveau zu verzeichnen. Erste Referenzversuche mit Normalbeton deuteten jedoch nicht darauf hin (vgl. Kap. 4.3.3.2). Zur Untermauerung sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Der Vergleich zwischen den experimentellen Traglasten und den rechnerischen Traglasten $N_{u,cal,e,conv}$ zeigt, dass alle Bauteile mit Ausnahme der Ausreißer 1.1 und 3.2 eine Auslastung von 100 % entweder überschreiten oder in zwei Fällen geringfügig unterschreiten (1.2: 97 % bzw. 3.1: 94 %; Bild 4-30). Als Mittelwert ohne Berücksichtigung der Ausreißer ergibt sich eine Auslastung von 116 %, bei den aussagekräftigen VR4-6 von 126 %.

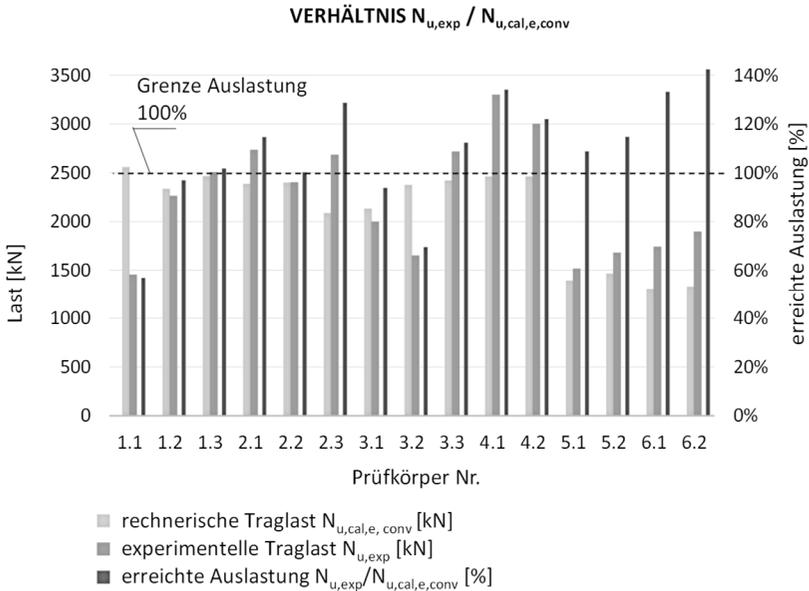


Bild 4-30: Rechnerische Traglast $N_{u,cal,e,conv}$ experimentelle Traglast $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

Wird die rechnerische Traglast $N_{u,cal,e,conv}$ als diejenige Last verstanden, die das Bauteil erreichen muss, um den Anforderungen der Norm zu genügen, so kann aus den Ergebnissen abgeleitet werden, dass im Mittel die Bauteile mit Ausnahme der Ausreißer (1.1 und 3.2) die Anforderungen der Norm erfüllen. Dies gilt, obwohl die Ergebnisse der VR1-3 noch wesentlich von Mängeln in der Prüfeinrichtung geprägt waren. In VR4-6 liegt die Auslastung teils deutlich oberhalb von 100%. Gemäß diesem Ansatz erfüllen die geprüften ILC-Wandbauteile die Anforderungen der Norm und das Bemessungskonzept kann als anwendbar beurteilt werden. Diese Aussage ist jedoch insbesondere vor dem Hintergrund der beiden o.g. Punkte zu sehen, die auf Unsicherheiten zum Einfluss des Faktors γ_{conv} und der Schlankheit eingehen. Zumindest in Bezug auf die Unsicherheit, ob tatsächlich ein über γ_{conv} erfasster Festigkeitsunterschied zwischen geprüfem Wandbauteil und Zylinder vorliegt, kann auf die Ergebnisse mit

der rechnerischen Traglast $N_{u,cal,e}$ verwiesen werden, bei der γ_{conv} nicht berücksichtigt wird. Auch hier lagen die experimentell ermittelten Traglasten der aussagekräftigen VR4-6 mit einer mittleren Auslastung von 109 % oberhalb der rechnerischen Lasten, was die Aussage der Anwendbarkeit des Bemessungsansatzes stützt.

Ergänzend zum Vergleich der experimentellen Lasten $N_{u,exp}$ mit den rechnerischen Lasten $N_{u,cal,e,conv}$ sei an dieser Stelle noch das Verhältnis aus Bemessungswiderstand N_{Rd} gemäß Gleichungen (3) und (8) und experimenteller Traglast $N_{u,exp}$ dargestellt (Bild 4-31). Im Mittel ergibt sich ein Sicherheitsniveau von 1,64, bei den aussagekräftigen VR4-6 ein Niveau von 1,90. Um diese Zahlen sinnvoll einordnen zu können, sind Referenzprüfungen an Wandbauteilen aus Normalbeton notwendig. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

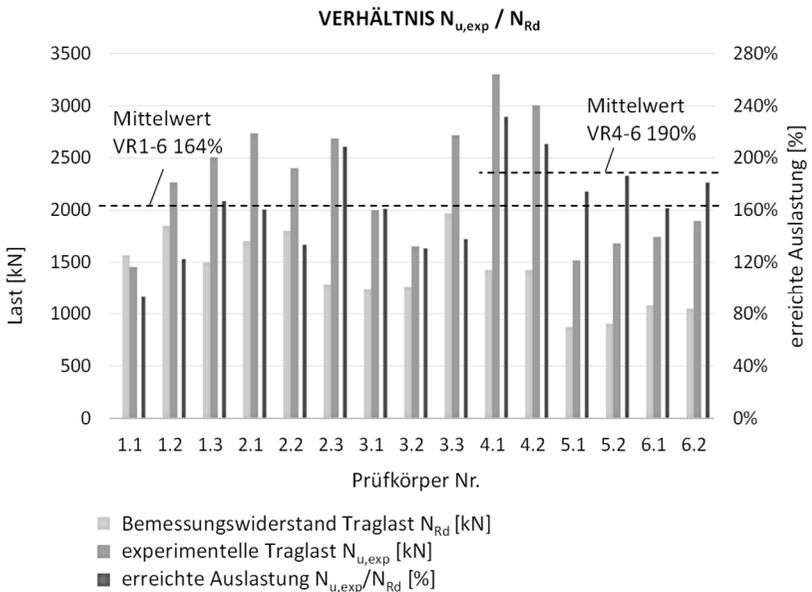


Bild 4-31: Bemessungswiderstand N_{Rd} , experimentelle Traglast $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])

4.4.3 Zwischenfazit und weiterführende Fragestellungen

Da die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen viele Erkenntnisse, aber auch viele offene Punkte mit sich bringen, sollen an dieser Stelle ein kurzes Zwischenfazit gezogen und weiterführende Fragestellungen zusammengefasst werden.

Wie die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen gezeigt haben, ist die Annahme der mittleren Zylinderdruckfestigkeit als Grundlage zur rechnerischen Ermittlung der maximalen Traglast von ILC Wandbauteilen unter Versuchsbedingungen nicht realitätsnah. Vielmehr gilt es, mehrere Einflussfaktoren zu betrachten, von denen die wichtigsten in den obigen Berechnungsansätzen in Kap. 4.4.1 erfasst wurden.

Anhand der Erkenntnisse kann gefolgert werden, dass sich aus den Prüfungen der ILC Wandbauteile unter zentrischer Druckbeanspruchungen eine nach Norm ausreichende Tragfähigkeit ableiten lässt. Die Bemessungsansätze des EC2 [8] können unter Berücksichtigung der in diesem Kapitel geschilderten getroffenen Ansätze und Annahmen als anwendbar betrachtet werden. Dementsprechend werden die Bemessungsansätze in das Bemessungskonzept im nächsten Kapitel aufgenommen.

Kritisch anzumerken ist, dass sich die Untersuchungen auf zentrische Belastungen beziehen, der Bemessungsansatz für unbewehrte Wände (vgl. Gleichung (3)) jedoch exzentrische Belastungen einschließt. Experimentelle Untersuchungen an unbewehrten Wandbauteilen unter exzentrischer Belastung liegen bislang nicht vor. An bewehrten Wandbauteilen wurden erste Prüfungen durchgeführt, die jedoch weiter zu untermauern sind (vgl. Kap. 5.3.2). Weiterführende Untersuchungen sind auch z.B. zum Maßstabeffekt bei ILC, zur Gültigkeit des Beiwerts γ_{conv} und zur Einordnung des Einflusses der Schlankheit auf die Festigkeit erforderlich, um den hier formulierten Berechnungsansatz zur maximalen Traglast zu stützen und ggf. zu ergänzen sowie die Einordnung der Anwendbarkeit des Bemessungsansatzes zu untermauern.

Ebenfalls von großer Bedeutung sind Referenzprüfungen an Normalbetonbauteilen. Wie den vorherigen Abschnitten zu entnehmen sind die beschriebenen Einflussfaktoren grundsätzlich auch für Normalbetone relevant. Die jeweiligen Ausprägungen in den einzelnen Faktoren bei Normalbeton im Vergleich zum ILC wären sehr aufschlussreich und würden

ein tiefergehendes Verständnis des Sicherheitsniveaus mit ILC durch den gewählten Bemessungsansatz erlauben.

Der weitere Forschungsbedarf, der sich aus den vorhergehenden Untersuchungen ergibt, wird in der nachfolgenden Tabelle nochmals zusammengefasst.

Tabelle 4-12: Weiterer Forschungsbedarf bzgl. der Tragfähigkeit druckbeanspruchter ILC-Wandbauteile und der Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit

Thema	Forschungsbedarf
Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen unter Druckbeanspruchung	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen unbewehrter und bewehrter Wandbauteile mit zentrischer Belastung und korrektem Prüfaufbau zur statistischen Untermauerung - Prüfungen unbewehrter Bauteile unter exzentrischer Belastung - zusätzliche Prüfungen bewehrter Bauteile mit exzentrischer Belastung (vgl. Kap. 5.3.2) - Referenzprüfungen mit Normalbeton
Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen:	
Dauerstandeffekt	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Untersuchungen in gleicher Form, für statistische Relevanz ist eine hohe Anzahl erforderlich - zusätzliche Referenzprüfungen mit Normalbeton
Bauteilschlankheit	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen analog Versuchsreihe 3 - zusätzliche Referenzprüfungen mit NB analog Versuchsreihe 3 - zusätzliche Prüfungen im Maßstab 1:1
Bauteilgröße (Maßstabeffekt)	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen mit alternativem Prüfaufbau (gleiche Maschine) - Referenzprüfungen mit Normalbeton
Druckfestigkeit Bauwerk/ Normprobekörper	<ul style="list-style-type: none"> - neue Versuchsreihe mit Bohrkernen aus in-situ Bauwerk (kein Bauteil unter Laborbedingungen) - hohe Anzahl an Prüfungen statistisch notwendig

5 Bemessungskonzept für druckbeanspruchte ILC-Wandbauteile

In diesem Abschnitt wird entsprechend der Zielstellung aus Kap. 2.5 ein Vorschlag für ein Bemessungskonzept für ILC-Wandbauteile unter Druckbeanspruchung erarbeitet. Neben der Schilderung allgemeiner Grundlagen wie Dauerhaftigkeit, Bewehrungswahl und Duktilität werden Ausgangswerte für die Bemessung erläutert. Dies beinhaltet u.a. mechanische Kennwerte, Spannungs-Dehnung-Linien, Angaben zu Kriech- und Schwindwerten und Lastannahmen zum Eigengewicht. Anschließend werden Bemessungsansätze im Grenzzustand der Tragfähigkeit formuliert, wobei die Erkenntnisse aus Kap. 4 einfließen. Abschließend werden Hinweise für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und zu Konstruktionsgrundlagen gegeben.

Die Erläuterungen in den folgenden Abschnitten stützen sich auf die Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte. Speziell die Angaben zu Materialkennwerten, zu Spannungs-Dehnungs-Linien sowie zu Riss- und Verbundverhalten basieren auf den Ergebnissen eines DFG-Forschungsprojekts (SCHL 1901/7-1), die detailliert im Rahmen der Dissertation von Hückler [19] veröffentlicht wurden.

Die Erkenntnisse zeigen, dass ILC ein für gefügedichte Leichtbetone übliches Verhalten aufweist [19]. Für Bereiche, in denen noch keine ILC-spezifischen Forschungsergebnisse vorliegen, wird daher vorgeschlagen, auf die Ansätze des EC2 [8] zurückzugreifen. Statistisch relevante Untersuchungen, ob diese Ansätze bei ILC anwendbar sind, liegen noch nicht vor. Bei einem konkreten Bauprojekt ist die Nutzung solcher Ansätze im Rahmen des Verfahrens zur Zustimmung im Einzelfall abzustimmen.

5.1 Allgemeines³

5.1.1 Dauerhaftigkeit

Beton schützt im Allgemeinen durch seine hohe Alkalität bzw. durch die sogenannte Passivierung die Bewehrung vor Korrosion. Wasser und

³ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

Kohlenstoffdioxid bewirken im Beton jedoch eine Carbonatisierung, die die Alkalität herabsetzt und je nach Betonart unterschiedlich schnell fortschreitet. Bei Normalbetonen genügen in der Regel schon wenige Zentimeter Betondeckung, um einen dauerhaften Schutz vor angreifenden Medien zu gewährleisten. Infraleichtbeton besitzt aber eine hohe Porosität, die das Eindringen von Wasser und Kohlenstoffdioxid nicht im gleichen Maße wie Normalbeton verhindert, weshalb er deutlich schneller carbonatisiert. Die Geschwindigkeit der Carbonatisierung wird über den Faktor k beschrieben und beträgt bei Normalbetonen ca. $3,5 \text{ mm/a}^{0,5}$ [121]. Prüfungen an Infraleichtbeton ergaben eine Geschwindigkeit von ca. $30 \text{ mm/a}^{0,5}$ an unbehandelten Bauteilen. Beispielhaft bedeutet dies, dass bei einer Dauer von 100 Jahren die Carbonatisierung bis in eine Tiefe von 300mm fortschreitet, d.h. eine 60cm dicke ILC-Wand wäre voll durchcarbonatisiert. An hydrophobiertem ILC zeigte sich ein reduzierter, allerdings immer noch hoher Carbonatisierungsfaktor von ca. 15 – 20 $\text{mm/a}^{0,5}$ [82, 122].

Aufgrund der hohen Carbonatisierungsgeschwindigkeit kann eine Bewehrungskorrosion während der Lebensdauer eines ILC-Bauwerks rein durch die Wahl der Betondeckung nicht verhindert werden. Die Nutzung einer korrosionsbeständigen Bewehrung ist daher notwendig.

5.1.2 Bewehrung

Als korrosionsbeständige Bewehrung kommen verschiedene Materialien in Frage (Bild 5-1). Dazu zählen nach derzeitigem Kenntnisstand z. B.

- verzinkte Stahlbewehrung,
- beschichtete Stahlbewehrung,
- nichtrostender Betonstahl (Edelstahlbewehrung),
- faserverstärkte Kunststoffe:
 - GFK-Bewehrung (glasfaserverstärkter Kunststoff),
 - Carbonbewehrung,
 - Basaltbewehrung.



Bild 5-1: Unterschiedliche Bewehrungsarten (v.l.: Betonstahl, verzinkter Betonstahl, GFK-Bewehrung; Foto: Jan-Oliver Kunze)

Dabei sind die verzinkte Stahlbewehrung, die Edelstahlbewehrung und die GFK-Bewehrung auf dem deutschen Markt am stärksten vertreten. Diese unterscheiden sich in gewissen Eigenschaften wie z. B. Gewicht und Steifigkeit, bezüglich des nachträglichen Biegens beim Einbau oder auch hinsichtlich der Kosten. Des Weiteren sind die Materialien als unterschiedlich robust bei Transport und Einbau zu bewerten. Bei verzinkten Bauteilen kann es z. B. durch Transport oder Montage zu lokalen Schädigungen des Zinküberzugs kommen, die nachzubessern sind [123]. Für GFK-Bewehrung bestehen spezielle Regelungen für Transport und Lagerung, um Schädigungen zu vermeiden [124]. All diese Faktoren sind bei der Wahl der Bewehrung im Zusammenhang mit den Randbedingungen der jeweiligen Bauaufgabe zu berücksichtigen.

Der Einsatz einer korrosionsbeständigen Bewehrung wirkt sich auch auf die Festlegung der Betondeckung aus, für die dann das Mindestmaß zur Sicherung des Verbundes maßgebend wird. Bei Leichtbetonen muss außerdem gemäß EC2 [8] die Betondeckung gegenüber Normalbeton um

5 mm erhöht werden, dieser Zuschlag sollte auch für ILC Anwendung finden.

Im Zusammenwirken von Bewehrung und Infraleichtbeton sind neben dem Verbund, der in Kap. 5.5.1 beschrieben wird, die Steifigkeitsunterschiede zu beachten. Im Stahlbetonbau unterscheidet man in der Regel den Bruttoquerschnitt, den Nettoquerschnitt und den ideellen Querschnitt. Der Bruttoquerschnitt bezeichnet einen homogenen Betonquerschnitt mit den realen äußeren Querschnittsabmessungen, der Einfluss der Bewehrung wird vernachlässigt. Der Nettoquerschnitt ergibt sich aus dem Bruttoquerschnitt abzüglich der Bewehrung und stellt damit den reinen Betonquerschnitt dar. Ideale Querschnittswerte wiederum berücksichtigen den Einfluss der Bewehrung und bilden den Verbundquerschnitt korrekt ab. Wesentlicher Faktor ist dabei das Verhältnis der Steifigkeiten von Bewehrung und Beton, welches anhand der Elastizitätsmoduln und dem resultierenden Faktor $\alpha_s = E_s / E_c$ in die Berechnungen Eingang findet.

Bei der Bemessung von stahlbewehrten Normalbeton-Querschnitten rechnet man üblicherweise zur Vereinfachung mit Bruttoquerschnitten, da der Einfluss der Steifigkeitsunterschiede gering ist. Aufgrund der niedrigen Steifigkeit von Infraleichtbeton kommt hier der Einfluss der Bewehrung jedoch deutlicher zum Tragen, weshalb die Nutzung von ideellen Querschnitten für z. B. Schwerpunkt, Flächenträgheits- und statisches Moment empfohlen wird. Detaillierte Ausführungen zu ideellen Querschnittswerten sind Zilch und Zehetmaier [88] oder Lösch und Rieseberg [1] zu entnehmen.

5.1.3 Duktilität und Versagensankündigung

Die Duktilität beschreibt das Verformungspotenzial von Bauteilen vor dem Bruch. Ein duktileres Bauteilverhalten muss nach EC2 [8] sichergestellt sein, um ein Versagen ohne Vorankündigung zu vermeiden.

Infraleichtbeton verhält sich linear elastisch bis zum Bruch und versagt spröde (vgl. Kap. 5.2.1). Trotzdem erfolgt das Versagen nicht plötzlich. Vielmehr kündigt sich das Versagen nach bisherigen Erkenntnissen bei biegebeanspruchten Bauteilen durch ein langsames Aufbrechen der Matrix in der Druckzone und bei druckbeanspruchten Wandbauteilen durch schollenartige Abplatzungen an.

Nach den Regelungen des EC2 [8] wird eine ausreichende Duktilität erreicht durch

- die Forderung einer Mindestbewehrung $A_{s,min}$,
- die Festlegung des Höchstbewehrungsgrades $A_{s,max}$ und
- bei überwiegend biegebeanspruchten Bauteilen die Begrenzung der bezogenen Druckzonenhöhe ξ_{lim} .

Für Infraleichtbeton wird vorgeschlagen, die Forderungen für Mindest- und Höchstbewehrung des EC2 [8] zu übernehmen (zur Mindestbewehrung siehe auch Kap. 5.5.2). Für die Druckzonenhöhe ξ_{lim} wird, analog zu anderen Leichtbetonen [7], eine Begrenzung auf $\xi_{lim} = x/d \leq 0,35$ (x : Druckzonenhöhe, d : statische Nutzhöhe) empfohlen. Wird diese überschritten, können weitere Maßnahmen, wie umschnürende Bügelbewehrung oder Druckbewehrung eingesetzt werden.

Diese Angaben gelten für Stahlbewehrung. Für nichtmetallische Bewehrungswerkstoffe, die kein Materialfließen aufweisen, ist eine ausreichende Versagensankündigung alternativ sicherzustellen.

5.2 Ausgangswerte für die Bemessung

5.2.1 Spannungs-Dehnungs-Linien

Infraleichtbeton ist durch ein sprödes Materialverhalten geprägt und weist kein plastisches Verformungspotenzial auf. Die Spannungs-Dehnungs-Linien verlaufen linear bis zum Bruch, der durch die mittlere Druckfestigkeit f_{ilm} und die Bruchdehnung ϵ_{ilc1} (Bild 5-2) gekennzeichnet ist.

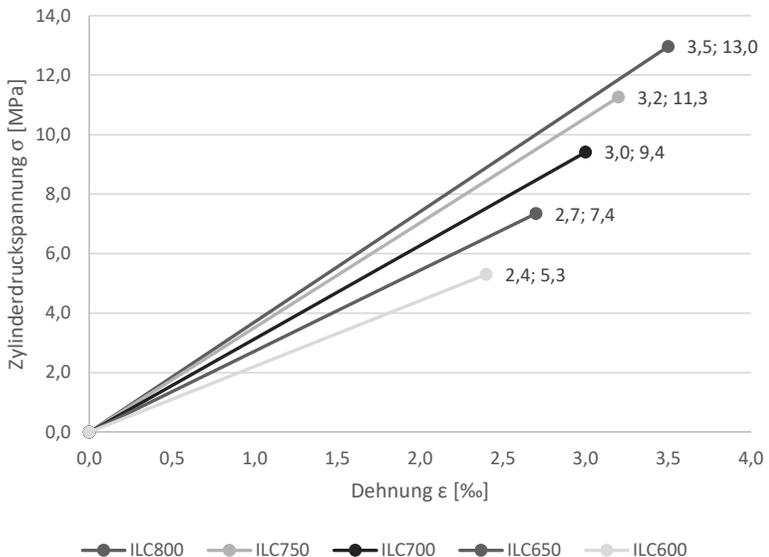


Bild 5-2: Idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linien für die Zusammensetzungen ILC600 bis ILC800 aus experimentell ermittelten mittleren Zylinderdruckfestigkeiten und Bruchdehnungen (basierend auf [1, 19])

5.2.2 Mechanische Eigenschaften

Die charakteristische Festigkeit f_{ilck} wird aus der mittleren Druckfestigkeit f_{ilcm} ermittelt. Hierzu kann nach dem Vorschlag von Hückler [19] der 5 %-Quantilwert basierend auf einer Normalverteilung verwendet werden.

Gemäß neuerer Entwicklungen wird zudem ein Mindestmaß zwischen charakteristischer und mittlerer Druckfestigkeit von 3 MPa angestrebt (vgl. Schlaich et al. [33]), was dem 5 % Quantil bei einer Standardabweichung von $s \approx 1,8$ MPa entspricht ($f_{\text{ilck}} = f_{\text{ilcm}} + u_p \cdot s$, mit $u_p = -1,645$). Der Bemessungswert der Druckfestigkeit f_{ilcd} lässt sich anschließend gemäß den Angaben aus Kap. 5.2.3 ableiten.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die wesentlichen Materialkennwerte für ILC600 bis ILC800 gemäß Tabelle 2-1.

Tabelle 5-1: Zusammenfassung der Eigenschaften von ILC gemäß den Zusammensetzungen nach Tabelle 2-1, basierend auf [1, 19]

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Experimentell ermittelte Eigenschaften (Mittelwerte; detaillierte statistische Auswertung, Prüfkörperabmessungen und -durchführung sind bei Hückler [19] dokumentiert)					
mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{\text{ilcm,cyl}}$ [MPa]	5,3	7,4	9,4	11,3	13,0
charakteristische Zylinderdruckfestigkeit f_{ilck} [MPa]*	4,0	5,0	8,0	9,0	11,0
Bemessungswert Druckfestigkeit f_{ilcd} [MPa]	2,0	2,5	4,0	4,5	5,5
Zugfestigkeit f_{ilctm} [MPa]	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87
Elastizitätsmodul E_{ilcm} [MPa]	2300	2700	3100	3500	3900
Bruchdehnung $\varepsilon_{\text{ilc1}}$ [‰]	2,4	2,7	3,0	3,2	3,5
Querkontraktionszahl**	0,2				
Wärmedehnung***	$\alpha_T = 10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (gemessen für ILC800; Bandbreite $7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bis $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)				
<p>*$f_{\text{ilck,cyl}}$ wurde von Hückler [19] als 5 %-Quantil individuell berechnet. Nach neueren Erkenntnissen sollte die charakteristische Druckfestigkeit mindestens 3 MPa unterhalb der mittleren Druckfestigkeit liegen; vgl. Kap. 5.2.2</p> <p>**Die Querkontraktionszahl wurde für ILC800 bestimmt. Da die Querdehnung offenbar nur von der Zusammensetzung der Matrix abhängt und die ILC-Klassen ähnliche Matrixeigenschaften aufweisen, kann von einer Übertragbarkeit auf ILC600 bis ILC750 ausgegangen werden [91].</p> <p>***Auch die Wärmedehnung wurde für ILC800 ermittelt; von der Übertragbarkeit auf die anderen ILC-Klassen wird zunächst ausgegangen, dies ist noch experimentell zu bestätigen.</p>					

5.2.3 Bemessungswert der charakteristischen Druckfestigkeit

Der Bemessungswert der (Zylinder-)Druckfestigkeit f_{cd} wird gemäß EC2 [8] aus der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} , einem Dauerstandbeiwert α_{cc} und einem Materialsicherheitsbeiwert γ_c ermittelt. Übertragen auf ILC ergibt sich:

$$f_{ilcd} = \alpha_{ilcc} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} \quad (42)$$

mit

f_{ilcd} : Bemessungswert Druckfestigkeit ILC

f_{ilck} : charakteristische Druckfestigkeit ILC

α_{ilcc} : Dauerstandbeiwert ILC

γ_{ilc} : Materialsicherheitsbeiwert ILC

Der Materialsicherheitsbeiwert γ_c ergibt sich für Beton allgemein aus

$$\gamma_c = \gamma_M \cdot \gamma_{conv} = 1,3 \cdot 1,15 = 1,5 \quad (43)$$

Die Faktoren γ_M und γ_{conv} sind für Normalbeton und genormten Leichtbeton identisch. In den Faktor γ_M gehen Variationskoeffizienten für Materialfestigkeit (V_f), Modellunsicherheiten (V_m) und Geometrie (V_G) ein. Für ILC ergibt sich nach den Erkenntnissen von Hückler [19] kein erhöhter Variationskoeffizient V_f für die Materialfestigkeit. Übernimmt man für ILC die Variationskoeffizienten für Geometrie und Modellunsicherheiten sowie die Formel aus der Norm ergibt sich auch hier $\gamma_M = 1,30$. Der Faktor γ_{conv} berücksichtigt Festigkeitsunterschiede zwischen Bauteil und Prüfkörper (vgl. Kap. 4.3.5). Unter Ansatz von $\gamma_{conv} = 1,15$ für ILC resultiert der gleiche Materialsicherheitsbeiwert $\gamma_{ilc} = 1,5$ für Infraleichtbeton wie für Normal- und Leichtbeton.

Leichtbeton besitzt eine geringere Dauerstandfestigkeit als Normalbeton. Dies wird im EC2 [8] durch einen Dauerstandbeiwert von $\alpha_{lcc} = 0,75$ bzw. $0,80$ anstatt $\alpha_{cc} = 0,85$ für Normalbeton berücksichtigt. Für ILC wird vorgeschlagen, den Beiwert mit $\alpha_{ilcc} = 0,75$ anzusetzen [19], was durch erste Ergebnisse experimenteller Prüfungen gestützt wird (vgl. Kap. 4.3.2.1 bzw. [103]). Der Bemessungswert der Druckfestigkeit ergibt sich somit zu

$$f_{ilcd} = \alpha_{ilcc} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} = 0,75 \cdot \frac{f_{ilck}}{1,5} = 0,5 \cdot f_{ilck} \quad (44)$$

Beim Nachweis von unbewehrten oder gering bewehrten Bauteilen (mit Bewehrungsgraden unterhalb der Mindestbewehrungsgrade) wird gemäß EC2 [8] der Dauerstandbeiwert $\alpha_{cc,pl}$ verwendet, um die geringere Duktilität zu berücksichtigen. Für Normalbeton ist dieser Wert $\alpha_{cc,pl} = 0,70$. Die Umrechnung von $\alpha_{cc} = 0,85$ auf $\alpha_{cc,pl} = 0,70$ erfolgt über die Multiplikation mit einem Duktilitätsbeiwert [95], zu dem die Autorin keine weitere Informationen finden konnte, der jedoch dem Verhältnis $\alpha_{cc,pl}/\alpha_{cc} = 0,70/0,85$ entsprechen muss. Da bislang keine Erkenntnisse zum Duktilitätsbeiwert von Infraleichtbeton vorliegen, wird vorgeschlagen, die Vorgehensweise aus dem EC2 [8] zur Bestimmung des Dauerstandbeiwerts unbewehrter ILC-Bauteile durch Multiplikation mit dem Faktor $0,7/0,85$ zu übernehmen. Es ergibt sich

$$\alpha_{ilcc,pl} = \alpha_{ilcc} \cdot 0,7/0,85 = 0,75 \cdot 0,7/0,85 = 0,62 \quad (45)$$

$$f_{ilcd,pl} = \alpha_{ilcc,pl} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} = 0,62 \cdot \frac{f_{ilck}}{1,5} = 0,41 \cdot f_{ilck} \quad (46)$$

Die Übertragung des Duktilitätsbeiwerts auf ILC muss durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden.

5.2.4 Kriechen und Schwinden⁴

Dem zeitabhängigen Betonverhalten in Form von Kriechen und Schwinden kommt bei Infraleichtbeton besondere Bedeutung zu. Im Folgenden werden Ansätze aufgezeigt, wie die Kennwerte zur Beschreibung des Kriech- und Schwindverhaltens ermittelt werden können. Die Auswirkungen des zeitabhängigen Verhaltens auf die Verformungen werden in Kap. 5.4.4 geschildert.

Kriechzahl

Die Ermittlung der Kriechzahl $\varphi(t,t_0)$ erfolgt für Normalbeton im EC2 [8] gemäß einem Formelkatalog. Die Berechnung darf für Leichtbeton analog angewendet werden, jedoch wird zusätzlich die Multiplikation mit den Faktoren η_E (Abminderung) und η_2 (Erhöhung) vorgesehen.

⁴ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

Die Kriechzahl wird in Bezug zur elastischen Anfangsverformung angewendet. Letztere ist für Leichtbetone aufgrund des geringeren E-Moduls höher als bei Normalbetonen. Die Verwendung der gleichen Kriechzahl würde daher im Vergleich zu Normalbeton zu höheren Kriechverformungen führen. Versuchsergebnisse ließen jedoch darauf schließen, dass die Kriechdehnung gefügedichter Leichtbetone für im mittleren Betonalter aufgebrachte Dauerlasten in der gleichen Größenordnung liegt wie die von Normalbetonen gleicher Festigkeit. Daher darf gemäß EC2 [8] die Kriechzahl mit η_E abgemindert werden. Der Erhöhungsfaktor η_2 berücksichtigt hingegen für Leichtbetone niedriger Festigkeitsklassen die geringere Kriechbehinderung durch die leichten Gesteinskörnungen [95].

$$\eta_E = (\rho/2200)^2 \quad (47)$$

mit ρ : Trockenrohdichte [kg/m³]

$$\eta_2 = 1,3 \text{ für } f_{tck} \leq LC16/18 \quad (48)$$

Zum Kriechverhalten von Infraleichtbeton wurden erste Tastversuche [125, 126] durchgeführt und die Ergebnisse an Biegebauteilen mit Berechnungen nach EC2 [8] abgeglichen. Dabei wurde jedoch auf die o. g. Faktoren η_E und η_2 bewusst verzichtet, da diese zur Berücksichtigung des Kriechverhaltens von Leichtbetonen dienen, die deutlich fester sind als Infraleichtbeton. Die durchgeführten Berechnungen für ILC entsprechen demnach dem Vorgehen für Normalbeton, führen jedoch aufgrund des Bezugs zur elastischen Anfangsverformung zu deutlich höheren Kriechverformungen. Die rechnerischen Vergleiche deuteten darauf hin, dass die Berechnung analog zu Normalbeton für ILC konservative Werte liefert, jedoch ist diese Annahme aufgrund der begrenzten Datenlage nicht belastbar. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, ein Verformungsmodell für ILC unter Dauerlast muss noch entwickelt werden. Im konkreten Anwendungsfall sollte das Vorgehen abgestimmt und je nach Erfordernis ggf. durch weitere Versuche im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) verifiziert werden.

Verbundkriechen

Das Verbundkriechen kann als Kriechverformung in der Verbundzone zwischen Beton und Bewehrung verstanden werden [88]. Dadurch wird die

Mitwirkung des Betons auf Zug bzw. die Zugversteifung reduziert. Die zeitabhängigen Auswirkungen können vereinfachend durch einen um $1/3$ verringerten Völligkeitsbeiwert β_t erfasst werden. Hieraus ergeben sich im EC2 [8] die Werte von $\beta_t = 0,6$ (kurzzeitige Belastung) und $\beta_t = 2/3 \cdot 0,6 = 0,4$ (langandauernde und wiederholte Belastung), die auch bei der Bestimmung der Rissbreite berücksichtigt werden.

Das Verbundkriechen von Infraleichtbeton mit Stahlbewehrung wurde experimentell untersucht. Ein Vergleich der Ergebnisse [127] mit Berechnungen nach ModelCode2010 [55] zeigte ein ähnliches Verhalten wie Normalbeton. Daher wird vorgeschlagen, die Abminderung des kurzzeitigen Völligkeitsbeiwerts um ein Drittel auch für Infraleichtbeton zu übernehmen, um das Verbundkriechen zu berücksichtigen. Der Völligkeitsbeiwert von ILC für kurzzeitige Belastungen wurde von Hückler [19] bestimmt (vgl. Kapitel zur Rissbreitenbestimmung 5.4.2).

Schwindmaß

Das Schwinden von Beton wird durch diverse Faktoren beeinflusst. Es existieren verschiedene Modelle, die zur Berechnung des Schwindmaßes herangezogen werden können, z. B. nach EC2 [8], CEB-FIP (90) [128] oder RILEM B3 (1995) [129, 130].

Zum Schwindverhalten von Infraleichtbeton wurden mehrere Tastversuche durchgeführt, die Werte für das Endschwindmaß nach einhundert Tagen von ca. $1,0 \text{ mm/m}$ bei ILC600 [76] und ca. $1,5 \text{ mm/m}$ bei ILC800 [131] lieferten. Dabei waren nach zwei Wochen bereits ca. 80 % des Schwindmaßes nach 100 Tagen erreicht. Die Ergebnisse wurden mit Berechnungen nach verschiedenen Modellen verglichen. Dabei zeigte sich, dass das Modell nach EC2 [8] die Schwindmaße der Infraleichtbetonzusammensetzungen nach Tabelle 2-1 unterschätzt. Die bislang besten Übereinstimmungen ergaben sich bei den Ansätzen des RILEM B3-Modells, jedoch unterschätzt auch dieses immer noch die experimentell ermittelten Schwindmaße [131].

Daher wird an dieser Stelle empfohlen, für ein konkretes Bauprojekt das Schwindmaß im Rahmen der Prüfungen für die Zustimmung im Einzelfall experimentell zu bestimmen. Für eine erste Einschätzung der Größenordnung des Schwindverhaltens können die oben genannten Werte als Anhaltspunkt dienen.

5.2.5 Lastannahmen – Eigengewicht ILC⁵

Das anzusetzende Eigenwicht für Infraleichtbeton ergibt sich aus der Trockenrohddichte und einem Zuschlag für Feuchtegehalt unter normalen klimatischen Randbedingungen sowie einem Zuschlag für Bewehrung.

Der Feuchtegehalt bei 23°C, 80 % Luftfeuchtigkeit ist gemäß DIN EN ISO 10456 [58] für Leichtbeton mit Blähton mit $u = 0,03 \text{ kg/kg}$ anzusetzen. Bei ILC mit einer Trockenrohddichte von 800 kg/m^3 würde ein Zuschlag von 24 kg/m^3 resultieren. Der EC2 [8] wiederum gibt für Leichtbeton eine Bemessungsdichte vor, die um 50 kg/m^3 höher liegt als die Trockenrohddichte [8]. Da dies gegenüber dem Zuschlag aus dem Feuchtegehalt konservativ ist, wird die Erhöhung um 50 kg/m^3 für ILC übernommen. Analog wird der Zuschlag für Stahlbewehrung von 1 kN/m^3 für bewehrten Leichtbeton in Anlehnung an EC2 [8] angesetzt (zum Vergleich: eine kreuzweise Stahlbewehrung mit Durchmesser 12 mm alle 10cm je Wandseite bei einer 50cm dicken Wand entspricht einer Gewichtskraft von ca. $0,7 \text{ kN/m}^3$). Die Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Lastannahmen zum Eigengewicht der ILC-Klassen [1]

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Trockenrohddichte ρ_{tr} [kg/m ³]	≤ 600	≤ 650	≤ 700	≤ 750	≤ 800
Zuschlag für Bemessungswichte [kg/m ³]	50	50	50	50	50
Wichte ILC unbewehrt (aufgerundet) [kN/m ³]	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
Zuschlag Stahlbewehrung [kN/m ³]	1	1	1	1	1
Wichte ILC Stahl-bewehrt [kN/m ³]	7,5	8	8,5	9	9,5

⁵ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

5.3 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Außenwände aus Infralichtbeton werden hauptsächlich für die Ableitung vertikaler Lasten herangezogen. Abhängig von der Lagerung und der Lasteinleitung entstehen dabei unterschiedliche Kraftflüsse und Bemessungssituationen. Bei einer gleichmäßigen und vollflächigen Lagerung und Belastung eines Wandbauteils wird ein gleichmäßiger Kraftfluss (B-Bereich) erzeugt. Die Bemessung von solchen Bereichen wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Bereiche mit ungleichmäßigen, konzentrierten Belastungen können z.B. entstehen, wenn Lasten ungleichmäßig eingeleitet werden (z.B. durch ausmittig aufliegende Geschossdecken) oder die Lagerung unregelmäßig erfolgt. Weitere Gründe für solche Diskontinuitätsbereiche (D-Bereiche) können geometrische Aspekte wie z.B. Fensterausparungen oder Ecken sein. D-Bereiche können nach der Theorie der Stabwerkmodelle bemessen und konstruktiv ausgebildet werden. Auch bei Infralichtbeton ist die Anwendung von Stabwerkmodellen grundsätzlich denkbar, weiterführende Untersuchungen stehen jedoch noch aus (vgl. auch Kap. 2.3).

Bei B-Bereichen sind verschiedene Nachweisführungen möglich, die abhängig von der jeweiligen Belastungssituation zu wählen sind. ILC-Wände werden normalerweise so bemessen, dass die Lastableitung nur durch den Beton geleistet werden kann, auf den planmäßigen Einsatz einer Druckbewehrung wird verzichtet. Dementsprechend liegt eine Bemessung in Anlehnung an das Verfahren des EC2 [8] für unbewehrte Wandbauteile nahe. Unabhängig hiervon ist eine konstruktive Oberflächenbewehrung jedoch immer vorzusehen und unter Berücksichtigung der geforderten maximalen Rissbreiten festzulegen. Falls beim Nachweis für unbewehrte Bauteile nur eine unzureichende Tragfähigkeit resultiert, ist eine Bemessung in Anlehnung an die Nachweisführung für bewehrte Bauteile sinnvoll. Bei einer ausmittigen Lasteinleitung kann dies einen Nachweis für Interaktion von Normalkraft und Biegung erfordern.

Im Folgenden wird zunächst die Bemessung von unbewehrten Betonwänden unter Normalkraft mit kleiner Ausmitte erläutert und anschließend auf die Bemessung von bewehrten Wandbauteilen im Hinblick auf Interaktion von Normalkraft und Biegung kurz eingegangen. Eine Bemessung auf vorwiegend Biegung und Querkraft ist für

Wandbauteile weniger relevant und nicht Teil der vorliegenden Arbeit. Informationen hierzu sind bei Schlaich et al. [33] und Hückler und Schlaich [20] zu finden.

5.3.1 Unbewehrte Wandbauteile - Normalkraft mit Ausmitte

Der Bemessungsansatz für unbewehrte Druckglieder nach EC2 [8] wurde bereits in Kap. 4.1.1.1 geschildert. Anhand der Ergebnisse der Untersuchungen zur Tragfähigkeit ließ sich ableiten, dass die geprüften ILC Wandbauteile bei Beachtung der Einflussfaktoren im Mittel eine nach Norm ausreichende Tragfähigkeit aufweisen. Dementsprechend kann der unten aufgeführte Bemessungsansatz nach EC2 [8] unter Berücksichtigung der in Kap. 4 geschilderten getroffenen Ansätze und Annahmen als anwendbar betrachtet und für die Bemessung von ILC-Wandbauteilen herangezogen werden (vgl. Kap. 4.4.2). Kritisch anzumerken ist, dass die Untersuchungen auf zentrischen Belastungen beruhen, der Bemessungsansatz jedoch exzentrische Belastungen einschließt. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen notwendig.

Gemäß EC2 [8] sind unbewehrte Bauteile immer als schlanke Bauteile zu betrachten. Dabei ist ein Verzicht auf eine Untersuchung am verformten System bei $\lambda \leq 8,6$ gestattet, die größte zulässige Schlankheit beträgt $\lambda \leq 86$ [61]. Infraleichtbeton-Wände werden sich in der Regel immer im Bereich $8,6 \leq \lambda \leq 86$ bewegen. Nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren, zulässig für Bauteile in unverschieblich ausgesteiften Tragwerken, ergibt sich die aufnehmbare Längskraft $N_{Rd,\lambda}$ zu:

$$N_{Rd,\lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{ilcd,pl} \cdot \phi \quad (49)$$

mit

b/h_w : Breite/ Gesamtdicke des Querschnitts
 $f_{ilcd,pl}$: Bemessungsdruckfestigkeit des unbewehrten Querschnitts; $f_{ilcd,pl} = \alpha_{ilcc,pl} \cdot f_{ücc} / \gamma_c$
 $\alpha_{ilcc,pl} = 0,62$ (Dauerstandbeiwert für unbewehrte Querschnitte (vgl. Kap. 5.2.3)

Faktor ϕ :

$$\phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{tot}/h_w) - 0,02 \cdot l_0/h_w \leq 1 - 2 \cdot e_{tot}/h_w \quad (50)$$

mit

l_0 : Knicklänge des Bauteils

e_{tot} : Gesamtausmitte; $e_{tot} = e_0 + e_i$; $e_{tot}/h_w < 0,4$

e_0 : Lastausmitte nach Theorie I. Ordnung;

e_i : ungewollte zusätzliche Lastausmitte infolge geometrischer Imperfektionen

Auch bei der Bemessung als unbewehrtes Bauteil sollte für eine ILC-Wand immer eine konstruktive Oberflächenbewehrung vorgesehen und hinsichtlich der erforderlichen Rissbreitenbegrenzung und Vorgaben zur Mindestbewehrung (Kap. 5.4.2, Kap. 5.5.2) ausgelegt werden.

5.3.2 Bewehrte Wandbauteile - Interaktion von Normalkraft und Biegung

Falls die Bemessung eines ILC-Wandbauteils als unbewehrter Querschnitt keine ausreichende Tragfähigkeit ergeben sollte, kann ein Nachweis für bewehrte Querschnitte erfolgen. In Kap. 4.1.1.2 wurde für eine zentrische Druckbelastung der folgende Ansatz nach EC2 [8] erläutert und anhand der Untersuchungen zur Tragfähigkeit in Kap. 4 unter Berücksichtigung der dort geschilderten getroffenen Ansätze und Annahmen als anwendbar bewertet. Der Tragwiderstand N_{Rd} ergibt sich zu

$$N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \sigma_{sd} \quad (51)$$

mit

A_c : Querschnittsfläche Beton

f_{cd} : Bemessungsdruckfestigkeit Beton

A_s : Querschnittsfläche Stahlbewehrung

σ_{sd} : Spannung Stahlbewehrung, zu ermitteln aus der Stahlkennlinie für $\epsilon_s = \epsilon_{c2}$ (in der Regel ist $\epsilon_{c2} > 2,174\%$ und damit $\sigma_{sd} = f_{yd}$)

Im realen Anwendungsfall mit ILC wird jedoch gerade bei lastabtragenden Außenwänden mit einbindenden Geschossdecken häufig eine ausmittige Lasteinleitung stattfinden, so dass statt einer zentrischen Druckbelastung eine Interaktion von Normalkraft und Biegung vorliegt. Ein Nachweis auf Stabilitätsversagen eines schlanken Bauteils (nach Faust [7]) wäre für

Leichtbetone hierfür das Modellstützenverfahren anwendbar) wird dabei in der Regel wenig relevant sein, da ILC-Wände aufgrund der großen Wanddicken in Kombination mit üblichen Geschosshöhen vorrangig gedrungene Bauteile darstellen.

Die Bemessung von überwiegend auf Normalkraft beanspruchten, bewehrten Biegebauteilen erfolgt über die Herstellung des Gleichgewichts der inneren und äußeren Schnittkräfte, wozu die Dehnungsverteilung zu ermitteln und die Bewehrungsmenge entsprechend zu wählen ist (vgl. Bild 4-2). Häufig werden als Hilfsmittel Interaktionsdiagramme verwendet, die jedoch von Materialparametern, u.a. der Spannungs-Dehnungs-Linie, abhängig sind. Faust [7] hat für Leichtbetone Interaktionsdiagramme erarbeitet, die jedoch aufgrund der abweichenden Spannung-Dehnungs-Linien nicht auf ILC übertragbar sind. Zur Bemessung von ILC sollten daher individuelle Interaktionsdiagramme z.B. über entsprechende Software erstellt werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass ILC aufgrund des linear-elastischen Verhaltens bei zentrischer Druckbelastung im Gegensatz zu Normalbeton (Begrenzung der Dehnung auf 2,0 ‰ bzw. 2,2 ‰) bis zur Bruchdehnung ausgenutzt werden kann.

Erste Untersuchungen zum Tragverhalten von stahlbewehrten ILC-Wandbauteilen bei Interaktion von Normalkraft und Biegung wurden bereits durchgeführt [90]. Dabei wurden die Tragfähigkeiten über individuell erstellte Interaktionsdiagramme rechnerisch ermittelt, wobei die Grenzdehnung gleich der Bruchdehnung gesetzt wurde. Anschließend wurden Wandbauteile experimentell in Anlehnung an DIN EN 1740 [132] geprüft. Betrachtet wurden dabei sowohl Belastungen mit zwei unterschiedlichen Exzentrizitäten sowie eine zentrische Druckbelastung. Es zeigte sich, dass die Interaktionsdiagramme die experimentellen Ergebnisse gut widerspiegeln und die maximalen Traglasten ausreichende Sicherheiten zu den Bemessungswiderständen aufwiesen [90]. Weiterführende Untersuchungen zur Untermauerung der Erkenntnisse sind notwendig.

5.4 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit⁶

Für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die im EC2 [8] beschriebenen Verfahren herangezogen. Zu den Kriterien gehören

- die Begrenzung der Spannungen,
- die Begrenzung der Rissbreiten und
- die Begrenzung der Verformungen.

5.4.1 Begrenzung der Spannungen

Die Betondruckspannungen werden gemäß EC2 [8] begrenzt, um Längsrisse, Mikrorisse oder starkes Kriechen zu vermeiden, falls diese zu Beeinträchtigungen der Funktion des Tragwerks führen können. Bis zu einer Betondruckspannung unter quasi-ständiger Einwirkungskombination von $0,45 f_{ck}$ darf von linearem Kriechen ausgegangen werden, darüber muss in der Regel nichtlineares Kriechen berücksichtigt werden.

Nach Faust [7] ist für Leichtbeton gegenüber Normalbeton keine Änderung der Ansätze notwendig. Experimentelle Untersuchungen von Zareef [17] mit Infraleichtbeton lassen ebenfalls darauf schließen, dass bei $0,45 f_{ck}$ kein nichtlineares Kriechen auftritt. Daher wird vorgeschlagen, die Spannungsbegrenzung unter der quasi-ständigen Lastfallkombination auf

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ilck} \quad (52)$$

gemäß EC2 [8] für ILC zu übernehmen. Gleiches gilt sinngemäß für die Spannungsbegrenzung für die seltene Kombination. Die im EC2 [8] genannten Begrenzungen der Stahlspannungen unter Last und Zwang bleiben unberührt und sind ebenfalls zu berücksichtigen.

5.4.2 Rissbreitenbegrenzung und Mindestbewehrung

Anforderung

Die Begrenzung der Rissbreite dient dazu, die Einhaltung der Anforderungen an eine ordnungsgemäße Nutzung des Tragwerks, das

⁶ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

Erscheinungsbild und die Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Der EC2 [8] gibt für Stahlbeton maximale Rissbreiten in Abhängigkeit der Expositionsklassen vor, um die Dauerhaftigkeit und ein akzeptables Erscheinungsbild zu garantieren.

Infraleichtbeton wird als Außenbauteil mit direkter Berechnung eingesetzt und wäre dementsprechend der Expositionsklasse XC4 zuzuordnen. Da nach aktuellem Stand jedoch eine korrosionsbeständige Bewehrung empfohlen wird, besteht kein Korrosionsrisiko. Unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit würde dies gemäß EC2 [8] eine maximale Rissbreite von 0,4 mm ermöglichen.

In Bezug auf das Erscheinungsbild bestehen für den Sichtbeton ILC erhöhte Anforderungen. Eine klare Regelung, welche Rissbreiten zum Erreichen einer gewünschten Sichtbetonqualität einzuhalten sind, gibt es bislang nicht. Vielmehr wird dies bei der Ausschreibung eines Bauprojektes individuell festgelegt.

Berechnung der Rissbreite

Die durch Hückler [19] durchgeführten Stabzug- und Balkenversuche mit Infraleichtbeton zeigten ein günstiges Rissverhalten, gekennzeichnet durch gleichmäßige Rissverteilung mit geringen Rissabständen und -breiten. Die Berechnungsmethoden gemäß EC2 [8] zur Bestimmung der Rissbreite liefern realitätsnahe, leicht konservative Ergebnisse und können somit angewendet werden. Die Berechnung der Rissbreite w_k erfolgt allgemein mit Stahlbewehrung (mit GFK-Bewehrung siehe [124]) für alle Rissbildungsstadien gemäß folgender Gleichung:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (53)$$

mit

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \rho_{i,eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (54)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \beta_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot \rho_{i,eff}} \cdot (1 + \alpha_s \cdot \rho_{i,eff}) \geq \frac{0,6 \cdot \sigma_s}{E_s} \quad (55)$$

mit $\rho_{i,eff} = \frac{A_s}{A_{i,eff}}$; (Bewehrungsgrad bezogen auf den ideellen Wirkungsbereich der Bewehrung)

Sowohl für die Berechnung der Rissbreite als auch der Mindestbewehrung wird Bezug auf den effektiven Wirkungsbereich der Bewehrung genommen. An dieser Stelle ist darauf zu achten, für ILC die ideellen Querschnittswerte zu verwenden und auch beim Wirkungsbereich der Bewehrung deren Einfluss durch ideale Querschnittswerte zu berücksichtigen (vgl. Kap. 5.1.2).

Der Faktor β_t wurde durch Hückler [19] für kurzfristige Lasteinwirkung zu $0,8 > \beta_t > 0$ (Stahl) bzw. $0,8$ (GFK) bestimmt. Für langandauernde und wiederholte Belastungen sind Einflüsse aus Verbundkriechen zu berücksichtigen. Es wird daher vorgeschlagen, die Reduktion des Völligkeitsbeiwerts um ein Drittel auch für ILC zu übernehmen (vgl. Kap. 5.2.4), daraus ergibt sich ein Grenzwert von $\beta_t = 0,5$ für langfristige Belastungen. Aufgrund der Annahme einer idealisierten, bilinearen Spannungs-Dehnungslinie des Betonstahls wird der Völligkeitsbeiwert zur Abschätzung der Verformungen ebenfalls idealisiert in die nachfolgend aufgeführten Bereiche unterteilt. Die oberen und unteren Grenzwerte $\beta_t = 0,5$ und $\beta_t = 0,0$ stellen dabei konservative Vereinfachungen dar. Bei GFK-Bewehrung kann der Völligkeitsbeiwert aufgrund des linearen Materialverhaltens konstant angesetzt werden.

Tabelle 5-3: Völligkeitsbeiwert β_t von Infraleichtbeton bei langfristiger Einwirkung für Stahl- und GFK-Bewehrung ([33], basierend auf [1, 19])

	Stahlbewehrung, langfristige Einwirkung	GFK-Bewehrung, langfristige Einwirkung
$\sigma_{sr} \leq \sigma_s \leq \sigma_{sr;0,95}$:	$\beta_t = 0,5$	$\beta_t = 0,5$
$\sigma_{sr;0,095} \leq \sigma_s \leq f_y$:	$\beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s - \sigma_{sr;0,95}}{f_y - \sigma_{sr;0,95}}\right)$	
$\sigma_s \geq f_y$:	$\beta_t = 0,0$	

mit: β_t : Völligkeitsbeiwert; σ_s : Stahlspannung; σ_{sr} : Stahlspannung bei Erstrissbildung; $\sigma_{sr;0,95}$: Stahlspannung bei abgeschlossener Rissbildung; f_y : Streckgrenze Stahlbewehrung

Mindestbewehrung

Zur Aufnahme von Zwangseinwirkungen und Eigenspannungen, z. B. durch abfließende Hydratationswärme oder Schwinden, ist eine Mindestbewehrung anzuordnen, die in der Regel für die Risschnittgrößen zu bemessen ist und die Anforderungen an die Rissbreitenbegrenzung berücksichtigt. Bei Stahlbetonbauteilen darf die Mindestbewehrung reduziert werden, wenn die Zwangsschnittgröße die Risschnittgröße nicht erreicht [61].

Für Infraleichtbetonbauteile liegen bislang noch begrenzte praktische Erfahrungen im Hinblick auf Rissbildung aus Zwangseinwirkungen wie z. B. Schwinden vor. Beim Einfamilienhaus in Berlin aus dem Jahr 2007 beispielsweise wurde als Flächenbewehrung GFK-Bewehrung mit einem Durchmesser von 8 mm im Abstand von 15 cm kreuzweise verlegt und damit die Rissbildung erfolgreich begrenzt [2].

Da ILC eine erhöhte Schwindneigung und eine geringe Zugfestigkeit aufweist, ist prinzipiell davon auszugehen, dass die Zwangsspannungen die Risschnittgröße erreichen, wenn sich der volle Zwang aufbauen kann. Auf der sicheren Seite wird daher vorgeschlagen, für ILC die Risschnittgröße als Grundlage der Bestimmung der Mindestbewehrung unter Berücksichtigung der Rissbreitenbegrenzung anzusetzen. Dabei ergibt sich die erforderliche Bewehrungsmenge hauptsächlich aus der geforderten Rissbreite. Da in ILC korrosionsbeständige Bewehrung verwendet wird, kann ggf. Bewehrung eingespart werden, falls unter ästhetischen Gesichtspunkten eine größere Rissbreite akzeptabel ist.

Ob und inwieweit sich Zwang bei Bauten mit ILC aufbauen kann, hängt von der jeweiligen Konstruktion ab. Ein Grund für Zwangsspannungen kann die Betonage einer ILC-Wand auf fertiggestellten Fundamenten sein. DAfStb-Heft 466 [133] beschäftigt sich mit dieser Thematik für Normalbetonwände. Der Aufbau der Zwangskraft ist demnach deutlich vom Verhältnis Wandlänge l zu Wandhöhe h abhängig [133]. Sinnvoll erscheint es daher, je nach Anwendungsfall für ILC-Bauwerke das Verhältnis l/h in Anlehnung an Heft 466 durch Anordnung entsprechender Dehnungsfugen zu beschränken. Des Weiteren könnte für eine wirtschaftlichere Herangehensweise in Betracht gezogen werden, ILC-Wandbereiche gemäß DAfStb Heft 466 [133] zu identifizieren, bei denen

eine Reduzierung der Mindestbewehrung möglich ist. Dies sollte durch experimentelle Untersuchungen verifiziert werden.

Da Infraleichtbetonwände mit relativ großen Wanddicken einhergehen, empfiehlt es sich, bei zentrischem Zwang die Mindestbewehrung unter Berücksichtigung einer effektiven Randzone zu ermitteln (zentrischer Zwang bei dicken Bauteilen, siehe EC2 und Nationaler Anhang [8, 119]). Die Verwendung ideeller Querschnitte für ILC ist bei dem hier vorgestellten Ansatz zur Mindestbewehrung für zentrischen Zwang bei dickeren Bauteilen wie auch bei der Rissbreitenbegrenzung zu beachten. Weitere Details sind Lösch und Rieseberg [1] zu entnehmen.

Entscheidend für die Berechnung der Rissbreite wie auch für die Mindestbewehrung ist die effektive Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$, die zum Zeitpunkt der Rissbildung herrscht. Wenn Zwang z. B. infolge abfließender Hydratationswärme entsteht, kann die Rissbildung bereits nach drei bis fünf Tagen auftreten. In diesem Fall darf $f_{ct,eff}$ mit 50 % der mittleren Zugfestigkeit nach 28 Tagen angesetzt werden [61].

Für Infraleichtbeton wird vorgeschlagen, eine solche Abminderung nicht vorzunehmen, sondern für $f_{ct,eff}$ die volle, experimentell ermittelte mittlere Zugfestigkeit nach 28 Tagen anzusetzen, um einen ggf. auftretenden späten Zwang aus Schwinden abzudecken. Früher Zwang aus abfließender Hydratationswärme wäre hierdurch ebenfalls erfasst, ist aber ohnehin durch geeignete Nachbehandlungsverfahren möglichst zu vermeiden (vgl. auch Kap. 3.2.3).

5.4.3 Begrenzung der Verformungen

Stauchung von vorwiegend druckbelasteten Bauteilen

In der Praxis sind die Anforderungen hinsichtlich der Begrenzung der Durchbiegung bzw. des Durchhangs von Biegebauteilen bekannt; die Begrenzung von vertikalen Verformungen von Wandbauteilen ist weitaus weniger alltägliche Praxis. Da diese jedoch bei ILC durch die geringe Steifigkeit in Kombination mit dem Kriech- und Schwindverhalten ggf. Größenordnungen annimmt, die es zu berücksichtigen gilt, soll hier kurz ein Anhaltspunkt für mögliche Anforderungen gegeben werden.

Grundsätzlich gilt nach EC2 [8], dass »die Verformung eines Bauteils oder eines Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild des Bauteils beeinträchtigen dürfen« [8]. Grenzwerte sind in Abhängigkeit der Art des Tragwerks, des Ausbaus usw. festzulegen. Für vertikale Wandbauteile bietet der EC2 [8] keine Empfehlung für Grenzwerte an. ISO 4356 [134], auf der die Angaben zur Durchbiegung des EC2 [8] beruhen, benennt für vertikale Verformungen je nach Situation unterschiedliche Grenzwerte. Für Verformungen vertikaler Bauteile, die Schäden an anderen Bauteilen hervorrufen können, wird an Auflagerpunkten von Decken und Dächern ein Grenzwert von Geschosshöhe/100 empfohlen [134]. Werden zu große Verformungen erwartet, sind diese durch Überhöhungen zu kompensieren.

Zur Berechnung der Stauchung von vorwiegend druckbeanspruchten, bewehrten Betonbauteilen geht man davon aus, dass Beton und Bewehrung im Verbund liegen, d. h. die Stauchungen von Beton ε_{ilc} und Bewehrung ε_s gleich sind:

$$\varepsilon_{ilc} = \varepsilon_s \quad (56)$$

Darauf basierend ergibt sich die Aufteilung der Last N auf Beton und Stahlbewehrung gemäß Zilch und Zehetmaier [88] zu

$$F_{ilc} = \varepsilon_{ilc} \cdot E_{ilc} \cdot A_n = N \cdot \frac{A_n}{A_i} \quad (57)$$

$$F_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = N \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_s}{A_i} \quad (58)$$

beziehungsweise die Stauchung des Betons zu

$$\varepsilon_{ilc} = \frac{N}{E_{ilc} A_i} \quad (59)$$

mit

F_{ilc} : Lastanteil ILC

F_s : Lastanteil Stahlbewehrung

ε_{ilc} : Dehnung ILC

ε_s : Dehnung Stahlbewehrung

E_{ilc} : Elastizitätsmodul ILC

E_s : Elastizitätsmodul Stahlbewehrung

$A_n = A_c - A_s$; Nettoquerschnittsfläche ILC

A_s : Querschnittsfläche Stahlbewehrung

A_c : Bruttoquerschnittsfläche ILC

$A_i = A_c + (\alpha_s - 1) \cdot A_s$; ideale Querschnittsfläche

$\alpha_s = E_s / E_{ilc}$

Die Angaben beziehen sich auf Stahlbewehrung (zur Verformungsberechnung mit GFK-Bewehrung siehe Lösch und Rieseberg [1]; insbesondere entfällt hier der Bewehrungsanteil, da GFK nicht als Druckbewehrung angesetzt werden darf).

Die Einflüsse von Kriechen und Schwinden sind zu beachten (vgl. Kap. 5.4.4).

Durchbiegungen

Die Begrenzung der Durchbiegung ist für ILC-Wandbauteile, die im Praxisfall vorwiegend vertikal und nur mit geringer Ausmitte belastet sind, weniger relevant und nicht Teil der vorliegenden Arbeit, weshalb hier nur kurz darauf eingegangen werden soll. Zur Begrenzung der Durchbiegung von ILC-Biegebauteilen ist die direkte Bestimmung der M- κ -Linie und anschließende Ermittlung der Durchbiegung über die Krümmung zu bevorzugen. Die wirksamen M- κ -Linien von biegebeanspruchten ILC-Balken mit Stahlbewehrung und GFK-Bewehrung sind bei Hückler [19] zu finden.

Die Einflüsse von Kriechen und Schwinden auf die Durchbiegung sind für Infraleichtbeton wesentlich und daher zu berücksichtigen (vgl. nachfolgendes Kapitel). Bei der Verformungsberechnung mit GFK-Bewehrung sind Besonderheiten zu beachten (siehe [1, 124, 135]).

5.4.4 Auswirkungen von Kriechen und Schwinden

Kriechen

Der Einfluss des Kriechens muss bei der Ermittlung von Verformungen berücksichtigt werden. Die Langzeitauswirkungen durch Kriechen des Betons werden gemäß EC2 [8] grundsätzlich durch eine Modifikation des E-Moduls E_{ilcm} über die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ (vgl. Kap. 5.2.4) erfasst. Der sogenannte effektive E-Modul $E_{eff,ilc}$ zum Zeitpunkt t ergibt sich zu:

$$E_{eff,ilc}(t, t_0) = \frac{E_{ilcm}}{(1 + \varphi(t, t_0))} \quad (60)$$

Der effektive E-Modul $E_{eff,ilc}$ findet sowohl bei der Ermittlung von Stauchungen bei druckbeanspruchten ILC-Wandabschnitten bzw. -Stützen wie auch bei der Bestimmung der Durchbiegung bei Biegebauteilen Anwendung.

Stauchung druckbeanspruchter Bauteile

Zur Berechnung der Stauchung druckbeanspruchter Bauteile $\varepsilon_c(t, t_0)$ (gesamte spannungsinduzierte Dehnung als Summe aus elastischer Dehnung und Kriechdehnung zum Zeitpunkt t) kann der effektive E-Modul $E_{eff,ilc}$ gemäß Zilch und Zehetmaier [88] wie folgt herangezogen werden:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{N}{E_{ilc,eff} \cdot A_n + E_s \cdot A_s} = \frac{N}{E_{ilc,eff} \cdot A_{i,eff}} \quad (61)$$

mit

N: einwirkende Normalkraft

$A_{i,eff} = A_c + (\alpha_{s,eff} - 1) \cdot A_s$; ideelle Querschnittsfläche

$A_n = A_c - A_s$; Nettoquerschnittsfläche

$\alpha_{s,eff} = E_s / E_{ilc,eff}$

$E_{eff,ilc}(t, t_0) = E_{ilcm} / (1 + \varphi(t, t_0))$

Durchbiegung

Der effektive E-Modul wirkt sich auf den Faktor $\alpha_{s,eff}$ und damit bei biegebeanspruchten Bauteilen auch auf die Druckzonenhöhe x aus, die sich durch Kriechen vergrößert. Zur Berechnung der Durchbiegung eines biegebeanspruchten ILC-Bauteils unter Berücksichtigung des Kriechens können die modifizierten Werte $E_{eff,ilc}$, $\alpha_{s,eff}$ und die Druckzonenhöhe x direkt zur Ermittlung der Momenten-Krümmungsbeziehung herangezogen werden. Weitere Angaben finden sich bei Lösch und Rieseberg [1].

Schwinden

Durch Schwinden entsteht eine Zugbeanspruchung im Beton, in der Bewehrung eine dazu analoge Druckbeanspruchung. Schwinden bewirkt bei symmetrisch bewehrten Bauteilen nur eine Verkürzung, bei asymmetrisch bewehrten Bauteilen jedoch zusätzlich eine Krümmung. Dies gilt sowohl für druckbelastete als auch biegebelastete Bauteile.

Die Berechnung der durch Schwinden verursachten Verkürzung $\Delta\varepsilon_{s,s}$ eines Bauteils unter Berücksichtigung des effektiven E-Moduls $E_{\text{eff,ilc}}$ erfolgt gemäß Zilch und Zehetmaier [88] über:

$$\Delta\varepsilon_{s,s} = \frac{\Delta F_{s,s}}{E_s \cdot A_s} = \varepsilon_{\text{ilcs}} \cdot \frac{A_n}{A_{i,\text{eff}}} \quad (62)$$

mit

$$A_{i,\text{eff}} = A_c + (\alpha_{s,\text{eff}} - 1) \cdot A_s \text{ (ideelle Querschnittsfläche)}$$

$$A_n = A_c - A_s \text{ (Nettoquerschnittsfläche)}$$

$$\alpha_{s,\text{eff}} = E_s / E_{\text{ilc,eff}}$$

$\varepsilon_{\text{ilcs}}$: Schwindmaß

Zur Berechnung der Durchbiegung durch Schwinden kann die Ersatznormalkraft

$$N_{cs} = \varepsilon_{\text{ilcs}} \cdot E_s \cdot A_s \quad (63)$$

bzw. das entstehende Moment

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot z_{i,s} \quad (64)$$

mit

$z_{i,s}$: Abstand des Bewehrungsschwerpunkts vom Schwerpunkt des ideellen Querschnitts

direkt in der Momenten-Krümmungslinie berücksichtigt werden.

Zur Auswirkung des Schwindens auf die Mindestbewehrung bzw. Rissbreitenbegrenzung siehe Kapitel 5.4.2.

5.5 Konstruktionsgrundlagen

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten Hinweise zur Verbundspannung und zur konstruktiven Mindestbewehrung mit ILC. Weiterführende Angaben zur Konstruktion sind bei Faust [7] zu finden, beispielsweise werden dort Besonderheiten der Bewehrungsführung bei Leichtbetonen in Form von erhöhten Biegerollendurchmessern und Übergreifungslängen erläutert. Konstruktive Vorgaben beim Einsatz von GFK-Bewehrung sind den technischen Regeln und den Zulassungen [124, 135] zu entnehmen.

5.5.1 Verbundverhalten⁷

Das Verbundverhalten wird durch die Verbundspannung-Schlupf-Beziehung beschrieben, die für ILC durch Ausziehversuche von Hückler [19] ermittelt wurde. Als allgemeines Ergebnis konnte ein »starres« Verhalten beobachtet werden, das zu günstigem Riss- und Verformungsverhalten führt. Es wurde ein eigenes Verbundgesetz in Anlehnung an MC90/B8 [136] für ILC entwickelt, das für detaillierte Betrachtungen herangezogen werden kann. Anhand der Versuchsergebnisse mit Betonstahl und GFK-Bewehrung konnte zudem gezeigt werden, dass die vorhandenen Berechnungsmethoden zur Ermittlung des Bemessungswertes der Verbundspannung gemäß EC2 [8] für ILC konservative Werte liefert und damit angewendet werden kann [19]. Mit verzinktem Betonstahl wurden Verbundversuche im Rahmen von Bauteilprüfungen für die Erwirkung einer Zustimmung im Einzelfall für ein Bauvorhaben in Berlin durchgeführt. Die ermittelten Verbundspannungen lassen darauf schließen, dass die Verzinkung keinen relevanten Einfluss auf die Verbundspannung hat und auch hier die Bemessungswerte nach EC2 [8] auf der sicheren Seite liegen [126].

Der Bemessungswert der Verbundspannung nach EC2 [8] berechnet sich wie folgt:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot f_{lctk;0,05} / \gamma_c \quad (65)$$

mit η_1 : Beiwert zur Berücksichtigung der Qualität des Verbundes; 1,0 für gute Verbundbedingungen; 0,7 für alle anderen Bedingungen

Eine Abminderung über den Faktor η_1 ist in Anlehnung an die Ergebnisse von Hückler [19] nicht erforderlich, da ILC ohnehin eine porosierte Matrix besitzt, die in allen Bauteilbereichen gleichermaßen auftritt. Ein Aufsteigen von Luftblasen infolge Innenverdichtung, das zu einer zusätzlichen Luftblasenanlagerung unterhalb der Bewehrungsstäbe führt, kann ausgeschlossen werden, da die Innenverdichtung ausdrücklich nicht empfohlen wird.

⁷ Teile dieses Kapitels wurden verbatim aus der Vorveröffentlichung [1] der Autorin übernommen.

Unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten mittleren Zugfestigkeit f_{ilctm} von ILC aus [19] und dem Ansatz gemäß EC2 [8] von $f_{ilctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ilctm}$ [8] ergibt sich die Formel zu

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \frac{f_{ilctm}^{0,7}}{\gamma_c} \quad (66)$$

Die folgende Tabelle fasst die resultierenden Werte für die ILC-Familie zusammen.

Tabelle 5-4: Bemessungswert der Verbundspannung nach EC2 [8] für ILC [1]

	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
f_{ilctm} [MPa]	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87
f_{ilcbd} [MPa]	0,68	0,75	0,80	0,86	0,91

5.5.2 Mindestbewehrung

Mindestbewehrungen haben zur Aufgabe, Zwangsspannungen abzudecken und die Versagensvorankündigung sicherzustellen (vgl. auch Kap. 5.1.3). Sie werden abhängig von der Bauteil- bzw. Belastungsart festgelegt.

Die konstruktive Mindestbewehrung von Wänden und Stützen hat vorrangig die Aufnahme von unplanmäßigen Biegemomenten und die Minimierung zeitabhängiger Verformungen zum Ziel. Nach Faust [7] sind die Angaben der Norm gleichermaßen auf Normal- und Leichtbetone übertragbar. Es liegt daher nahe, die Angaben, konkret die Anforderung $A_{smin} \geq 0,0015 A_c$, auch für Infraleichtbeton zu übernehmen. Jedoch können sich hierdurch bei sehr großen Wanddicken von ILC-Bauteilen sehr hohe Bewehrungsgrade ergeben, die nicht unbedingt sinnvoll sind. Methoden, bei denen effektive Randzonen berücksichtigt werden, wären hier zu bevorzugen und sind noch zu entwickeln.

Die Mindestbewehrung, die sich aus der Gewährleistung der Rissbreitenbegrenzung ergibt, wurde in Kap. 5.4.2 beschrieben.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung und wesentliche Erkenntnisse

Infralichtbeton ist ein konstruktiver, wärmedämmender Leichtbeton, der außerhalb der Normung liegt. Daher braucht es als Grundlage für die praktische Anwendung klare und umfassende Empfehlungen bzw. Leitlinien für das Entwerfen und Konstruieren mit ILC, um einen materialgerechten und effizienten Einsatz in der Gebäudehülle gewährleisten zu können. Hieraus ergeben sich zwei übergeordnete Fragen: Welche Aspekte sind beim Entwurf von Gebäuden mit ILC-Außenwänden zu berücksichtigen? Und was ist bei der Bemessung von ILC-Wänden unter Druckbeanspruchung zu beachten? Um diese Punkte zu beantworten, verfolgt die vorliegende Arbeit zwei übergeordnete Ziele:

- die Aufbereitung von wesentlichen, bauphysikalischen und baupraktischen Entwurfsaspekten für ILC und
- die Erarbeitung eines Vorschlags für ein Bemessungskonzept für ILC-Wandbauteile unter Druckbeanspruchung einschließlich vorausgehender Untersuchungen der Tragfähigkeit.

Die Arbeit gliedert sich dementsprechend in die drei Abschnitte *Entwurfsaspekte*, *Tragfähigkeit* und *Bemessungskonzept*, deren wesentliche Inhalte und Erkenntnisse im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

Entwurfsaspekte:

Aus *bauphysikalischer* Hinsicht werden zunächst die Wärmeleitfähigkeiten von ILC ausgewiesen und Wärmedurchgangskoeffizienten für gängige Wandstärken aufgeführt. Es zeigt sich, dass bei akzeptablen Wandstärken der gängige Richtwert für Außenwände von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ häufig überschritten wird, dies kann jedoch über andere Bauteile wie Decken oder Fenster ausgeglichen werden. Die spezifische Wärmespeicherkapazität wird als Grundlage für den sommerlichen Wärmeschutz erläutert und liegt in ähnlicher Größenordnung wie z.B. Normalbeton oder Porenbeton. Die Wasseraufnahme liegt ebenfalls ähnlich zu Normalbeton und unterhalb von Porenbeton. Jedoch ist bei ILC mit einer längerfristigen Wasseraufnahme zu rechnen, weshalb immer ein Oberflächenschutz (Hydrophobierung) zu empfehlen ist. Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand liegt bei ILC mit einer Trockenrohdichte $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ ähnlich wie Porenbeton oder Lehm, bei einer

Trockenrohdichte von 800 kg/m^3 zwischen Porenbeton/Lehm und Normalbeton bzw. gefügedichtem Leichtbeton, und wirkt sich damit positiv auf die Raumfeuchte aus. Beim Frost-Tau-Widerstand zeigte sich für ILC mit einer Trockenrohdichte von 700 und 800 kg/m^3 eine ausreichende Beständigkeit für die Expositionsklasse XF3, für eine Trockenrohdichte von 600 kg/m^3 war dies nicht der Fall. Eine Einschätzung für XF1 konnte aufgrund fehlender Kriterien nicht getroffen werden. Eine Hydrophobierung der bewitterten Oberflächen wirkt sich positiv auf den Frost-Tau-Widerstand aus und ist in jedem Fall zu empfehlen. Die bewerteten Schalldämm-Maße liegen mit ILC je nach Trockenrohdichte und Wandstärke rechnerisch in einer Spannweite von 54 bis 62 dB und damit größtenteils unterhalb einer schweren und deutlich oberhalb einer leichten Bauweise, so dass ein guter Schallschutz durch ILC-Bauteile umsetzbar ist.

In *baupraktischer* Hinsicht wird zunächst der Effekt unterschiedlicher Schalplatten auf die Oberflächenqualität beschrieben. Saugende Schalungen ergeben lunker- und porenarme, nicht-saugende Schalungen glatte Oberflächen mit fein verteiltem Porenbild. Bezüglich Herstellung und Einbau wird auf die Bedeutung des Saugverhaltens der Gesteinskörnung für den Mischprozess verwiesen, die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung ist vorab zu bestimmen und entsprechend zusätzliches Saugwasser zuzugeben. Das Einbringen von ILC erfolgt in der Regel mit Kübeln, auch Pumpen wurde bereits erfolgreich getestet. Verdichtungsmaßnahmen sind aufgrund der guten Fließfähigkeit und des selbstnivellierenden Charakters nicht notwendig, außer wenn punktuell zur Vermeidung von Betonierhorizonten gewünscht. Fallhöhen sollten in Anlehnung an übliche Empfehlungen für Sichtbeton begrenzt werden. Ausschulfristen sollten bei ILC länger gewählt werden als bei Normalbeton, die tatsächliche Festlegung muss projektspezifisch erfolgen. Auch die Nachbehandlung sollte bei ILC länger angesetzt werden, wobei insbesondere ein zu schnelles Auskühlen und Austrocknen zu vermeiden sind. Eine Hydrophobierung von bewitterten ILC-Oberflächen ist vorzusehen, einige silan- und siloxanbasierte Hydrophobierungsmittel wurden mit ILC getestet und besitzen eine gute Wirksamkeit.

Tragfähigkeit:

Zunächst werden Bemessungsansätze für Wandbauteile unter Druck aus verschiedenen Normen analysiert und Berechnungsansätze zur Ermittlung der maximalen Traglast im Bruchzustand unter Versuchsbedingungen abgeleitet. Der Ansatz des EC2 [8] wird als Grundlage der weiteren Betrachtungen gewählt. Anschließend werden experimentelle Untersuchungen an bewehrten und unbewehrten ILC-Wandbauteilen im Maßstab 1:2 unter zentrischer Druckbeanspruchung erläutert. Dabei bleiben die Werte der experimentellen Ergebnisse hinter den rechnerischen Traglasten zurück. Neben Einflüssen aus dem Prüfaufbau werden daher anschließend Einflussfaktoren auf die maximale Traglast im Bruchzustand jeweils theoretisch und experimentell untersucht. Die resultierenden Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es zeigt sich, dass die Annahme der mittleren Zylinderdruckfestigkeit als Grundlage zur rechnerischen Ermittlung der maximalen Traglast von ILC Wandbauteilen unter Versuchsbedingungen nicht realitätsnah ist. Bereits bei der Prüfdauer von ca. 20 Minuten im Wandversuch tritt ein signifikanter Dauerstandeffekt auf, der zu einer Traglastreduktion auf ca. 85 % der Kurzzeitfestigkeit führt.
- Die größere Bauteilschlankheit der geprüften Wandbauteile gegenüber dem Prüfzylinder führt ebenfalls zu einer Reduktion, die mit ca. 81 % der Zylinderdruckfestigkeit beziffert werden kann.
- Der Maßstabeffekt bzw. size effect wird in der Literatur vielfach diskutiert und auch hier untersucht, es ergeben sich aber keine eindeutigen Erkenntnisse.
- Der Festigkeitsunterschied zwischen Normprobekörpern und Bauteil ist in der Normung festgeschrieben und resultiert aus Volumen- bzw. Maßstabeffekten, Feuchtigkeits- und Temperatureinflüssen etc. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen Normzylinder und Bauteil, sind jedoch nur bedingt aussagekräftig.

Im Anschluss an die Untersuchung der Einflussfaktoren werden die Erkenntnisse genutzt, um einen alternativen Berechnungsansatz für die maximale Traglast zu formulieren. Im Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen der Wandbauteilprüfungen unter zentrischem Druck ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- Der alternative Berechnungsansatz ergibt eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen als der ursprüngliche Ansatz auf Basis der mittleren Zylinderdruckfestigkeit, zum Teil werden die Lasten unterschätzt.
- Die Bemessungsansätze des EC2 [8] können unter Berücksichtigung der getroffenen Ansätze und Annahmen als anwendbar betrachtet werden.

Bemessungskonzept

Das Bemessungskonzept wird basierend auf ILC-spezifischen Eigenschaften, den Ergebnissen der Untersuchungen zur Tragfähigkeit und in Anlehnung an die Regelungen des EC2 [8] erarbeitet. Zunächst werden allgemeine Grundlagen zur Dauerhaftigkeit, zur Bewehrung und zur Duktilität und Versagensankündigung erläutert. ILC carbonatisiert sehr schnell, weshalb auch bei Hydrophobierung eine korrosionsbeständige Bewehrung einzusetzen ist. Die Steifigkeitsunterschiede zwischen ILC und jeweiliger Bewehrungsart sind in Form von ideellen Querschnittswerten bei der Bemessung zu beachten. Für eine ausreichende Duktilität bzw. Versagensankündigung wird vorgeschlagen, die Vorgaben des EC2 [8] hinsichtlich Mindest- und Höchstbewehrungsgrad sowie der Begrenzung der Druckzonenhöhe zu übernehmen. Im nächsten Schritt werden Ausgangswerte für die Bemessung wie Spannungs-Dehnungs-Linien und die wichtigsten mechanischen Kennwerte für ILC mit einer Trockenrohdichte von 600 bis 800 kg/m³ angegeben. Die Ermittlung des Bemessungswerts der Druckfestigkeit, Kennwerte für Kriechen und Schwinden sowie das anzusetzende Eigengewicht werden erläutert. Für die Bemessung im GZT wird auf die Erkenntnisse der Untersuchungen der Tragfähigkeit zurückgegriffen und der Ansatz für unbewehrte Druckglieder aufgeführt. Anschließend wird auf die Bemessung bewehrter Bauteile unter Interaktion von Normalkraft und Biegung eingegangen und auf erste Untersuchungen mit ILC auf Basis speziell erstellter Interaktionsdiagramme verwiesen. Für den GZG werden Hinweise zur Begrenzung der Spannungen, zur Berechnung der Rissbreiten und zur Mindestbewehrung für die Aufnahme von Zwangsspannungen gegeben. Bezüglich der Verformungen wird ein Vorschlag für die Begrenzung der Stauchung von druckbelasteten Bauteilen formuliert, und die Auswirkungen von Kriechen und Schwinden werden erläutert. Abschließend werden die Verbundspannungen von ILC und die konstruktive Mindestbewehrung beleuchtet.

6.2 Weiterer Forschungsbedarf

Die vorliegende Arbeit umspannt ein sehr breites Thema. Dies gilt sowohl für die Entwurfsaspekte als auch das Bemessungskonzept, insbesondere aber auch für die Thematik der Tragfähigkeit und ihrer Einflussfaktoren. Vieles konnte im Rahmen der Untersuchungen beleuchtet werden, und an vielen der betrachteten Punkte ergibt sich weiterer Forschungsbedarf, der im Folgenden zusammengefasst wird.

Entwurfsaspekte

Bei der Erarbeitung konnten wesentliche Aspekte erfasst werden, die für den Entwurf mit ILC relevant sind. Jedoch konnten aufgrund des Umfangs der Fragestellung keineswegs alle wichtigen Aspekte berücksichtigt werden, was in der Detaillierung der Ziele der Arbeit (Kap. 2.5) bereits berücksichtigt wurde. Beispielsweise konnten Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und rechtliche Rahmenbedingungen nur kurz behandelt werden, auch Brandschutz war nicht Teil der Arbeit. Des Weiteren wurde in den einzelnen Aspekten, insbesondere den bauphysikalischen, auf mehrere Trockenrohdichtebereiche eingegangen, um eine gewisse Bandbreite abzudecken. Jedoch konnten nicht in allen Aspekten alle Rohdichtebereiche erfasst werden. Darüber hinaus sind die Ergebnisse abhängig von der spezifischen Zusammensetzung. Dies schränkt die Übertragbarkeit auf andere Rezepturen ein, liegt jedoch in der Natur der ILC-Forschung. Sowohl in Bezug auf weitere Aspekte als auch hinsichtlich der Vertiefung und Ergänzung der untersuchten Aspekte bedarf es daher weiterführender Forschungen.

Tragfähigkeit

Die Untersuchungen zur Tragfähigkeit umfassen eine große Bandbreite an Faktoren. Die Erkenntnisse ermöglichen es, hinsichtlich der Berechnungsansätze und der Anwendbarkeit der Bemessungsansätze Schlüsse zu ziehen. Die Vielfältigkeit der Faktoren bedingt jedoch, dass nicht alle Untersuchungen in ausreichendem, statistisch vollumfänglich aussagekräftigem Umfang im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden können. Zum einen liegen sicherlich weitere Faktoren neben den hier betrachteten vor, die Einfluss auf die Tragfähigkeit nehmen. Zum anderen ist sowohl für die Prüfungen der Wandbauteile als auch der vier analysierten Einflussfaktoren festzuhalten, dass zusätzliche, teils auch abgewandelte

experimentelle Prüfungen zur Untermauerung der Erkenntnisse erforderlich sind, wie nachfolgend tabellarisch zusammengefasst. Dabei kommt den Referenzprüfungen mit Normalbeton besondere Bedeutung zu, um Unterschiede im Verhalten zwischen ILC und NB zu identifizieren und die Übertragbarkeit der mit ILC gewonnenen Erkenntnisse auf NB zu untersuchen.

Tabelle 6-1: Weiterer Forschungsbedarf bzgl. der Tragfähigkeit druckbeanspruchter ILC-Wandbauteile und der Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit

Thema	Forschungsbedarf
Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen unter Druckbeanspruchung	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen unbewehrter und bewehrter Wandbauteile mit zentrischer Belastung und korrektem Prüfaufbau zur statistischen Untermauerung - Prüfungen unbewehrter Bauteile unter exzentrischer Belastung - zusätzliche Prüfungen bewehrter Bauteile mit exzentrischer Belastung (vgl. Kap. 5.3.2) - Referenzprüfungen mit Normalbeton
Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen:	
Dauerstandeffekt	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Untersuchungen in gleicher Form, für statistische Relevanz ist eine hohe Anzahl erforderlich - zusätzliche Referenzprüfungen mit Normalbeton
Bauteilschlankheit	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen analog Versuchsreihe 3 - zusätzliche Referenzprüfungen mit NB analog Versuchsreihe 3 - zusätzliche Prüfungen im Maßstab 1:1
Bauteilgröße (Maßstabseffekt)	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Prüfungen mit alternativem Prüfaufbau (gleiche Maschine) - Referenzprüfungen mit Normalbeton
Druckfestigkeit Bauwerk/ Normprobekörper	<ul style="list-style-type: none"> - neue Versuchsreihe mit Bohrkernen aus in-situ Bauwerk (kein Bauteil unter Laborbedingungen) - hohe Anzahl an Prüfungen statistisch notwendig

Bemessungskonzept

Das erarbeitete Bemessungskonzept umfasst Grundlagen, Ausgangswerte, Ansätze für den GZT und Hinweise zum GZG und zu Konstruktionsgrundlagen. Die Ausgangswerte, insbesondere Spannungs-Dehnungs-Linien, mechanische Eigenschaften und elastische Verformungseigenschaften, sind jedoch abhängig von der ILC-Zusammensetzung, wodurch die Übertragbarkeit eingeschränkt ist, was wie bereits erwähnt jedoch in der Natur der ILC-Forschung liegt. Um die Bemessungsdruckfestigkeit von unbewehrten ILC-Bauteilen definieren zu können, muss die Übertragung des Duktilitätsbeiwerts auf ILC durch Untersuchungen bestätigt werden. Die geschilderten Ansätze im GZT basieren auf den Erkenntnissen der Tragfähigkeitsuntersuchungen. Zur Untermauerung sind jedoch weitere Prüfungen erforderlich, insbesondere zu exzentrischer Belastung (siehe obige Tabelle). Zur Bemessung von D-Bereichen stehen weiterführende Untersuchungen zur Anwendung von Stabwerkmodellen bei ILC noch aus. Für den GZG werden Hinweise gegeben, vertiefte ILC-spezifische Untersuchungen liegen jedoch noch nicht vor. Zeitabhängiges Verhalten durch Kriechen und Schwinden muss im Detail untersucht und ein Verformungsmodell für ILC unter Dauerlast entwickelt werden. Zur Festlegung der konstruktiven Mindestbewehrung wäre die Entwicklung alternativer Methoden hilfreich, bei denen effektive Randzonen berücksichtigt werden.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit führen also zu einer Vielzahl an Punkten, an denen zukünftige Forschung anknüpfen kann. Die Ausführungen zu den Entwurfsaspekten, der Tragfähigkeit und zum Bemessungskonzept druckbeanspruchter ILC-Wände erheben daher keinen Anspruch auf Vollständigkeit, leisten aber einen wesentlichen Beitrag zur Bereitstellung von umfassenden Empfehlungen bzw. Leitlinien für einen materialgerechten und effizienten Einsatz von Infraleichtbeton.

7 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
A_c	Betonquerschnittsfläche
A_n	netto Betonquerschnittsfläche
A_g	brutto Betonquerschnittsfläche
A_i	ideelle Querschnittsfläche von Stahlbetonbauteilen
$A_{i,eff}$	ideeller Wirkungsbereich der Bewehrung
A_s	Querschnittsfläche Betonstahl
$A_{s,min}$	Mindestbewehrung
$A_{s,max}$	Höchstbewehrungsgrad
b	Breite
c	spezifische Wärmekapazität
d	Dicke, statische Höhe
d_s	Durchmesser Stahlbewehrungsstab
e	Maß der Ausmitte
E_c / E_{ilc}	Elastizitätsmodul von Beton / Infraleichtbeton
E_{cm} / E_{ilcm}	mittlerer Elastizitätsmodul von Beton / Infraleichtbeton
$E_{eff,ilc}$	effektiver Elastizitätsmodul von Infraleichtbeton
E_s	Elastizitätsmodul von Stahlbewehrung
f	Festigkeit
f_{bd} bzw. f_{ilcbd}	Bemessungswert der Verbundspannung von Beton / Infraleichtbeton
f_c	Betondruckfestigkeit
f'_c	specified compressive strength of concrete
f'_{cr}	required average strength of concrete
$f_{ck} / f_{lck} / f_{ilck}$	Charakteristische Druckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{cd} / f_{lcd} / f_{ilcd}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{cd,pl} / f_{lcd,pl} / f_{ilcd,pl}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit von unbewehrtem Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
f_{ct}	Betonzugfestigkeit
$f_{ct,eff}$	effektive Betonzugfestigkeit (Zugfestigkeit des

7 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

$f_{ctm} / f_{lctm} / f_{ilctm}$	Betons beim Auftreten der Risse) mittlere Zugfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{ctk;0,05} / f_{lctk;0,05} / f_{ilctk;0,05}$	5 %-Quantil der Biegezugfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{ck} / f_{lck} / f_{ilck}$	charakteristische Druckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{ck,cyl} / f_{lck,cyl} / f_{ilck,cyl}$	charakteristische Zylinderdruckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{cm} / f_{lcm} / f_{ilcm}$	mittlere Druckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$f_{cm,cyl} / f_{lcm,cyl} / f_{ilcm,cyl}$	mittlere Zylinderdruckfestigkeit von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
f_y bzw. f_{yk}	Streckgrenze von Betonstahl
f_{yd}	Bemessungswert der Streckgrenze von Betonstahl
F_c / F_{ilc}	Betonkraft / Kraft Infraleichtbeton
F_s	Kraft der Stahlbewehrung
$\Delta F_{s,s}$	Kraft der Stahlbewehrung durch Schwinden
h	Höhe
h_w	Dicke
i_c	Trägheitsradius
k	effective length factor
k_s	Knickbeiwert
l	Länge
l_c	length of compression member
$l_{h,eff}$	wirksame horizontale Länge
l_w	Wandhöhe
l_o	Knicklänge
m	Index für gemittelte Werte
m'	flächenbezogene Masse
M	Biegemoment
M_{cs}	Ersatzmoment durch Schwinden
M_d bzw. M_{Rd}	Bemessungswert des Widerstandsmoments
N	Normalkraft
N_{cs}	Ersatznormalkraft durch Schwinden
N_d bzw. N_{Rd}	Bemessungswert der Widerstandsnormalkraft
N_u	aufnehmbare Normalkraft im Bruchzustand
$N_{u,exp}$	aufnehmbare Normalkraft im Bruchzustand,

$N_{u,cal}$	experimentell ermittelt aufnehmbare Normalkraft im Bruchzustand, rechnerisch ermittelt
P_u	factored axial force
P_n	nominal axial compressive strength
R_w	bewertetes Schalldämm-Maß
$RDM_{UPPT,28'}$	dynamischer E-Modul
S	Schlankheitsverhältnis
S_m	Setzfließmaß
$S_{r,max}$	maximaler Rissabstand
U	U-Wert, Wärmedurchgangskoeffizient
V	Variationskoeffizient
w_k	Rechenwert der Rissbreite
W_w	Wasseraufnahmekoeffizient
x	Druckzonenhöhe
$Z_{i,s}$	Abstand des Bewehrungsschwerpunkts vom Schwerpunkt des ideellen Querschnitts

Griechische Buchstaben

α_s bzw. $\alpha_{s,eff}$	Verhältniswert der E-Moduln von Bewehrung und Beton
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
α	Dauerstandbeiwert
$\alpha_{cc} / \alpha_{ilcc} / \alpha_{ilcc}$	Dauerstandbeiwert von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$\alpha_{cc,pl} / \alpha_{ilcc,pl}$	Dauerstandbeiwert für unbewehrten Beton / Infraleichtbeton
α_R	Wichtungsfaktor Widerstand
β	Beiwert zur Berücksichtigung von Lagerungsbedingungen von Wänden, Zuverlässigkeitsindex
β_D	Druckfestigkeit
β_t	Völligkeitsbeiwert
γ_c	Materialsicherheitsbeiwert für Beton
γ_{conv}	Sicherheitsbeiwert zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen den charakteristischen Festigkeits des Laborprüfkörpers Zylinder und des eingebauten Bauwerksbetons

7 Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

γ_{ilc}	Teilsicherheitsbeiwert für Infraleichtbeton
γ_M	Teilsicherheitsbeiwert der Materialseite
γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für Stahl
ε	Dehnung
$\varepsilon_c / \varepsilon_{lc} / \varepsilon_{ilc}$	Dehnung von Beton / Leichtbeton / Infraleichtbeton
$\varepsilon_{ilc,s}$	Schwindmaß von Infraleichtbeton
ε_{cm}	mittlere Betondehnung
ε_s	Betonstahldehnung
ε_{sm}	mittlere Betonstahldehnung
$\Delta\varepsilon_{s,s}$	Betonstahldehnung durch Schwinden
η_E	Korrekturfaktor zur Ermittlung des E-Moduls von Leichtbeton
η_1	Korrekturfaktor zur Ermittlung der Zugfestigkeit von Leichtbeton
η_2	Korrekturfaktor zur Ermittlung des Kriechverhaltens von Leichtbeton niedriger Festigkeitsklassen
$\eta_{ilc,sl}$	Faktor zur Berücksichtigung der Festigkeitsreduktion bei ILC aufgrund von Schlankheit
κ	Krümmung
κ_m	mittlere Krümmung
λ	Wärmeleitfähigkeit, Schlankheit
$\lambda_{tr,10}$	Wärmeleitfähigkeit, bei getrockneter Probe und 10°C Prüftemperatur
λ_{bem}	Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit
μ	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl
ξ_{lim}	Begrenzung der Druckzonenhöhe
ρ	Dichte, Bewehrungsgrad
$\rho_{i,eff}$	effektiver Bewehrungsgrad bezogen auf den ideellen Wirkungsbereich
ρ_{fr}	Frischbetondichte
ρ_s	Längsbewehrungsgrad
ρ_{tr}	Trockenrohddichte
σ	Spannung
σ_c	Spannung im Beton
σ_s	Spannung der Stahlbewehrung

σ_{sd}	Bemessungswert der Betonstahlspannung
σ_{sr}	Stahlspannung beim Betonreißen
$\sigma_{sr,0,95}$	Stahlspannung bei abgeschlossener Rissbildung
σ_x	Standardabweichung
φ	Kriechzahl
ϕ	Faktor zur Berücksichtigung der Ausmitte und der Schlankheit, strength reduction factor

Weitere Bezeichnungen

ACI	American Concrete Association
CEB	Comité Euro-Internationale du Béton (Euro-International Committee for Concrete)
CEM	Zement
E-Modul	Elastizitäts-Modul
EC2	Europäische Norm DIN EN 1992-1-1; kurz: Eurocode 2
EnEV	Energieeinsparverordnung
fib	Fédération internationale du béton
GF	Glasfaserkomposit
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
HPLWAC	high performance lightweight aggregate concrete (Hochleistungsleichtbeton)
ILC	Infra-Lightweight Concrete (Infraleichtbeton)
Kap.	Kapitel
LAC	lightweight aggregate concrete (haufwerksporiger Leichtbeton)
LC	lightweight concrete (Leichtbeton mit geschlossenen Gefüge)
LP	Luftporengehalt
M- κ -Linie	Momenten-Krümmungs-Linie
MultiLC	Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften
NB	Normalbeton
NC	Normal Concrete (Normalbeton)
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction

	et Ouvrages (Recommendations for Testing and Use of Construction Materials)
SEL	Size Effect Law
ST	Stahl
Stk	Stück
TU	Technische Universität
UniBW	Universität der Bundeswehr
V	Variationskoeffizient
VR	Versuchsreihe
WG	Wegaufnehmer
ZiE	Zustimmung im Einzelfall

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Zusammensetzungen von Infraleichtbeton, entwickelt an der TU Berlin (basierend auf [19, 20]).....	9
Tabelle 2-2:	Klassifizierung und Rohdichteklassen von Infraleichtbeton (basierend auf [33])	10
Tabelle 2-3:	Experimentell ermittelte Eigenschaften von Infraleichtbetonen nach Hückler [19].....	11
Tabelle 3-1:	Wärmeleitfähigkeiten und Wärmedurchgangskoeffizienten von ILC ([1, 33] basierend auf [60])	23
Tabelle 3-2:	Spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC800 [39] und anderer Baustoffe [61] im Vergleich [1, 33]	24
Tabelle 3-3:	Wasseraufnahmekoeffizient von ILC ([33], basierend auf [1, 64, 65]).....	25
Tabelle 3-4:	Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl μ von ILC und anderen Baustoffen im Vergleich [1, 33]	26
Tabelle 3-5:	Mittlere Abwitterung und Standardabweichung von ILC im CF-Verfahren nach 28 Frost-Tau-Wechseln und modifiziertes Abnahmekriterium ([33], basierend auf [64, 65]).....	27
Tabelle 3-6:	Ermittlung der bewerteten Schalldämm-Maße R_w für unterschiedliche ILC-Klassen gemäß Leichtbetonformel nach DIN 4109-32 [71], exemplarisch für Wanddicke 50 cm (basierend auf [1, 33])	30
Tabelle 3-7:	Bewertete Schalldämm-Maße R_w für unterschiedliche ILC-Klassen gemäß Leichtbetonformel nach DIN 4109-32 [71] und konventioneller Wandkonstruktionen im Vergleich (basierend auf [1, 33])	30
Tabelle 4-1:	Untersuchungen zur Tragfähigkeit von ILC-Wandbauteilen unter zentrischem Druck und zu Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit	40
Tabelle 4-2:	Berechnungsansätze zur maximalen Traglast von unbewehrten Wandbauteilen unter Versuchsbedingungen	56
Tabelle 4-3:	Übersicht der Versuchsreihen an ILC-Wandbauteilen (basierend auf [21, 89, 90])	62

Tabelle 4-4:	Kennwerte und experimentelle Traglasten der Wandbauteile 1.1 bis 6.2	65
Tabelle 4-5:	Versuchsprogramm der Dauerstanduntersuchungen (basierend auf [21])	82
Tabelle 4-6:	Ergebnisse der Dauerstandversuche über 30 min mit ILC800 (VR2) [21]	83
Tabelle 4-7:	Ergebnisse der Dauerstandversuche mit konstanten Lastniveaus, ILC800, VR3 (basierend auf [21, 89, 90])	84
Tabelle 4-8:	Zusätzliche Versuchsreihen Dauerstandprüfungen, ILC700 (basierend auf [89])	85
Tabelle 4-9:	Verhältniswerte der Druckfestigkeit von Prüfkörpern verschiedener Schlankheit [99]	89
Tabelle 4-10:	Prüfkörper der Versuchsreihen zur Schlankheit	91
Tabelle 4-11:	Prüfkörper der Versuchsreihe zum Maßstabeffekt, ILC700 (basierend auf [89])	99
Tabelle 4-12:	Weiterer Forschungsbedarf bzgl. der Tragfähigkeit druckbeanspruchter ILC-Wandbauteile und der Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit	117
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung der Eigenschaften von ILC gemäß den Zusammensetzungen nach Tabelle 2-1, basierend auf [1, 19]	125
Tabelle 5-2:	Lastannahmen zum Eigengewicht der ILC-Klassen [1]	130
Tabelle 5-3:	Völligkeitsbeiwert β_t von Infraleichtbeton bei langfristiger Einwirkung für Stahl- und GFK-Bewehrung ([33], basierend auf [1, 19])	137
Tabelle 5-4:	Bemessungswert der Verbundspannung nach EC2 [8] für ILC [1]	145
Tabelle 6-1:	Weiterer Forschungsbedarf bzgl. der Tragfähigkeit druckbeanspruchter ILC-Wandbauteile und der Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit	151
Tabelle 11-1:	Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Maße und ILC Güte	184
Tabelle 11-2:	Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Bewehrung und Lasteinleitung	185

Tabelle 11-3:	Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Prüfablauf und -dauer	186
Tabelle 11-4:	Experimentelle Traglast $N_{u,exp}$, rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$ und $N_{u,cal,e,conv}$ und erreichte Auslastungen der Wandbauteile VR1 bis VR6	187
Tabelle 11-5:	Experimentelle Traglast $N_{u,exp}$, rechnerische Traglast $N_{u,cal,e}$, Bemessungslast N_{Rd} und erreichte Auslastungen der Wandbauteile VR1 bis VR6	188
Tabelle 11-6:	Prüfrohndichte und Kurzzeitfestigkeit ILC800, VR1 (basierend auf [21])	190
Tabelle 11-7:	Prüfrohndichte und Kurzzeitfestigkeit C35/45, VR4	190
Tabelle 11-8:	Ergebnisse der Dauerstandversuche über 30 min mit C25/30 (VR5) (basierend auf [21]).....	190
Tabelle 11-9:	Prüfrohndichte und Kurzzeitfestigkeit ILC800, VR1	192
Tabelle 11-10:	Prüfrohndichte und Kurzzeitfestigkeit C35/45, VR2	192
Tabelle 11-11:	Prüfrohndichte und Kurzzeitfestigkeit ILC700, VR3 (basierend auf [89])	192

9 Abbildungsverzeichnis

Bild 2-1:	Einordnung Infraleichtbeton nach der Trockenrohddichte ρ_{TR} [2] ...5
Bild 2-2:	Druckfestigkeit über Trockenrohddichte von ausgewählten Infraleichtbetonen im Vergleich ([33], ergänzt um [25]).....8
Bild 3-1:	Exemplarische Oberflächen von ILC800 mit leicht saugender Spezialfilmbeschichtung (links) und nicht saugender Birkenperrholzplatte (rechts) [76] 32
Bild 3-2:	Oberflächen des Bauvorhabens Jugendfreizeiteinrichtung Betonoase (vgl. [33]) mit ILC700, geschalt mit Vlies (Fotos: Alex Hückler) 32
Bild 4-1:	Aufnehmbare Normalkraft N_{Rd} mit Ausmitte e 42
Bild 4-1:	Grenzen der Dehnungsverteilung im GZT (Bild 6.1 aus [8]) 44
Bild 4-2:	Spannungs-Dehnungs-Diagramm zur Bemessung von LAC unter Druckbeanspruchung (Bild A.1 aus [10]) 46
Bild 4-3:	Mögliche Dehnungsdiagramme im GZT (Bild A.3 aus [10]) 47
Bild 4-4:	Lasteinleitungsbereich der VR2 (Normalbetonschicht/ Gummilage; links) und VR3 (Mörtelbett/ Blech/ Gummilage; rechts) [21] 63
Bild 4-5:	Darstellung der angebrachten Messtechnik mit Wegaufnehmern (WG mit Länge L) (links) [21]; Wandbauteil inkl. Messtechnik in der Seidner Mauerwerkspresse (rechts) 64
Bild 4-6:	Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90]) 67
Bild 4-7:	Exemplarische Versagensbilder unbewehrter (links: VR3.1) und bewehrter Wandbauteile (rechts: VR2.1) [21] 69
Bild 4-8:	Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der unbewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])..... 70
Bild 4-9:	Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der bewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90]) 71

Bild 4-10: Querdehnungsverläufe in den D-Bereichen der Kopf- und Fußbereiche, exemplarisch für VR2.3 und VR4.2 (hier sind die horizontalen Wegaufnehmer unten mit 4-6, nicht 5-7, benannt) ...	73
Bild 4-11: Spannungs-Dehnungs-Linien der Dauerstandversuche an ILC800 und Normalbeton [103]	81
Bild 4-12: Ergebnisse der Dauerstandversuche ILC800, VR2 [21]	83
Bild 4-13: Ergebnisse der Dauerstandversuche ILC700, VR7, mit unterschiedlichen Lastniveaus (ausgedrückt in % der Kurzzeitfestigkeit; basierend auf [89])	86
Bild 4-14: Druckfestigkeitsprüfung mit Standardversuchskörpern [88]	88
Bild 4-15: Prinzipielle Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit (in [98] mit β bezeichnet) von der Probekörperschlankheit [98]	89
Bild 4-16: Prüfkörper der VR3 mit $h/d = 2,2$ bis $6,6$ [89]	91
Bild 4-17: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 1 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d \approx 2$	92
Bild 4-18: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 2 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d \approx 2$	93
Bild 4-19: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 3 bezogen auf die mittlere Druckfestigkeit bei $h/d = 2,2$ (basierend auf [89])	94
Bild 4-20: Rechnerische Verhältniswerte der Druckfestigkeiten β_D und mittlere Verhältniswerte der experimentellen Druckfestigkeiten f der VR3 (basierend auf [89])	95
Bild 4-21: Verhältniswerte der Druckfestigkeiten der Versuchsreihe 3 bezogen auf die Zylinderdruckfestigkeit $h/d = 2,0$ (basierend auf [89])	96
Bild 4-22: Druckfestigkeiten und Prüfröhdichten der zum jeweiligen Maßstab zugehörigen Zylinder (basierend auf [89])	100
Bild 4-23: Druckfestigkeiten der Bauteile in Abhängigkeit des Maßstabs (basierend auf [89])	101
Bild 4-24: Bohrkerne und Zylinder zur Untersuchung des Druckfestigkeitsverhältnisses Bauteil/Probekörper [89]	105

Bild 4-25: Druckfestigkeiten und Prüfröhdichten der Zylinder und Bohrkerne (basierend auf [89])	106
Bild 4-26: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])	110
Bild 4-27: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der unbewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])	111
Bild 4-28: Rechnerische Traglasten $N_{u,cal,e}$, experimentelle Traglasten $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der bewehrten Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])	112
Bild 4-29: Rechnerische Traglast $N_{u,cal,e,conv}$, experimentelle Traglast $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90])	114
Bild 4-30: Bemessungswiderstand N_{Rd} , experimentelle Traglast $N_{u,exp}$ und erreichte Auslastung der Wandbauteile der VR1-6 (basierend auf [21, 89, 90]).....	115
Bild 5-1: Unterschiedliche Bewehrungsarten (v.l.: Betonstahl, verzinkter Betonstahl, GFK-Bewehrung; Foto: Jan-Oliver Kunze)	120
Bild 5-2: Idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linien für die Zusammensetzungen ILC600 bis ILC800 aus experimentell ermittelten mittleren Zylinderdruckfestigkeiten und Bruchdehnungen (basierend auf [1, 19]).....	123
Bild 11-1: Rezeptur VR1, ILC800 (Blähton) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)	180
Bild 11-2: Rezeptur VR2, ILC800 (Blähglas) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)	180
Bild 11-3: Rezeptur VR3.1, 3.2, ILC800 (Blähglas) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)	181
Bild 11-4: Rezeptur VR3.3, VR4, ILC800 (Blähglas/Blähton) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin).....	181
Bild 11-5: Rezeptur VR5, ILC700 (Blähglas) (Quelle: FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin)	182
Bild 11-6: Rezeptur VR6, ILC750 (Blähton), Heidelberger Beton	183

Bild 11-7: Rezeptur Dauerstandversuche C35/45, VR4-5 (Quelle: FG
Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin) 189

Bild 11-8: Minima, Maxima und Mittelwerte der Prüfröhdichte und der
Kurzzeitfestigkeit der VR6, ILC700 [89] 191

10 Literatur

- [1] Lösch, C.; Rieseberg, P.: Infraleichtbeton. Entwurf, Konstruktion, Bau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2018.
- [2] Schlaich, M.; Zareef, M. E.: Infraleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 3, S. 175–182.
- [3] Bosold, D.; Beck, M.: Zement-Merkblatt Betontechnik B13: Leichtbeton, 2014.
- [4] Thienel, C.: Sonderbetone. Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton, Wintersemester 2015. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, 2015.
- [5] DIN EN 206: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013.
- [6] Filipaj, P.: Architektonisches Potenzial von Dämmbeton. vdf-Hochschulverl, Zürich, 2010.
- [7] Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Ernst, Berlin, 2003.
- [8] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [9] DIN 4213: Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in Bauwerken.
- [10] DIN EN 1520:2011-06: Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung; Deutsche Fassung EN_1520:2011.
- [11] DIN 4166: Porenbeton-Bauplatten und Porenbeton-Planbauplatten.
- [12] DIN EN 12602: Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton; Deutsche Fassung EN 12602:2016.

-
- [13] DIN 4223-100: Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton - Teil 100: Eigenschaften und Anforderungen an Baustoffe und Bauteile.
- [14] DIN 4223-103: Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton - Teil 103: Sicherheitskonzept.
- [15] Lösch, C.; Bauer, M.; Hückler, A. et al.: Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau (ILVO) - Abschlussbericht. Teilbericht: Technische Universität Berlin, FG Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Transsolar Energietechnik, erwartet 2021.
- [16] Gartmann, P.: Das Potenzial von Dämmbeton. 3. Schweizer Bauforum, Zürich, 2009.
- [17] Zareef, Mohamed Ahmed Mohamed El: Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete. Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, Heft 7.
- [18] Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton 2.0. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11, S. 757–766.
- [19] Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC). Dissertation, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2016.
- [20] Hückler, A.; Schlaich, M.: Zur Biegung von Infraleichtbetonbauteilen - Werkstoff-, Verbund-, Trag- und Verformungsverhalten. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 5, S. 282–292.
- [21] Technische Universität Berlin: Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (MultiLC) - Mechanische, Bauchemische und Bauphysikalische Untersuchungen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Bundesministerium für Bildung und Forschung.
- [22] Callsen, B.; Thienel, K.-C.: Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-

- Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. *beton* (2017), 4/2017, S. 128–134.
- [23] Breit, W.; Schulze, J.; Heese, C. et al.: Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton. Forschungsinitiative Zukunft Bau, Heft 2894. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2014.
- [24] Spiesz, P. R.; Hunger, M.: Structural ultra-lightweight concrete – from laboratory research to field trials. In: Justnes, H.; Braarud, H. (Hrsg.): Proceedings of the 11th High Performance Concrete conference, Tromsø, Norway, S. 1–10, 2017.
- [25] Yu, R.; van Onna, D. V.; Spiesz, P. et al.: Development of Ultra-Lightweight Fibre Reinforced Concrete applying expanded waste glass. *Journal of Cleaner Production* 112 (2016), S. 690–701.
- [26] Chen, Y. X.; Wu, F.; Yu, Q. et al.: Bio-based ultra-lightweight concrete applying miscanthus fibers: Acoustic absorption and thermal insulation. *Cement and Concrete Composites* 114 (2020), S. 103829.
- [27] Huiskes, D.M.A.; Keulen, A.; Yu, Q. L. et al.: Design and performance evaluation of ultra-lightweight geopolymer concrete. *Materials & Design* 89 (2016), S. 516–526.
- [28] Hub, A.; Zimmermann, G.; Knippers, J.: Leichtbeton mit Aerogelen als Konstruktionswerkstoff. *Beton- und Stahlbetonbau* 108 (2013), Heft 9, S. 654–661.
- [29] Rübner, K.; Schnell, A.; Haamkens, F. et al.: Leichtbeton aus Aufbaukörnungen. *Chemie Ingenieur Technik* 84 (2012), Heft 10, S. 1792–1797.
- [30] Garrecht, H.; Klatt, A.: Potenziale und Grenzen gefügedichter Leichtbetone aus nachwachsenden Rohstoffen: Mineralisch ummantelte Holzspäne als Leichtzuschlag für Beton. *BFT International* 78 (2012), Heft 02, S. 115–117.
- [31] Elshahawi, M.; Hückler, A.; Schlaich, M.: Infra lightweight concrete: A decade of investigation (a review). *Structural Concrete* 22 (2021), S1.
- [32] Filipaj, P.: Architektonisches Potenzial von Dämmbeton. vdf Hochschulverlag, Zürich, 2019.

-
- [33] Schlaich, M.; Hückler, A.; Lösch, C.: Infraleichtbeton (ILC). In: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender/ Beton-Kalender 2021. Schwerpunkte: Fertigteile; Integrale Bauwerke (2 Teile). Beton-Kalender, Heft 202. Ernst, Wilhelm & Sohn; Ernst & Sohn, Berlin, 2020.
- [34] Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton: Reif für die Praxis. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Heft 12, S. 772–783.
- [35] Clarke, J. L. (Hrsg.): STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE. CRC PRESS, [S.I.], 2019.
- [36] Flassenberg, G.; Lieback, P.; Homann, M.: Porenbeton Handbuch. Planen und Bauen mit System, 2018.
- [37] Medienzentrum Universität der Bundeswehr München: Nachhaltiger Baustoff Infraleichtbeton 2.0 – die Zukunft des Bauens? <https://www.unibw.de/home/news/infraleichtbeton-2-0-die-zukunft-des-bauens> (Abruf: 07.07.2021).
- [38] Schulze, J.; Breit, W.: Experimentalgebäude aus Infraleichtbeton - monolithisch und hochwärmedämmend. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016), Heft 6, S. 377–384.
- [39] Zikopoulos, P.: Bestimmung und Bewertung der spezifischen Wärmekapazität von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2012.
- [40] Brecht, K.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2013.
- [41] Loebel, J.: Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2013.
- [42] Einbrodt, C.: Das Verhalten von Infraleichtbeton bei hohen Temperaturen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut

- für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2014.
- [43] Schließer, A.: Warmbeton : Mischungsentwicklung mit verbesserter Übertragbarkeit in den Realmaßstab, 2019.
- [44] Yu, Q. L.; Spiesz, P.; Brouwers, H.J.H.: Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites* 61 (2015), S. 18–28.
- [45] Roberz, F.; Loonen, R.C.G.M.; Hoes, P. et al.: Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy and Buildings* 138 (2017), S. 432–442.
- [46] Chen, B.; Liu, N.: A novel lightweight concrete-fabrication and its thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials* 44 (2013), S. 691–698.
- [47] DIN 4223-101:2014-12, Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton_ - Teil_101: Entwurf und Bemessung.
- [48] Molzahn, R.: Grundlagen und Verfahren für den Knicksicherheitsnachweis von Druckgliedern aus Konstruktionsleichtbeton. *DAfStb Heft 375 - 1*, 1986.
- [49] Molzahn, R.: Einfluß des Kriechens auf Ausbiegung und Tragfähigkeit schlanker Stützen aus Konstruktionsleichtbeton. *DAfStb Heft 375 - 2*, 1986.
- [50] Bacht, T.; Stempniewski, L.: Großformatige Biegeversuche an Balken und wandartigen Trägern aus Leichtbeton-Schalungssteinen. *Mauerwerk* 17 (2013), Heft 1, S. 27–37.
- [51] Gerber-Balmelli, C.; Marti, P.: Versuche an Porenbeton-Mauerwerk, 1994.
- [52] Brameshuber, W.; Steinhoff, J.; Mott, R.: Entwicklung eines Wandsystems mit hoher Wärmedämmung aus selbstverdichtendem porosiertem Leichtbeton in Kombination mit einer bauteilintegrierten Wandschalung aus textilbewehrtem Beton. Abschlussbericht.

-
- Forschungsinitiative Zukunft Bau, F 2770. Fraunhofer IRB Verl., Stuttgart, 2011.
- [53] Marinus, P.C.P.: Ultra-lichtbeton voor monoliete gevelconstructies. Master, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2016.
- [54] Neß, L.: Wandartige Träger aus Infraleichtbeton - Experimentelle Untersuchungen zur Bemessung mit Stabwerkmodellen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2015.
- [55] CEB-FIP: fib model code for concrete structures 2010. Ernst & Sohn, Berlin, 2013.
- [56] ACI 318-19. Building code requirements for structural concrete : ccommentary on building code requirements for structural concrete (ACI 318R-19). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019.
- [57] Thienel, K.-C.; Haller, T.; Beuntner, N.: Lightweight Concrete-From Basics to Innovations. Materials (Basel, Switzerland) 13 (2020), Heft 5.
- [58] DIN EN ISO 10456: Baustoffe und Bauprodukte - Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften - Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte.
- [59] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz - GEG), 2020.
- [60] Hückler, A.; Schlaich, M.: Bond and Deformation Behaviour of Reinforced Infra-Lightweight Concrete (ILC). In: Stang, H.; Braestrup, M. (Hrsg.): Concrete - Innovation and Design. fib Symposium Proceedings, Kopenhagen, 18.-20. Mai 2015, S. 116–117, 2015.

- [61] Schneider, K.-J.; Goris, A.; Albert, A.: Schneider Bautabellen // Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Werner, Köln, 2012.
- [62] DIN EN ISO 15148: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen.
- [63] Fischer, H.-M.; Häupl, P.; Freymuth, H.: Lehrbuch der Bauphysik Schall -- Wärme -- Feuchte -- Licht -- Brand -- Klima. Springer eBooks (2008).
- [64] Brecht, K.: Wassereindringtiefe und Frost/ Frost-Tausalz-Widerstand von Infraleichtbeton. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2016.
- [65] Michael Hecker: Hydrophobierung von Infraleichtbeton. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2019.
- [66] DIN EN ISO 12572: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit.
- [67] Brecht, K.: Wasserdampfdurchlässigkeit von ILC 600. Bericht zum Modul "Infraleichtbeton in der Praxis", Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2015.
- [68] DIN 4108-4: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.
- [69] CEN/TS 12390-9: DIN CEN/TS 12390-9: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung.
- [70] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): BAW Merkblatt - Frostprüfung von Beton (MFB), 2012.
- [71] DIN 4109-32: Schallschutz im Hochbau - Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) - Massivbau.

-
- [72] Weber, L.; Müller, S.: Schallschutz bei Wärmedämm-Verbundsystemen. Forschungsinitiative ZukunftBau F, Heft 2949. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2015.
- [73] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.: Kalksandstein - Schallschutz sicher geplant - einfach ausgeführt. Nachweis nach DIN 4109:2016-07, 2016.
- [74] Neß, L.: Untersuchung von Infralichtbeton zu baubetrieblichen und ökonomischen Aspekten. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2015.
- [75] PERI GmbH: Peri - Trennmittel.
<https://www.peri.com/de/produkte/schalungssysteme/zubehoer/trennmittel.html> (Abruf: 25.04.2017).
- [76] Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.: Infralichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Fraunhofer IRB Verlag, 2017.
- [77] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V.; Bundesverband der Deutschen Zementindustrie e.V.: Merkblatt Sichtbeton, 2004.
- [78] Dickamp, M. J.; Eppers, S.: Zement-Merkblatt Betontechnik B 29. Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung, 2006.
- [79] DIN EN 13670: Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009.
- [80] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 3: Bauausführung.
- [81] DIN EN 1504-2: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Definitionen, Anforderungen, Qualitätskontrolle und AVCP – Teil 2: Oberflächenschutzprodukte und -systeme für Beton; Deutsche Fassung prEN 1504-2:2015.
- [82] Brandolini, A.: Untersuchungen zur Bewehrungskorrosion bei Infralichtbetonbauteilen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin, 2016.

- [83] Schlosser, J.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökologischen und ökonomischen Bewertung eines Bauwerks aus Infraleichtbetonfertigteilen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2016.
- [84] Dobrzynska, S.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökonomischen und ökologischen Bewertung eines Infraleichtbetonbauwerks. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2016.
- [85] Czekalski, J.: Ökobilanzieller Vergleich eines Infraleichtbetongebäudes mit alternativen Bauweisen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Bauingenieurwesen, Berlin, 2019.
- [86] International Federation for Structural Concrete: Model Code 2010. Final draft. Bulletin / International Federation for Structural Concrete Draft model code, Heft 65. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2012.
- [87] International Federation for Structural Concrete: Model Code 2010. Final draft. Bulletin / International Federation for Structural Concrete Draft model code, Heft 66. International Federation for Structural Concrete, Lausanne, 2012.
- [88] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Springer eBooks (2010).
- [89] Jünke, D.: Bauteilfestigkeit von ILC-Wänden. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin.
- [90] Schubert, M.: Momenten-Normalkraft-Interaktion bei Infraleichtbetonwänden. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2019.
- [91] Petzold, K.: Beschreibung des Lastabtrags im Infraleichtbeton mittels optischer Verformungsanalyse. Bachelorarbeit, Technische

- Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2013.
- [92] Schmidt, A.; Curbach, M.: Zentrische Druckversuche an schlanken UHPC-Stützen. *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (2016), Heft 9, S. 588–602.
- [93] Steven, G.; Empelmann, M.: Gedrungene Stützen aus UHPFRC mit hochfester Längsbewehrung. *Beton- und Stahlbetonbau* 109 (2014), Heft 5, S. 344–354.
- [94] Autorenkollektiv; DAFStb: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2). DAFStb-Heft, v.600. Beuth, Berlin, 2012.
- [95] Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken ; Teil 1-1 : Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem : Anhang Kommentierte Fassung. Beuth Kommentar. Beuth; Ernst & Sohn, Berlin, Berlin, 2016.
- [96] Bonzel, J.: Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit. *Beton- und Stahlbetonbau* 54 (1959), Heft 9, S. 223–228.
- [97] Gehler, W.: Die Würfelfestigkeit und die Säulenfestigkeit als Grundlage der Betonprüfung und die Sicherheit von Beton und Eisenbetonbauten. *Der Bauingenieur* 9 (1928), Heft 2, S. 21–27.
- [98] Schickert, G.: Formfaktoren der Betondruckfestigkeit. *Die Bautechnik* (1981), Heft 2, S. 52–57.
- [99] Müller, H. S.; Reinhardt, H.-W.: Beton. In: Fingerloos, F.; Wörner, J. D.; Bergmeister, K. (Hrsg.): 2009 Beton-Kalender. Konstruktiver Hochbau Aktuelle Massivbaunormen. *Beton-Kalender*, Heft 2009, S. 1–150. Ernst & Sohn, Berlin, 2009.
- [100] Rüschi, H.: Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. *ACI Journal Proceedings* 57, Heft 7, S. 1–28.
- [101] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton. Arten, Herstellung und Eigenschaften. *Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Ernst, Berlin, 2001.

- [102] Weigler, H.; Karl, S.: Stahlleichtbeton. Herstellung, Eigenschaften, Ausführung. Bauverlag, Wiesbaden, Berlin, 1972.
- [103] Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton bietet die architektonische Freiheit für ein neues einfaches und baukulturell wertvolles Bauen. Monolithische recycelbare tragende Wärmedämmungen als echte Alternative zu mehrschichtigen Wandsystemen. Der Prüfenieur (2020), Heft 56, S. 58–66.
- [104] DIN EN 12390-3:2009: Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern.
- [105] Sell, R.; Zelger, C.; Rüscher, H. et al.: Versuche zur Dauerstandfestigkeit von Leichtbetonen / Versuche zur Festigkeit der Biegedruckzone, Einflüsse der Querschnittsform : (Dreieck, Rechteck, Plattenbalken). Deutsches Institut für Normung / Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 207. Beuth, Berlin, 1969.
- [106] Löscher, C.; Richter, A.; Schlaich, M.: Structural behavior of multifunctional inhomogeneous infra-lightweight concrete elements. Structural Concrete (2020), S. 1–15.
- [107] van Mier, J. G.; Shah, S. P.; Arnaud, M. et al.: Strain-softening of concrete in uniaxial compression. Materials and Structures 30 (1997), Heft 4, S. 195–209.
- [108] Sangha, C. M.; Dhir, R. K.: Strength and complete stress-strain relationships for concrete tested in uniaxial compression under different test conditions. Matériaux et Construction 5 (1972), Heft 6, S. 361–370.
- [109] Bažant, Z. P.; Xiang, Y.: Size Effect in Compression Fracture: Splitting Crack Band Propagation. Journal of Engineering Mechanics 123 (1997), Heft 2, S. 162–172.
- [110] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Band 2: Beton, Mauerwerk (Nichtmetallisch-anorganische Stoffe): Herstellung, Eigenschaften, Verwendung, Dauerhaftigkeit. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1993.

-
- [111] Schickert, G.: Schwellenwerte beim Betondruckversuch. Forschungsbericht 70. Berlin, 1980.
- [112] Voellmy, A.: Festigkeitskontrolle von Betonbelägen. In: Fachverband Zement (Hrsg.): Betonstraßen-Jahrbuch 1957/58, Heft 3. Köln.
- [113] Anderegg, F. O.: Shape factor and compressive strength of lightweight concretes. In: Proceedings American Concrete Institute, S. 333–334.
- [114] Trunk, B. G.: Einfluss der Bauteilgröße auf die Bruchenergie von Beton, ETH Zurich, 1999.
- [115] Bažant, Z. P.: Scaling of structural strength. Elsevier Ltd., Burlington, 2005.
- [116] Ožbolt, J.: Massstabeffekt und Duktilität von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen, Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1995. Mitteilungen / Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Heft 1995,2. Inst. für Werkstoffe im Bauwesen, Stuttgart, 1995.
- [117] König, G.; Soukhov, D.; Jungwirth, F.: Sichere Betonproduktion für Stahlbetontragwerke. Schlußbericht (DBV-Nr.199). Bauforschung / Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau T, DBV-199. Stuttgart, 1998.
- [118] Loch, M.: Beitrag zur Bestimmung von charakteristischen Werkstofffestigkeiten in Bestandtragwerken aus Stahlbeton. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2014.
- [119] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang - national festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [120] DIN EN 13791:2008-05: Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken oder in Bauwerksteilen.
- [121] Stark, J.: Dauerhaftigkeit von Beton. Springer, Berlin, 2013.
- [122] Reiter, P.: Korrosionsschutz der Stahlbewehrung bei Bauteilen aus Infralichtbeton. Studienarbeit, Technische Universität Berlin,

- Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2014.
- [123] Institut Feuerverzinken GmbH: Arbeitsblätter Feuerverzinken. E.4 Fachgerechte Ausbesserung, 2016.
- [124] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung: Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm, 2014.
- [125] Dornburg, S.: Kriechverformung von Biegebalken aus Infraleichtbeton. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2016.
- [126] Schlaich, M.; Hückler, A.: Betonoase. Ergebnisbericht zu Bauteilprüfungen für die Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE). TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, 2016.
- [127] Lingenfelder, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Verbundkriechen von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau, Berlin, 2015.
- [128] Euro-International Committee for Concrete: CEB-FIP model code 1990. Design code. Bulletin d'information / Comité Euro-International du Béton, 213/214. Telford, London, 1993.
- [129] Bazant, Z. P.; Baweja, S.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. In: American Concrete Institute (Hrsg.): SP-194: The Adam Neville Symposium: Creep and Shrinkage-Structural Design Effects, 2000.
- [130] Bazant, Z. P.; Baweja, S.: RILEM Draft Recommendation: Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures— model B3. Materials and Structures (1995), Heft 28, S. 357–365.
- [131] Liu, Y.; Tafsirojjaman, T.; Dogar, A. U. R. et al.: Shrinkage behavior enhancement of infra-lightweight concrete through FRP grid

-
- reinforcement and development of their shrinkage prediction models. *Construction and Building Materials* 258 (2020), S. 119649.
- [132] DIN EN 1740: Bestimmung des Tragverhaltens von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton oder aus haufwerksporigem Leichtbeton unter vorwiegend in Längsrichtung wirkender Belastung (vertikale Bauteile).
- [133] König, G.: Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton. Sowie Kommentare, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispiele zu den Regelungen nach DIN 1045, EC2 Und Model Code 90. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 466. Beuth, Berlin, 1996.
- [134] ISO 4356: Bases for the design of structures - Deformations of buildings at the serviceability limit states.
- [135] Schöck Bauteile GmbH: Schöck ComBAR: Technische Information, 2017.
- [136] CEB-FIP: Lightweight aggregate concrete. Recommended extensions to model code 90, guide ; identification of research needs, technical report ; case studies, state-of-art report, Bulletin 8. Bulletin / fib, International Federation for Structural Concrete, 8 : Guidance documents. fib, Lausanne, 2000.

11 Anhang

11.1 Versuche an ILC-Wandbauteilen

Beteiligte		MA	Rezept-Nr	ILC800									
			Datum										
			Uhrzeit										
Fresh Density kg/m ³		1050	f _{c,cube,150, 7 d}	14,2	N/mm ²								
Dry density kg/m ³		844	f _{c,cube,100}	0,0	N/mm ²					28-Tage-Datum			
			Setzfließmaß 45 min	600	mm	MS/Z	11,11%						
			Zementgehalt (Min)	405,00	kg/m ³	FM/MS	10,00%						
			Luftporen (Min)	16,90	V%	FM/(Z+MS)	1,00%						
			w/(Z+MS)-Wert (Max)	0,430		ST/(Z+MS+W)	0,11%						
Zusammensetzung Beton						trocken		Lieferzustand				feucht	
Bezeichnung	d/D	V% (tr)	M% (tr)	Fabrikat	V [l]	Dichte [kg/l]	Gewicht [kg]	Feuchte [M%]	Feuchte [kg]	Gewicht [kg]	Feuchte [M%]	Feuchte [kg]	Gewicht [kg]
Blähton Sand	0/2	7,0	16,6	Liapor 0/2	33,611	1,690	56,802	2,00	1,136	57,938	16,5	9,384	66,186
Blähton	1/4	28,0	33,3	Liapor 1/4	134,459	0,850	114,290	2,00	2,286	116,576	10,3	11,772	126,062
Blähton	2/6	65,0	50,1	Liapor F2,9E	312,109	0,550	171,660	0,00	0,000	171,660	21,0	35,963	207,623
CEM III-A 32,5				HeidelbergerCement	132,787	3,050	405,000	Summe:	3,422		Summe:	57,118	495,000
Frischwasser					250,618	1,000	250,618						193,500
MicroSilica	MS/Z	11,1%			19,565	2,300	45,000	Anmachwasser:			53,696		45,000
Fließmittel Sika VC 3137	FM/Z	1,11%			4,1667	1,080	4,500						4,500
Sika stabilizer 10160317	ST/Z	0,17%			0,7850	0,900	0,707						0,707
Luft					169,018								
Gesamt:					1000,000		1048,577						1048,577
w/z-Wasser					193,500		193,500						
Saugwasseranteil					57,118		57,118						

Bild 11-1: Rezeptur VR1, ILC800 (Blähton) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)

Liaver (800)	
Mix compositions for 1 m ³	
Material	Amount (kg/m ³)
Liaver 2 – 4	47,72
Liaver 1 – 2	46,00
Liaver 0,5 - 1	67,10
Cement	400,00
Silica fume	50,00
Water	180,00
Total water	200,40
Superplasticizer	4,50
Tylose (Stabilizer)	0,50

Bild 11-2: Rezeptur VR2, ILC800 (Blähglas) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)

Liaver (800)	
Mix compositions for 1 m ³	
Material	Amount (kg/m ³)
Liaver 2 – 4	59,22
Liaver 1 – 2	57,10
Liaver 0,5 - 1	83,30
Normal Sand	147,00
Cement	499,00
Silica fume	55,70
Total water	188,40
Superplasticizer	6,20
Tylose (Stabilizer)	0,42

Bild 11-3: Rezeptur VR3.1, 3.2, ILC800 (Blähglas) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)

Liaver/Liapor (800)	
Mix compositions for 1 m ³	
Material	Amount (kg/m ³)
Liaver 0,5/1	85,36
Liaver 1/2	58,50
Liapor F 3,5 (2/8)	130,77
CEM III/A 42,5N	460,00
Silica fume	50,00
Water	201,00
Total water	238,00
Superplasticizer	3,68
Tylose (Stabilizer)	0,69

Bild 11-4: Rezeptur VR3.3, VR4, ILC800 (Blähglas/Blähton) (Quelle: FG Baustoffe und Bauchemie, TU Berlin)

11 Anhang

Beteiligte		AH		MH		Rezept-Nr		TAILB675_i		TAILB675		
						Datum		15.11.2013				
						Uhrzeit		10:00 - 16:00				
Festigkeitsklasse						$f_{c,cube,150}$				N/mm ²		
Konsistenz						$f_{c,cube,100}$				N/mm ²		
Rohdichteklasse						Ausbreitmaß				28-Tage-Datum		
Größtkorn						Zementgehalt		(Min)				
Sieblinien-Nr						Luftporen		(Min)				
						w/z-Wert		(Max)				
Zusammensetzung Beton										lieferzust.		
										feucht		
Bezeichnung	d/D	V% (tr)	M% (tr)	Fabrikat		V [l]		Dichte [kg/l]	Gewicht [kg]	Feuchte [M%]	Feuchte [kg]	Gewicht [kg]
Blähglas	0,5/1	31,1	38,8	Liaver		124,240		0,450	55,908		0,000	55,908
Blähglas	1/2	18,3	17,7	Liaver		72,909		0,350	25,518		0,000	25,518
Blähglas	2/4	50,6	43,5	Liaver		202,050		0,310	62,636		0,000	62,636
CEM III-A 32,5				HeidelbergerCement		121,005		3,050	369,065	Summe:	0,000	369,065
Frischwasser						242,528		1,000	242,528			242,528
MicroSilica	M5/Z	20,0%				31,410		2,350	73,813			73,813
Fließmittel (FM)	FM/Z	1,43%				5,272		1,000	5,272			5,272
Tylose (ST)	ST/Z	0,14%				0,586		0,900	0,527			0,527
Luft						200,000						
						Gesamt:		1000,000				835,27
						w/z-Wasser		242,528				242,528
						Saugwasseranteil		0,000				0,000
Kennwerte (Rezeptur mit trockenen Gesteinskörnungen)												
Stoffraum		Mörtel <2mm		Leim <0,123mm		Mehlkorn <0,125		w/(z+ms)				0,548
Komponenten	M%	V%	M%	V%	M%	V%	M%	V%	Frischbetondichte (berechnet)		0,835	
Gesteinskörnung	17,2%	39,9%	5,5%	12,6%	44,2%	12,1%	44,2%	12,1%	Frischbetondichte (gemessen)		0,923	
Zement	44,2%	12,1%	44,2%	12,1%	44,2%	12,1%	44,2%	12,1%	Trockendichte (gemessen)			
Wasser	29,0%	24,3%	29,0%	24,3%	29,0%	24,3%	29,0%	24,3%				
Zusatzstoffe tr.	0,6%	3,1%	0,6%	3,1%	0,6%	3,1%	0,6%	3,1%	LP [-]		0,2	
Zusatzmittel	8,8%	0,5%	8,8%	0,5%	8,8%	0,5%	8,8%	0,5%	LP [%]		-9,5	
Luftporen	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%	20,0%				
Summe	99,9%	99,9%	88,2%	72,7%	82,7%	60,0%	53,7%	15,8%				
Bemerkungen												
Frischbetonrohddichten												

Bild 11-5: Rezeptur VR5, ILC700 (Blähglas) (Quelle: FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin)

Liapor (750)	
Mix compositions for 1 m ³	
Material	Amount (kg/m ³)
Vulkamix (0/4)	Rezeptur Heidelberger Beton
Liapor F 3,5 (2/8)	
Cement	
Silica slurry	
Water	
Total water	
Superplasticizer	
air entraining agent	

Die Rezeptur wurde von Heidelberger Beton zur Verfügung gestellt und wird daher an dieser Stelle nicht im Detail veröffentlicht.

Bild 11-6: Rezeptur VR6, ILC750 (Blähton), Heidelberger Beton

Tabelle 11-1: Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Maße und ILC Güte

Wand Nr.	Versuchsreihe	Bemerkung	Breite b [m]	Länge l [m]	Höhe h [m]	ILC Güte
1.1	VR1	unbewehrt, stehend betoniert	0,225	0,98	1,50	ILC800 (Blähton)
1.2	VR1	bewehrt, liegend betoniert	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähton)
1.3	VR1	unbewehrt, liegend betoniert	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähton)
2.1	VR2	bewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas)
2.2	VR2	bewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas)
2.3	VR2	unbewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas)
3.1	VR3	unbewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas)
3.2	VR3	unbewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas)
3.3	VR3	bewehrt, inkl. Steckbügel	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas / Blähton)
4.1	VR4 (TU Dresden)*	unbewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas / Blähton)
4.2	VR4 (TU Dresden)*	unbewehrt	0,225	0,98	1,46	ILC800 (Blähglas / Blähton)
5.1	VR5 (WS_1_1:2 MSc Jünke)	unbewehrt	0,225	0,90	1,50	ILC700 (Blähglas)
5.2	VR5 (WS_2_1:2 (MSc Jünke)	unbewehrt	0,225	0,90	1,50	ILC700 (Blähglas)
6.1	VR6 (Wand 1 MSc Schubert)	bewehrt	0,225	1,00	1,50	ILC750 (Blähton)
6.2	VR6 (Wand 2 MSc Schubert)	bewehrt	0,225	1,00	1,50	ILC750 (Blähton)
*Zuordnung Wand zu Prüfkörpern Druckfestigkeit unklar; Mittelwert für $f_{cm,cyl}/f_{ck,cyl}$ /Prüfrohndichte verwendet						

Tabelle 11-2: Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Bewehrung und Lasteinleitung

Wand Nr.	Bewehrung	vertikale Bewehrung $A_{s,v}$ [cm²]	Lasteinleitung
1.1	unbewehrt	-	mit Gummilage
1.2	vertikal 9 Stk. d=8mm horizontal 13 Stk. d=8mm (vertikale Stirnseiten nicht verbügelt)	4,53	ohne Zwischenschicht
1.3	unbewehrt	-	ohne Zwischenschicht
2.1	vertikal 9 Stk. d=8mm horizontal 11 Stk. d=8mm (vertikale Stirnseiten nicht verbügelt)	4,53	Normalbetonschicht
2.2		4,53	Normalbetonschicht/ Gummilage
2.3	unbewehrt	-	Normalbetonschicht/ Gummilage
3.1	unbewehrt	-	Mörtelbett/Blech/ Gummilage
3.2	unbewehrt	-	
3.3	vertikal 9 Stk. d=8mm horizontal 11 Stk. d=8mm (alle Stirnseiten verbügelt)	4,53	Mörtelbett/Blech/ Gummilage
4.1	unbewehrt	-	Ausgleichsschicht
4.2	unbewehrt	-	Schnellzement
5.1	unbewehrt	-	Mörtelbett (Anpressdruck Maschine)
5.2	unbewehrt	-	
6.1	vertikal 8 Stk. d=8mm horizontal 8 Stk. d=8mm	4,02	Mörtelbett (Anpressdruck Maschine)
6.2	(alle Stirnseiten verbügelt)	4,02	

Tabelle 11-3: Versuchsprogramm Wandbauteile VR1 - VR6 – Prüfablauf und -dauer

Wand Nr.	Prüfablauf/-geschwindigkeit	tatsächliche Prüfdauer [min]
1.1	mit 20kN/min auf 600 kN, dann Abbruch auf 0, erneutes Anfahren kontinuierlich bis zum Bruch mit 100kN/min	59 (erster Ast: 25min, zweiter Ast: 14min)
1.2	mit 20kN/min auf 600 kN, dann mit 150 kN/min bis zum Bruch	51
1.3	mit 20kN/min auf 500 kN, dann mit 150 kN/min bis zum Bruch	50
2.1	mit 20kN/min auf 500 kN, dann mit 150 kN/min bis zum Bruch	44
2.2		54
2.3		40
3.1	mit 50kN/min auf 500 kN, dann mit 150kN/min bis zum Bruch	21
3.2		20
3.3	-(Datenverlust)	-(Datenverlust)
4.1	mit 50kN/min auf 500 kN, dann mit 150kN/min bis zum Bruch	34
4.2		27
5.1	mit 0,00638 N/(mm ² ·s) (entspricht 77,5 kN/min) bis zum Bruch	20
5.2		22
6.1	Laststeigerung in 10 Stufen á 30 Sekunden mit 300 kN/min, Haltezeit je Stufe 2 Minuten	24
6.2		24

Tabelle 11-4: Experimentelle Traglast $N_{u,exp}$, rechnerische Traglasten $N_{u,cal,filcm}$ und $N_{u,cal,e,conv}$ und erreichte Auslastungen der Wandbauteile VR1 bis VR6

Wand Nr.	exp. Traglast $N_{u,exp}$ [kN]	rechnerische Traglast $N_{u,cal,filcm}$ [kN]	Erreichte Auslastung $N_{u,exp}/N_{u,cal,filcm}$ [%]	rechnerische Traglast $N_{u,cal,e,conv}$ [kN]	Erreichte Auslastung $N_{u,exp}/N_{u,cal,e,conv}$ [%]
1.1	1454	4263	34%	2558	57%
1.2	2263	3892	58%	2335	97%
1.3	2505	4106	61%	2463	102%
2.1	2734	3976	69%	2386	115%
2.2	2401	3997	60%	2398	100%
2.3	2684	3477	77%	2086	129%
3.1	1999	3555	56%	2133	94%
3.2	1650	3957	42%	2374	69%
3.3	2716	4033	67%	2420	112%
4.1	3298	4101	80%	2461	134%
4.2	3001	4101	73%	2461	122%
5.1	1516	2324	65%	1395	109%
5.2	1681	2443	69%	1466	115%
6.1	1741	2180	80%	1308	133%
6.2	1895	2219	85%	1331	142%

Tabelle 11-5: Experimentelle Traglast $N_{u,exp}$, rechnerische Traglast $N_{u,cal,e}$, Bemessungslast N_{Rd} und erreichte Auslastungen der Wandbauteile VR1 bis VR6

Wand Nr.	exp. Traglast $N_{u,exp}$ [kN]	rechnerische Traglast $N_{u,cal,e}$ [kN]	Erreichte Auslastung $N_{u,exp}/N_{u,cal,e}$ [%]	Bemessungslast N_{Rd} [kN]	Erreichte Auslastung $N_{u,exp}/N_{Rd}$ [%]
1.1	1454	2941	49%	1565	93%
1.2	2263	2686	84%	1849	122%
1.3	2505	2833	88%	1502	167%
2.1	2734	2744	100%	1704	160%
2.2	2401	2758	87%	1800	133%
2.3	2684	2399	112%	1288	208%
3.1	1999	2453	81%	1243	161%
3.2	1650	2730	60%	1264	131%
3.3	2716	2783	98%	1971	138%
4.1	3298	2830	117%	1426	231%
4.2	3001	2830	106%	1426	210%
5.1	1516	1604	95%	871	174%
5.2	1681	1686	100%	902	186%
6.1	1741	1504	116%	1078	161%
6.2	1895	1531	124%	1047	181%

11.2 Versuche zum Dauerstandeffekt

		ID		NC C35/45							
		Datum		08.01.2015							
		Zeit		14:00 - 17:00							
Festigkeitsklasse		$f_{c,cube,150}$				N/mm ²					
Konsistenz		$f_{c,cube,100}$				N/mm ²		28-Tage-Datum		05.02.2015	
Rohdichteklasse		Ausbreitmaß				mm					
Größtkorn		Zementgehalt		(Min)		kg/m ³					
Sieblinien-Nr		Luftporen		(Min)		V%					
		w/z-Wert		(Max)							
Zusammensetzung Beton								lieferzust.		feucht	
Bezeichnung	d/D	V% (tr)	M% (tr)	Fabrikat	V [l]	Dichte [kg/l]	Gewicht [kg]	Feuchte [M%]	Feuchte [kg]	Gewicht [kg]	
Sand	0/2	51,4	51,4		339,776	2,600	883,417	0,0	0,000	883,417	
Kies	2/8	48,6	48,6		321,893	2,600	836,921	0,0	0,000	836,921	
Zement	CEM III-A	42,5		HeidelbergerCement	98,174	3,050	299,432	total:	0,000	299,432	
Wasser					195,282	1,000	195,282			195,282	
Luft					14,545						
				Summe	969,67		2215,052			2215,052	
				w/z-Wasser	195,282		195,282				
					0,000		0,000				
Zusammensetzung											
	Stoffraum		Mörtel <2mm		Leim <0,123mm		Mehlkorn <0,125		w/(z+m)		0,652
Komponenten	M%	V%	M%	V%	M%	V%	M%	V%	Frischbetondichte (berechnet)		2,284
Gesteinskörnung	77,7%	68,2%	28,7%	#DIV/0!					Frischbetondichte (gemessen)		
Zement	13,5%	10,1%	13,5%	10,1%	13,5%	10,1%	13,5%	10,1%	Trockendichte (gemessen)		
Wasser	8,8%	20,1%	8,8%	20,1%	8,8%	20,1%					
Zusatzstoffe tr.	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	LP [-]		0,015
Zusatzmittel	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	LP [%]	#DIV/0!	
Luftporen		1,5%		1,5%		1,5%		1,5%			
Summe	100,0%	#####	51,0%	#DIV/0!	22,3%	31,8%	13,5%	10,1%			

Bild 11-7: Rezeptur Dauerstandversuche C35/45, VR4-5 (Quelle: FG Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, TU Berlin)

Tabelle 11-6: Prüfrohdichte und Kurzzeitfestigkeit ILC800, VR1 (basierend auf [21])

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm ³]	Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ [N/mm ²]
Prüfdatum VR2 (Betonalter 31 Tage)		
Z 1	0,930	13,91
Z 2	0,893	12,22
Z 3	0,873	11,87
Mittelwert:	0,899	12,67
Prüfdatum VR3 (Betonalter 28 Tage)		
Z 1	0,944	14,01
Z 2	0,911	13,64
Z 3	0,911	15,57
Mittelwert:	0,922	14,41
Mittelwerte über alle:		
	0,910	13,54

Tabelle 11-7: Prüfrohdichte und Kurzzeitfestigkeit C35/45, VR4

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm ³]	Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ [N/mm ²]
Z 1	2,294	34,72
Z 2	2,293	34,98
Mittelwert:	2,294	34,85

Tabelle 11-8: Ergebnisse der Dauerstandversuche über 30 min mit C25/30 (VR5) (basierend auf [21])

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm ³]	max. Spannung σ_{max} [N/mm ²]	$\sigma_{max}/f_{cm,cyl, kurz}$	gebrochen nach [min]
Z 30m.1	-	32,54	0,93	27
Z 30m.2	2,275	31,50	0,90	26

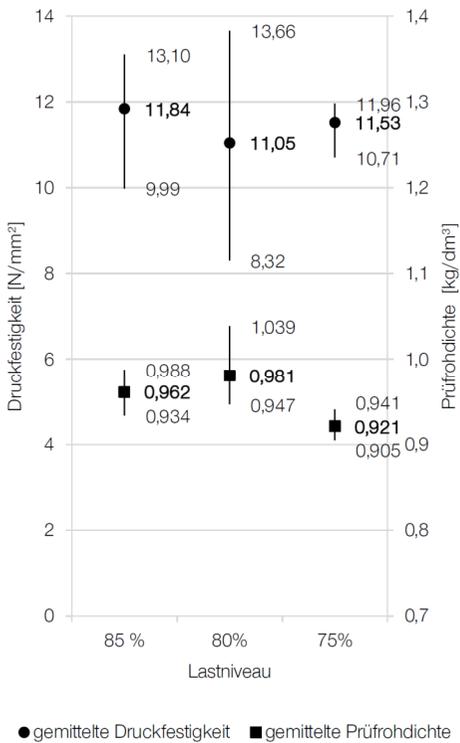


Bild 11-8: Minima, Maxima und Mittelwerte der Prüfröhdichte und der Kurzzeitfestigkeit der VR6, ILC700 [89]

11.3 Versuche zur Bauteilschlankheit

Tabelle 11-9: Prüfrohdichte und Kurzzeitfestigkeit ILC800, VR1

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm ³]	Zylinderdruckfestigkeit f _{cm,cyl} [N/mm ²]
Z 1	0,899	12,6
Z 2	0,899	14,9
Mittelwert:	0,899	13,75

Tabelle 11-10: Prüfrohdichte und Kurzzeitfestigkeit C35/45, VR2

Prüfkörper Nr.	Prüfrohdichte [g/cm ³]	Zylinderdruckfestigkeit f _{cm,cyl} [N/mm ²]
Z 1	2,225	31,8
Z 2	2,234	32,4
Mittelwert:	2,223	32,1

Tabelle 11-11: Prüfrohdichte und Kurzzeitfestigkeit ILC700, VR3
(basierend auf [89])

Prüfkörper	Prüfrohdichte [g/cm ³]	Zylinderdruckfestigkeit f _{cm,cyl} [N/mm ²]
Mittelwert Charge 1*	0,888	10,36
Mittelwert Charge 2*	0,919	11,10
Mittelwert gesamt:	0,904	10,73

*Für VR3 wurden je Schlankheitsgrad 3 Prüfkörper aus Charge 1, 3 Prüfkörper aus Charge 2 erstellt [89]