

Claudia Lösch | Philip Rieseberg
Herausgegeben von Mike Schlaich | Regine Leibinger

Infraleichtbeton

Entwurf | Konstruktion | Bau

Fraunhofer IRB  Verlag

Claudia Lösch | Philip Rieseberg
Herausgegeben von Mike Schlaich | Regine Leibinger

Infraleichtbeton

Entwurf | Konstruktion | Bau

Claudia Lösch | Philip Rieseberg

Herausgegeben von Mike Schlaich | Regine Leibinger

Infraleichtbeton

Entwurf | Konstruktion | Bau

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-9881-1
ISBN (E-Book): 978-3-8167-9931-3

Lektorat: Sigune Meister
Redaktion: Viola Pusceddu
Herstellung: Angelika Schmid
Layout/Satz: Nils Hoffmann Design, Gschwend
Satz Anhang: Fotosatz Buck, Kumhausen/Hachelstuhl
Druck: optimal media GmbH, Röbel/Müritz

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes
hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages
unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen,
Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen
Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch
berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der
Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären
und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder
Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert
werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder

Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen
Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils
gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Haftungsausschluss

Für dieses Handbuch wurden die Hinweise und Anregungen nach bestem
Wissen entsprechend dem aktuellen Stand der Infrleichtbeton-Forschung
zum Zeitpunkt der Drucklegung ausgewählt und zusammengestellt.
Infrleichtbeton besitzt keine bauaufsichtliche Zulassung. Die Verwendung,
Bemessung, Konstruktion und Ausführung müssen im Rahmen einer
Zustimmung im Einzelfall (ZiE) geregelt werden. Daher bleiben die Angaben
in diesem Handbuch ohne Rechtsverbindlichkeit. Eine Haftung wird
ausgeschlossen.

Dezember 2017

© Fraunhofer IRB Verlag, 2018

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500
Telefax +49 711 970-2508
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

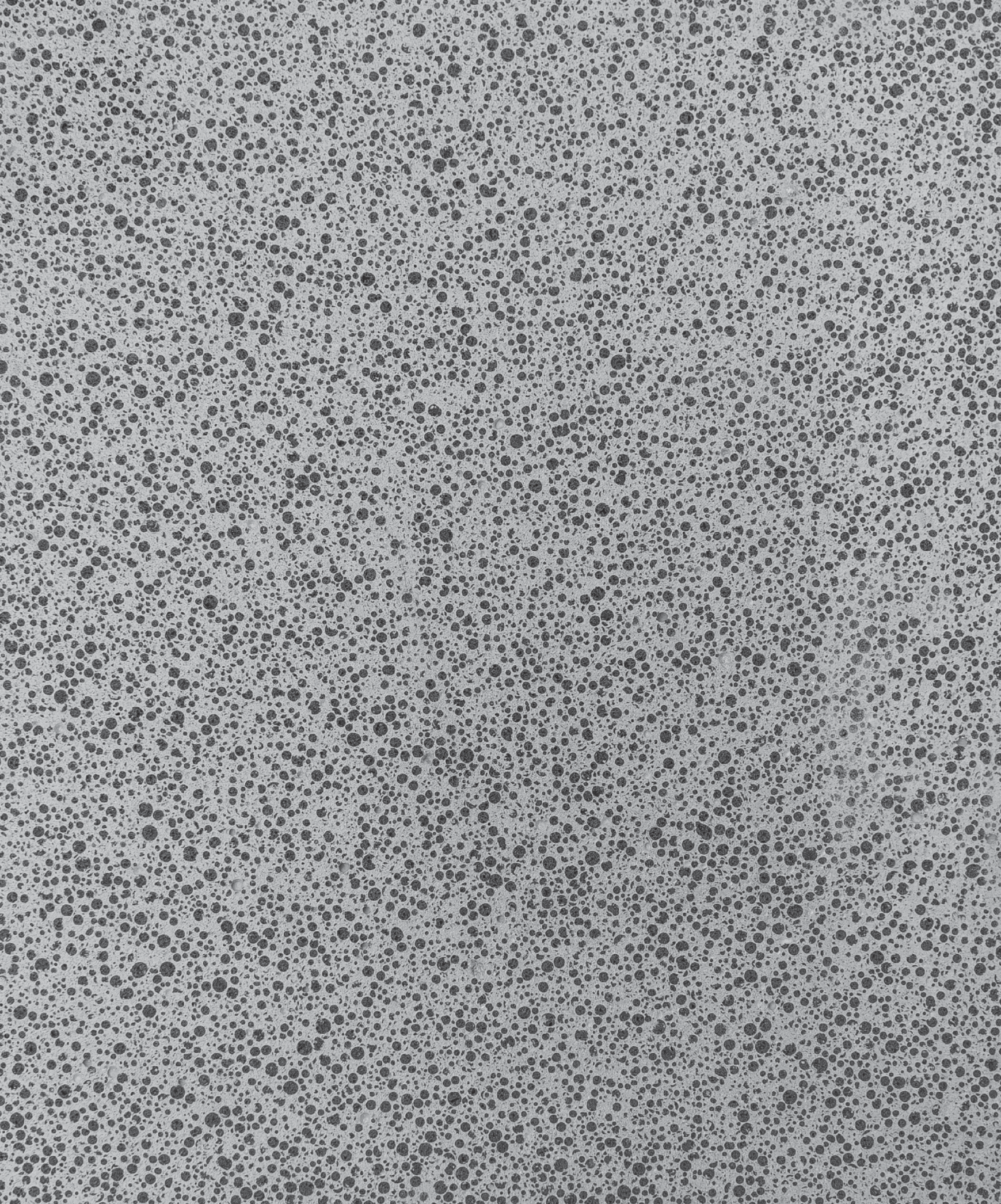
Danksagung

Das vorliegende Handbuch entstand unter Beteiligung vieler Autoren und Helfer.

Ein besonderer Dank gilt Dr. Alexander Hückler, der einen Großteil seiner Forschungsergebnisse über die Biegebemessung, das Verbund-, Riss- und Verformungsverhalten von Infraleichtbeton beisteuerte und mit Korrekturen und Anmerkungen einen wesentlichen Beitrag zum gesamten Buch leistete. Max Bauer und Prof. Matthias Schuler (Transsolar Energietechnik GmbH) verfassten das Kapitel zu den dynamischen Simulationen (Kapitel 6.4). Dr. Arndt Goldack bot Unterstützung mit Korrekturen und Hinweisen bei der Erarbeitung des Kapitels 7.

Dank gilt vor allem auch den vielen Mitarbeitern, Studenten und Tutoren der Fachgebiete »Entwerfen und Konstruieren – Massivbau« sowie »Baukonstruktion und Entwerfen« an der Technischen Universität Berlin, die mit großem persönlichem Engagement bei Simulation, Entwürfen, Studien, Testreihen bis hin zu Bau und Prüfung von Prototypen beteiligt waren.

Berlin, im Dezember 2017
Claudia Lösch, Philip Rieseberg,
Mike Schlaich, Regine Leibinger



Inhalt

Danksagung	5
1 Einleitung	11
2 Theoretische Grundlagen	13
2.1 Definition und Einordnung von Infraleichtbeton	14
2.2 Entwicklung von Leicht- und Infraleichtbeton	14
2.3 Gestalterisches Potenzial des Materials	19
3 Materialtechnologie	25
3.1 Zusammensetzung und Rohdichteklassen	26
3.2 Eigenschaften	27
4 Gebäudetypologien	31
4.1 Exemplarischer Gebäudetyp	33
4.2 Baulücke	38
4.3 Zeilengebäude	43
4.4 Einfamilienhaus	45
4.5 Punkthaus/Hochhaus	49
5 Baukonstruktive Leitdetails	55
5.1 Wandaufbauten	58
5.2 Deckenanschlüsse	60
5.3 Balkone und Auskragungen	64
5.4 Fensteranschlüsse	68
5.5 Fußpunkte	78
5.6 Attikaanschluss bei Flachdächern	86

6	Grundlagen der Planung	91
6.1	Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung	92
6.2	Infraleichtbeton im Kontext der EnEV	94
6.3	Bauphysikalische Eigenschaften	95
6.4	Dynamische simulationsbasierte Untersuchungen	104
6.5	Ökobilanz	110
6.6	Kosten	112
6.7	Rechtliche Grundlagen	113
7	Bemessungsansätze zur Tragwerksplanung	117
7.1	Grundlagen der Bemessung	118
7.2	Dauerhaftigkeit	120
7.3	Duktiles Bauteilverhalten	122
7.4	Ausgangswerte für die Bemessung	123
7.5	Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit	126
7.6	Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	133
7.7	Besonderheiten bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung	141
7.8	Konstruktionsgrundlagen	142

8	Baupraktische Aspekte	145
8.1	Geeignete Schalungen	146
8.2	Oberflächengestaltungen	146
8.3	Herstellung und Einbau	154
8.4	Ausschalfristen und Nachbehandlung	155
8.5	Oberflächenschutz – Hydrophobierung	156
8.6	Betonkosmetik und Nachbearbeitung	156
9	Ausgewählte Bauwerke	161
9.1	Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton, Berlin	162
9.2	Betonoase, Berlin	164
9.3	Einfamilienhaus, Aiterbach	166
9.4	Small House I, Technische Universität Kaiserslautern	168
10	Anhang	171
10.1	Beispielhafte Bemessungen	173
10.2	ω -Tafeln als Bemessungshilfe	182
10.3	Herausgeber und Autoren	202
10.4	Literatur	203
10.5	Abbildungsverzeichnis	209
10.6	Tabellenverzeichnis	212
10.7	Stichwortverzeichnis	213



1 Einleitung

Zur Nutzung dieses Handbuchs

Das vorliegende Handbuch ist das Ergebnis des interdisziplinären Forschungsprojekts »Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau« (INBIG) der TU Berlin, Fachgebiete »Entwerfen und Konstruieren – Massivbau« von Prof. Mike Schlaich sowie »Baukonstruktion und Entwerfen« von Prof. Regine Leibinger und Prof. Matthias von Ballestrem, gefördert von der Forschungsinitiative Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Im Zentrum dieses Forschungsprojekts an der TU Berlin steht der Baustoff Infraleichtbeton, ein wärmedämmender, konstruktiver Leichtbeton, mit dem sich Gebäude ohne zusätzliche Dämmschichten errichten lassen. Die Kombination von Lastabtrag und Wärmedämmung in einem monolithischen Material bewirkt eine robuste, wenig komplexe und langlebige Bauweise bei gleichzeitig hohem gestalterischen Potenzial. Diese Eigenschaften machen den Baustoff in Bezug auf Gestaltung, Brandschutz und Recyclingfähigkeit zu einer konkurrenzfähigen Alternative zu den heute üblichen mehrschichtigen Wandaufbauten.

Infraleichtbeton wird seit 2006 am Fachgebiet »Entwerfen und Konstruieren – Massivbau« der TU Berlin erforscht und weiterentwickelt. In der ersten Forschungsphase [1] wurden grundlegende Kenntnisse über die Herstellung und Verarbeitung gewonnen sowie ein erstes Gebäude realisiert. Während der zweiten Phase [2] konnte der ursprüngliche Infraleichtbeton maßgeblich weiterentwickelt, neue Erkenntnisse gewonnen und die Grundlage für diverse Forschungsprojekte – wie auch das INBIG-Projekt – geschaffen werden. Die in über zehn Jahren Forschungstätigkeit gewonnenen Erkenntnisse sind ebenfalls in dieses Handbuch eingeflossen. Die Inhalte stützen sich dabei auf Untersuchungen im Rahmen von Drittmittelprojekten, Dissertationen und studentischen Abschluss- bzw. Studienarbeiten.

Die Forschung geht selbstverständlich weiter, z. B. wird aktuell an einer weiteren Optimierung der Zusammensetzungen gearbeitet. Daher empfiehlt sich bei der Planung eines konkreten Projekts eine Recherche nach neuen Forschungsergebnissen.

Das Handbuch zielt darauf ab, die konstruktiven und architektonischen Möglichkeiten von Infraleichtbeton aufzuzeigen und konkrete Hilfestellung bei der Planung eines Gebäudes

mit einer Hülle aus diesem neuartigen Baustoff zu geben. Das Spektrum der Betrachtung reicht von der technischen Einführung in die Zusammensetzung, die Herstellung und die Eigenschaften des Baustoffs über Bemessungsansätze, praktische Anwendungsdetails und Verarbeitungshinweise bis hin zu Gestaltungsmöglichkeiten.

Das Handbuch versteht sich als Nachschlagewerk und ist thematisch in zehn Kapitel unterteilt. Verweise auf andere Kapitel, externe Publikationen und gebaute Referenzen erleichtern die Suche nach weiterführenden Informationen.

Das Buch liefert eine kurze Übersicht über die historische Entwicklung des Baustoffs und eine ebenso knapp gehaltene Liste einiger beispielhafter Bauwerke aus Infraleichtbeton, die im Kontext dieser Publikation nennenswert sind. Den Autoren geht es nicht um einen umfassenden historischen Rückblick oder die Zusammenstellung sämtlicher realisierter Bauwerke aus wärmedämmendem, konstruktivem Leichtbeton, sondern um einzelne, aus ihrer Sicht exemplarische Anwendungen des Materials.

Die dargestellten Ausführungsdetails sind als Planungshilfe und Anregung für das Entwerfen und Konstruieren anzusehen. Sie sind nach bestem Wissen an den aktuellen Stand der Bautechnik angepasst.

Mehrere realisierte Projekte bestätigen bereits jetzt die Praxistauglichkeit des Materials auf überzeugende Weise. Dennoch ist Infraleichtbeton bisher – Stand 2017 – kein Baustoff mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. Bis dato sind Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) Voraussetzung für den Einsatz des Materials. Die hier präsentierten Ansätze können als Basis für diese Verfahren dienen, sind jedoch für jeden Einzelfall zu prüfen, abzustimmen und ggf. den Erfordernissen des jeweiligen Bauvorhabens anzupassen.

Das Buch soll dazu dienen, die Verbreitung dieses leistungsfähigen Baustoffs zu fördern und einen Beitrag zum nachhaltigen Umgang mit global begrenzten Ressourcen zu leisten. Die Autoren und Herausgeber hoffen, dass das Resultat des hier vorgelegten fachübergreifenden Forschungsansatzes möglichst viele Leser ermutigt, ähnliche Wege zu beschreiten.



2 Theoretische Grundlagen

- 2.1 Definition und Einordnung von Infraleichtbeton
- 2.2 Entwicklung von Leicht- und Infraleichtbeton
- 2.3 Gestalterisches Potenzial des Materials

2.1 Definition und Einordnung von Infraleichtbeton

Infraleichtbeton ist ein konstruktiver Leichtbeton mit sehr geringer Rohdichte [1], 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 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 (NC). Die niedrige Rohdichte wird hauptsächlich durch den Einsatz leichter Gesteinskörnung erreicht, die sowohl industriell hergestellt als auch natürlich gewonnen werden können. Als industriell 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 Trockenrohichte unter 800 kg/m^3 grenzt er sich von den nach DIN EN 206 [5] definierten Leichtbetonen (Trockenrohichten 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 und nach Faust [7] als Hochleistungsleichtbeton (High Performance Lightweight Aggregate Concrete – HPLWAC) einzustufen ist.

2.2 Entwicklung von Leicht- und Infraleichtbeton

Obwohl Beton seit zwei Jahrtausenden verwendet wird und sich der moderne Stahlbeton in den letzten hundert Jahren als wichtigster Baustoff etabliert hat, zeigen derzeitige Entwicklungen, dass das Potenzial dieses Werkstoffs noch lange nicht ausgeschöpft ist. Auf dem Gebiet der leichten Betone kann der Infraleichtbeton als tragende Wärmedäm-

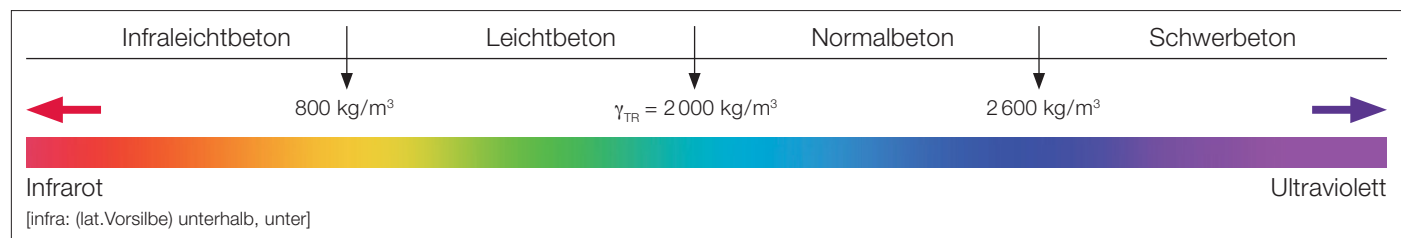


Bild 2-1 Einordnung Infraleichtbeton nach der Trockenrohichte ρ_{TR} [1]

mung Anforderungen erfüllen, die durch die Nachhaltigkeitsdiskussion, den Klimawandel und die Energiewende entstanden sind.

Die Forschung an der Technischen Universität Berlin hat zu infraleichten Betonen geführt, deren Rohdichte unterhalb der normalen Rohdichte von Leichtbetonen liegt und die es erlauben, Häuser mit Sichtbetonwänden ohne weiteres Wärmedämmmaterial zu bauen.

Die Geschichte der leichten Betone bis zum Infraleichtbeton soll hier kurz gestreift werden. Zur Geschichte des Betons selbst sei auf die Fachliteratur verwiesen.

Antike

Das bekannteste frühe Leichtbetontragwerk ist wohl das Dach des Pantheons in Rom, dessen Bau von Kaiser Trajan im Jahr 114 nach Christus begonnen und von Hadrian rund zehn Jahre später fertiggestellt wurde. Um das Gewicht der Kugelschale zu reduzieren, verwendeten die Römer Tuffstein als leichte Gesteinskörnung für ihr »Opus Caementitium«.



Bild 2-2 Dach des Pantheons in Rom

Leichte Schiffe

Interessanterweise beginnt der moderne Leichtbetonbau im Schiffsbau: Zu den frühen Betonbauten gehört auch ein »Schiff«, der Betonkahn von Joseph Louis Lambot. Um teu-

ren Stahl und Gewicht zu sparen, begannen die U.S.-Amerikaner im Ersten Weltkrieg Schiffe aus Leichtbeton herzustellen. Das Tankschiff USS Selma war 7 500 t schwer und erreichte eine Länge von 132 Metern! Zu verdanken war dies der patentierten Idee von Stephen J. Hayde, dem es gelang, in den Drehöfen seiner Firma Haydite leichte Gesteinskörnung aus Tonschiefer (»shale«) herzustellen. Die USS Selma wurde erst nach dem Krieg fertiggestellt und diente danach über viele Jahre erfolgreich friedlichen Zwecken. Diese ersten Erfolge führten dazu, dass die U.S. Marine im Zweiten Weltkrieg dann über 100 Frachtschiffe aus Leichtbeton herstellte. [8]

Leichtbeton im Hochbau

Die Erfahrungen im Schiffsbau führten dazu, dass leichter Ortbeton seit den 1920er-Jahren zuerst in den U.S.A, dann aber weltweit auch im Hochbau eingesetzt wurde. Gewichtsreduktion beim Tragwerk führt zu Ersparnissen in der Gründung und weniger bewegter Masse im Erdbebenfall. Als erstes Hochhaus aus Leichtbeton gilt das Park Plaza Hotel in St. Louis von 1929, bekannter sind wohl die 60 Stockwerke hohen und 1964 fertiggestellten Türme der Marina City in Chicago (► *siehe Bild 2-4*).

Auch im Brückenbau kann das geringe Gewicht von Leichtbeton wie auch die gute Frost-Tau- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit vorteilhaft genutzt werden. Besonders ansprechende Beispiele sind die von Ulrich Finsterwalder entworfene Dyckerhoff-Fußgängerbrücke (► *siehe Bild 2-5*) in Wiesbaden-Schierstein von 1967 und die Wartungshalle V (► *siehe Bild 2-7*) am Flughafen Frankfurt von Helmut Bomhard, eine mit Leichtbeton eingedeckte Spannbandkonstruktion aus dem Jahr 1972. Moderne Leichtbetone können trotz geringer Rohdichte hohe Festigkeiten erreichen. Die vor Kurzem fertiggestellten, weit auskragenden Dächer der Tramhaltestellen (► *siehe Bild 2-3*) vor dem Berliner Hauptbahnhof sind aus einem LC45/50 hergestellt, der nur 1 600 kg/m³ wiegt.



Bild 2-3 Tramhaltestelle Berlin Hauptbahnhof (Foto: Hans Joosten)



Bild 2-4 Marina City Towers



Bild 2-5 Dyckerhoffbrücke (Brücke Rheinhafen Schierstein;
Foto: Cengiz Dicleli)

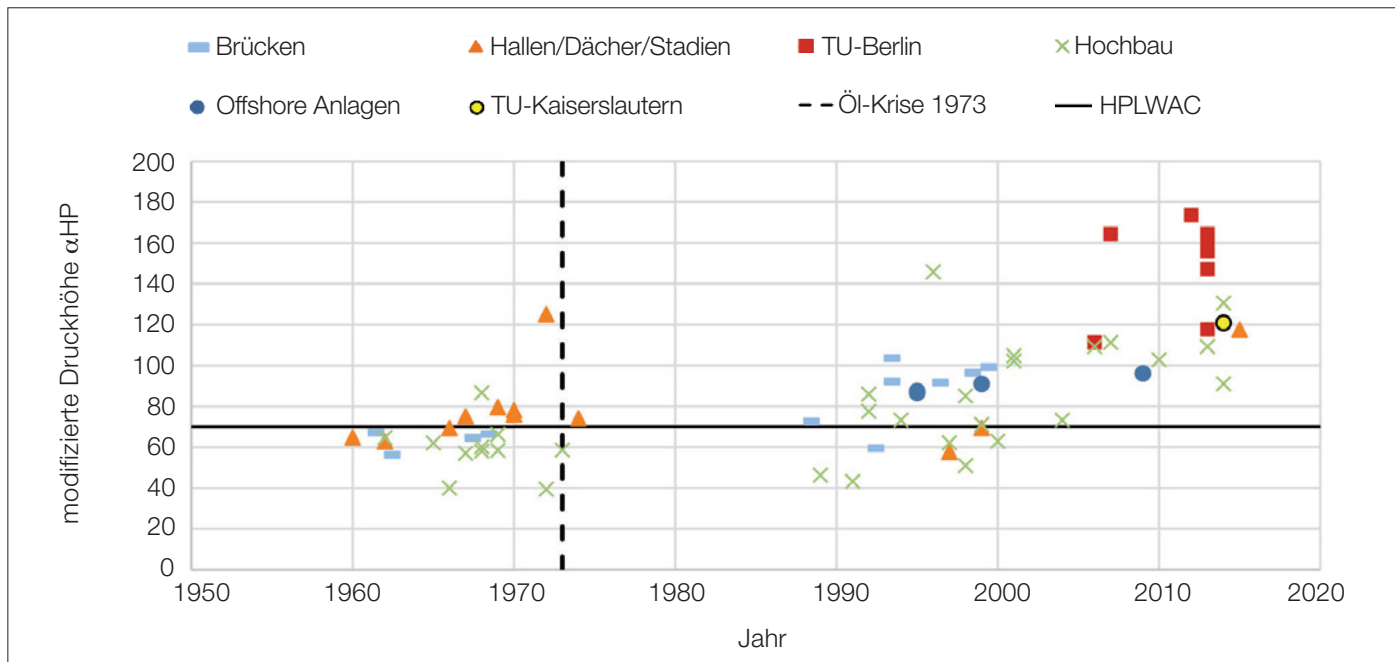


Bild 2-6 Historische Entwicklung der Leistungsfähigkeit von Leichtbeton ([9], basierend auf [10])



Bild 2-7 Lufthansa-Technik-Wartungshalle V (Foto: Yoshito Isono)

Die Ölkrise und neuer Leichtbeton

Das Aufblähen von Ton oder Glas zu leichter Gesteinskörnung geschieht bei sehr hohen Temperaturen und mit entsprechend hohem »Energieverbrauch«. Der Schock der ersten Ölkrise 1973 und die steigenden Energiepreise führten, wie Bild 2-6 zu entnehmen, zu einem fast zwanzigjährigen Stillstand des Leichtbetonbaus. Natürlich wurde und wird Leichtbeton wegen seines geringen Gewichts weiter im Hoch- und Brückenbau verwendet. Kurioserweise waren es aber Überlegungen zur Energieeinsparung, die Leichtbeton seit einigen Jahren im Hochbau wieder besonders attraktiv machen. Die Wärmedämmeigenschaften von Leichtbeton wurden vor allem von Schweizer Architekten wiederentdeckt und im Wohnungsbau genutzt. Patrick Filipaj zeigt in seinem bedeutenden Buch »Architektonisches Potenzial von Dämmbeton« [6] die Vielfalt des modernen Schweizer Sichtbetonbaus.



Bild 2-8 Einfamilienhaus in Berlin, 2007

Erforschung des Infraleichtbetons in Berlin

Leichte Betone mit Trockenrohdichten über $1\,000\text{ kg/m}^3$, wie sie in der Schweiz verwendet wurden, leiten Wärme allerdings immer noch zu gut, um die Vorgaben der neuen Energieeinsparverordnungen einhalten zu können. Deshalb werden an der Technischen Universität Berlin seit 2006 infraleichte Betone untersucht [11], deren Trockenrohdichte unter 800 kg/m^3 liegen und mit denen Wärmeleitfähigkeitswerte deutlich unter $\lambda_{10^\circ, \text{tr}} = 0,2\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ erreicht werden. Schon 2007 wurde ein erstes Haus damit gebaut [1], und 2012 wurden die Forschungsergebnisse einer Weiterentwicklung mit einem Holcim-Innovationspreis honoriert [12]. Mittlerweile ist Infraleichtbeton theoretisch und experimentell so weit durchgedrungen, dass seiner Anwendung in der Praxis immer weniger im Wege steht.

Stand der Forschung

An der TU Berlin wird kontinuierlich weitergeforscht. Zu den Drittmittelprojekten gehören:

- INBIG – Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau, gefördert von Zukunft Bau, ein Projekt, das in einer Kooperation von Architekten und Ingenieuren bearbeitet wurde,
- ein DFG-Projekt zur Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von biegebeanspruchten Infraleichtbetonbauteilen,
- ein im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts C^3 – Carbon Concrete Composite laufendes Teilprojekt (C^3 B4), das sich mit carbonbewehrtem Infraleichtbeton beschäftigte, sowie
- das ebenfalls BMBF-geförderte Projekt MultiLC – Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften. Letzteres hat es sich zum Ziel gesetzt, basierend auf Infraleichtbeton, Bauteile zu entwickeln, deren Eigenschaften über den Querschnitt variieren, und diese mit weiteren Funktionalitäten, wie z. B. aktiver Dämmung oder photokatalytischen Deckschichten zur Verbesserung der Luftqualität, zu versehen,
- das Forschungsprojekt ILVO – Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton, gefördert von der DBU, in dem Infraleichtbeton (ILC)-Fertigteile entwickelt und anschließend bei einem Geschosswohnungsbau der HOWOGE Wohnungsbaugesellschaft mbH umgesetzt werden.

Daneben existiert eine Vielzahl an internen Forschungsarbeiten zu verschiedenen Themenbereichen.

Das Interesse an Dämmbeton allgemein ist groß, weshalb auch die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich durchaus bemerkenswert sind. Auf dem Gebiet des Leichtbetons bzw. Infraleichtbetons sind insbesondere die umfangreichen Arbeiten von Prof. Karl-Christian Thienel, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr München, sowie die Forschung von Prof. Wolfgang Breit, Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen, Technische Universität Kaiserslautern, hervorzuheben. Prof. Thienel beschäftigt sich seit Jahrzehnten mit Leichtbeton und hat u. a. maßgeblich bei der Entwicklung des infraleichten Betons für das Einfamilienhaus Thalmaier in Aiterbach, 2016, mitgewirkt (► *vgl. Kap. 9.3 und [13]*). Auch bei den anfänglichen Arbeiten der TU Berlin am Infraleichtbeton im Jahr 2006 stand Prof. Thienel (UniBW München) zusammen mit Prof. Hillemeier (TU Berlin) beratend zur Seite. Prof. Breit hat einen infraleichten »Architekturleichtbeton« entwickelt, mit dem 2012 in Kaiserslautern das Experimentalgebäude »Small House I« errichtet wurde (► *vgl. Kap. 9.4 und [14]*).

Neben der Forschung tragen auch die erforderlichen Arbeiten zur Erteilung von Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) zur weiteren Entwicklung bei. Eine ZiE wurde bereits für den infraleichten Beton des Hauses Thalmaier erteilt, eine weitere ZiE wurde für die Jugend-Freizeiteinrichtung »Betonoase« in Berlin vergeben (► *vgl. Kap. 9.2*).

Hat Infraleichtbeton Zukunft?

Auch Infraleichtbetone können sich nicht mit der Wärmeleitfähigkeit nichttragender Wärmedämmung messen. Filipaj schreibt 2013: »Deshalb sind für Gebäudehüllen aus Dämmbeton die erheblich verschärften Wärmedämmvorschriften mit geforderten U-Werten von $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ beim Einzelbauteilnachweis zu einer fast unüberwindbaren Hürde geworden...« [15]. Wenn man aber das Gebäude als Ganzes sieht, Bodenplatte, Dach und Fassade zusammen berücksichtigt, alternative Heiz- und Kühlmethoden einbezieht und gar neuartigen Ansätzen, wie der Verwendung von Kapillarrohrmatten zur Wandheizung und -kühlung mit Grundwasser, offen gegenübersteht, dann sind dem Bauen mit Infraleichtbeton keine Grenzen gesetzt.



Bild 2-9 Prototyp zum Smart Material House aus Infraleichtbeton

Forschungsbedarf besteht aber weiter. Vor allem die Graue Energie und damit auch der »CO₂-footprint«, die der Zement, die Betonzusatzstoffe und die leichte Gesteinskörnung im Infraleichtbeton mit sich bringen, müssen weiter verringert werden. Erst wenn uns saubere, erneuerbare und preiswerte Energie aus der Sonne dauerhaft zur Verfügung steht, wird das Bauen mit Wärmedämmung an Relevanz verlieren.

2.3 Gestalterisches Potenzial des Materials

Infraleichtbeton – vom Baustoff zur Form

Setzt man bei der architektonischen Planung eines Projektes ein bestimmtes Baumaterial als gegeben voraus, anstatt von völliger Freiheit und Offenheit im Hinblick auf Form, Struktur und Materialität auszugehen, gilt es, sich der spezifischen Logik bewusst zu werden, die dem jeweiligen Material inneohnt. Plant man also ein Gebäude mit einer tragenden und dämmenden Hülle aus Infraleichtbeton, stellt sich die Frage

nach einem schlüssigen, d. h. werkstoffgerechten Umgang mit dem Material und der sich daraus ergebenden Form.

Von Louis Kahn ist eine bekannte Anekdote überliefert. Gegenüber seinen Studenten beschrieb er 1963 die Frage des Architekten nach dem Zusammenspiel von Baustoff, Form und Konstruktionsprinzip am Beispiel des Mauerwerksbaus wie folgt:

»If you think of Brick, you say to Brick, ›What do you want, Brick?‹ And Brick says to you, ›I like an Arch.‹ And if you say to Brick, ›Look, arches are expensive, and I can use a concrete lintel over you. What do you think of that, Brick?‹ Brick says, ›I like an Arch.‹ «

Übersetzung auf Deutsch: »Wenn man an Backstein denkt, dann sagt man zum Backstein: ›Was willst du, Backstein?‹ Und der Backstein antwortet dir: ›Ich mag den Bogen.‹ Du wiederum sagst zum Backstein: ›Schau, Bögen sind teuer, aber ich kann einen Sturz aus Beton über dir verwenden. Was denkst du darüber, Backstein?‹ Und Backstein antwortet: ›Ich mag den Bogen.‹ « (Louis Kahn, 1971, Master class at Penn [16]). Einen neuen Baustoff wie Infraleichtbeton sollten wir dementsprechend auch befragen, was er gerne sein möchte. Wir müssen herausfinden, welche Erscheinungsform seiner inneren Logik am ehesten entspricht.

In der Architektur stehen Ausdruck und Form in direktem Zusammenhang mit dem zum Einsatz kommenden Material bzw. seiner Transformation in einen generisch einsetzbaren Baustoff. Stoff und Form stehen also in einem unmittelbaren Wirkungsverhältnis zueinander. In seinem Artikel »Stoff, Form, Hylenmorphismus – Zum Verhältnis von Konstruktion und Philosophie« beschreibt der Architekturtheoretiker Jörg H. Gleiter das bei Aristoteles unter dem Begriff des Hylenmorphismus beschriebene Verhältnis von Stoff und Form wie folgt: *»Sinnlich erfahrbar in der Wirklichkeit dagegen wird der Stoff nur in der Bindung durch Form. In der Form wird eines der in der Materie angelegten Möglichkeitspotenziale realisiert.«* [17]

Die Baustoffe manifestieren sich in archaischen Grundformen, sogenannten epistemischen Objekten. Im Fall des Lehms ist der getrocknete oder später gebrannte Ziegelstein das Grundmodul, im Stahlbau ist es spätestens seit Ludwig Mies van der Rohe der Doppel-T-Träger. Beim Bauen und

Entwerfen mit Infraleichtbeton gilt es nun zu klären: Was ist das epistemische Objekt des Materials?

Die dicke Wand als epistemisches Objekt

Ähnlich wie bei Stahlbeton handelt es sich bei Infraleichtbeton um ein Kompositmaterial aus Beton und Stahl, also einen Materialverbund aus zwei Grundbaustoffen. Der Infraleichtbeton jedoch erweitert die Eigenschaften des Stahlbetons: Zum Abtragen von Lasten, zum Überwinden von Spannweiten und zur freien Formbarkeit kommt die Eigenschaft der Wärmedämmung hinzu. Trotz seiner enormen Leistungsfähigkeit ist Beton von seinem spezifischen Gewicht her ein schweres Baumaterial. Dämmstoffe hingegen sind immer ausgesprochen leichte Baustoffe, meist erreichen sie ihre dämmende Wirkung durch einen hohen Luftporenanteil. Der Infraleichtbeton verbindet also die Potenziale des Schweren mit der Eigenschaft des Leichten. Gerade aus dieser Verbindung gegensätzlicher Eigenschaften ergibt sich ein primäres Charakteristikum des Materials: Anders als beim Stahlbeton ist dem Infraleichtbeton inhärent, dass er in großen Materialdicken und Volumina eingesetzt wird. Erst so entwickelt er seine Vorzüge gegenüber anderen Baumaterialien. Daraus ergibt sich die These, dass sich die dicke Wand als primäres architektonisches Element, als dem Material inhärentes epistemisches Objekt erweist. Die einfache, monolithische dicke Außenwand ist das Grundmodul bei der Konzeption eines Gebäudes aus Infraleichtbeton.

Einfach, monolithisch, robust

»So hat mich jedes Mal, wenn ich den tiefsten Sinn der Welt zu erfüllen glaubte, vor allem ihre Einfachheit erschüttert.« (A. Camus [17])

Die Sehnsucht vieler Architekten nach Einfachheit und der Wunsch nach einem Einklang von Ausdruck und Konstruktion sind häufig treibende Kräfte im architektonischen Entwurfsprozess. Die daraus resultierende Idee, Werkstoffe mit höherer Komplexität zu entwickeln, die unterschiedliche Anforderungen erfüllen, ist nicht neu. Genannt sei hier nur exemplarisch der Ziegelstein mit Hohlräumen, die zusätzlich durch hochdämmende Materialien gefüllt werden, oder auch

die massive Wand aus Leichtlehm, die mit natürlichen Faserstoffen armiert wird.

Infraleichtbeton besteht im Vergleich mit diesen Baustoffen nicht nur durch die Möglichkeit, ihn als Baustoff für die monolithische, glatte und dicke Wand einzusetzen und damit den Schichtenaufbau der Wand radikal zu reduzieren. Er ist darüber hinaus frei formbar und ermöglicht unterschiedlichste Arten der Oberflächenbehandlung und sogar Ornamentik. Durch sein hohes Potenzial des Lastabtrags bis hin zur Biegebeanspruchung ermöglicht er, monolithisch zu konstruieren, d. h. sogar vorstehende, auskragende Bauteile aus einem einzigen Baustoff ohne Hilfskonstruktionen und Bauteilanschlüsse herzustellen.

Anders als viele hochadaptive High-Tech-Baustoffe steht Infraleichtbeton dennoch für einen Ansatz der technologischen Reduzierung und des bewusst Einfachen. Damit verbunden ist die Hoffnung, Gebäude mit niedrigem Instandhaltungsaufwand errichten zu können, die aufgrund ihrer Dauerhaftigkeit und Robustheit langfristig ökologisch nachhaltig sind.

Die dicke Wand – Grundriss und Detaillierung

Beim Entwerfen eines Gebäudes mit Außenwänden aus Infraleichtbeton steht also der Umgang mit dem Primärelement der dicken Wand im Zentrum der Betrachtung. Die ab der Phase der architektonischen Moderne beginnende zunehmende Reduktion der Außenhülle auf ein schlankes Bauteil, das im Plan von den inneren Trennwänden fast nicht mehr zu unterscheiden ist, gibt bei der Entwicklung eines architektonisch-gestalterischen Umgangs mit der dicken Außenwand kaum Hilfestellungen. Daher verweisen viele Autoren darauf, vorhergehende Epochen der Architektur und deren damals noch aus konstruktiven Notwendigkeiten abgeleiteten Umgang mit der dicken Außenwand als gestalterisches architektonisches Element zu Rate zu ziehen. Insbesondere die Barockarchitektur mit den hier üblichen Pochés wurde bei zeitgenössischen Architekturen aus Dämmbeton immer wieder zitiert und als Referenz herangezogen. Pochés sind hier als zusätzliche Raumsituationen zu sehen die sich aus unterschiedlichen Modulationen der Wanddicken ergeben. »Die als Poché wirksam gebaute Masse kann durch Porosität oder als raumhaltige Wand selbst wiederum Innen-

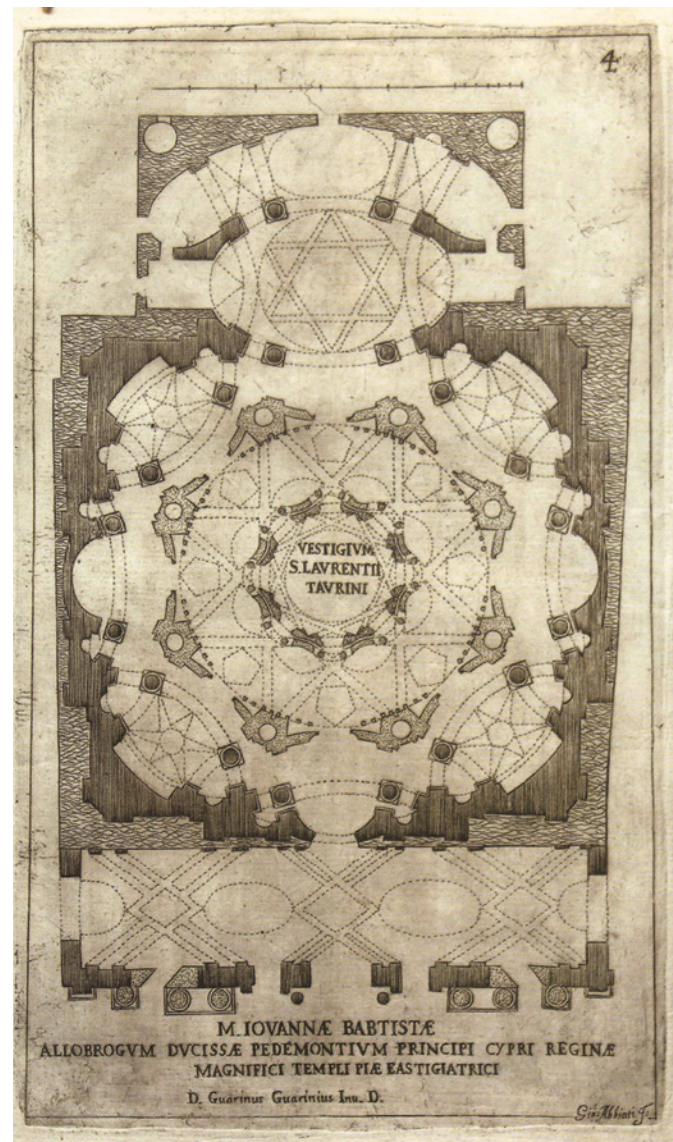


Bild 2-10 San Lorenzo, Turin, Guarino Guarini (Quelle: »Architettura civile«, tav. 4, Torino, 1737)

räume enthalten, die gegenüber den Haupträumen indessen als untergeordnete Kammern, Nebenräume, Schränke und Ähnliches im Hintergrund bleiben.» [18]

Der Infraleichtbeton bietet aufgrund seines erhöhten Tragverhaltens bei gleichzeitig verhältnismäßig hoher Wärmedämmfähigkeit zudem die Möglichkeit, thermisch begrenzende

Geschossdecken oder das Dach aus dem Material auszubilden und ein Haus aus »einem Guss« zu errichten.

Die dicke Wand stellt aber auch besondere Bedingungen an angrenzende Bauelemente wie Fenster, Türen oder Deckeneinbindungen. Sie fordert dazu heraus, sich mit diesen Schnittstellen in Bezug auf die Räumlichkeit auseinanderzusetzen. Im Zusammenspiel mit der Wand kann z. B. das Fenster in vielfältiger Art ausgebildet werden: »*Querschnitte aus Dämmbeton bieten sich geradezu an, mit zusätzlichen Funktionen versehen zu werden, wie Fensteröffnungen mit seitlichen Sitzgelegenheiten oder Nischen für wandbündige Schränke und Regale.*« (P. Filipaj [19])

Der in einem Wettbewerb prämierte Gebäudeentwurf für ein Wohnhochhaus in Berlin (► *vgl. Kap. 4.5*) zeigt einige Aspekte der gestalterischen Einsatzmöglichkeiten des Infraleichtbetons. Hier bildet sich die äußere Gebäudeform im Innenraum analog ab. Die Fensteröffnung mit ihrer großen Laibung wird unter Hinzuziehung einer zusätzlichen Scheibe als adaptiver thermischer Puffer genutzt. Das Material bestimmt die Form des Gebäudes in entscheidender Weise, und diese Form findet sich in analoger Weise bis in den Innenraum hinein wieder.

Die Leichtigkeit der »schweren« Hülle

Als Beispiele für das Erscheinungsbild von Gebäuden aus massivem Beton kommen dem Betrachter schnell die massiven Betonarchitekturen eines späten Bauwerks von Le Corbusier (Notre-Dame-du-Haut, Ronchamps oder Sainte-Marie de la Tourette) oder die archaisch anmutenden Gebäude von Marcel Breuer in den Sinn. Auch die textil erscheinenden Betongebäude des spanischen Architekten Miguel Fisac oder die Formfindungen des italienischen Architekten Angelo Mangiarotti stehen stellvertretend für die Vielzahl architektonischer Wege, die ein Material mit der Möglichkeit der Freiform eröffnet.

Dabei sollte jedoch nicht vergessen werden, dass es sich bei Infraleichtbeton per Definition nicht um ein Element der »Schwere« handelt. Anders als konventioneller Stahlbeton ist Infraleichtbeton deutlich leichter als Wasser. Ein Gebäude aus Infraleichtbeton, egal wie dick die Wände auch immer ausgebildet werden, hat eher den Charakter eines Leichtbaus als den eines »Massivbaus«. Gerade für diese Dualität

des Materials – also die gleichzeitige Präsenz von Schwere und Leichtigkeit – gilt es, den entsprechenden architektonischen Umgang und vielfältige Ausdrucksformen zu finden.

Das Maß an gestalterischen und konstruktiven Möglichkeiten, mit anderen Worten das dem Material innewohnende architektonische Potenzial, ist hoch. Nun gilt es, seine Grenzen auszuloten.



Bild 2-11 Wohnhaus in Leymen, Herzog & de Meuron (Foto: Margherita Spillutini)



3 Materialtechnologie

3.1 Zusammensetzung und Rohdichteklassen

3.2 Eigenschaften

Leichtbeton wird nach verschiedenen Kriterien klassifiziert. Dazu gehören u. a. Trockenrohddichte, Druckfestigkeit und Art des Gefüges. Als Maß für die Leistungsfähigkeit eines Leichtbetons dient die sogenannte Druckhöhe, in die Festigkeit und Rohddichte eingehen (vgl. [7]). Infraleichtbeton ist aufgrund seiner Leistungsfähigkeit als Hochleistungsleichtbeton (High Performance Lightweight Aggregate Concrete – HPLWAC [7]) einzustufen und liegt mit einer Trockenrohddichte $\leq 800 \text{ kg/m}^3$ außerhalb der im Eurocode (EC) 2 [20] geregelten Leichtbetone. Trotz seiner niedrigen Trockenrohddichte besitzt ILC ein geschlossenes Gefüge und gehört damit nicht zu den haufwerksporigen Betonen, sondern zu den gefügedichten bzw. konstruktiven Leichtbetonen (► vgl. Kap. 2.1).

3.1 Zusammensetzung und Rohdichteklassen

Infraleichtbeton gemäß der an der TU Berlin entwickelten Zusammensetzung [2] besteht aus den Bestandteilen Zement, Wasser, leichte Gesteinskörnung, Silikastaub, Fließmittel und Stabilisierer.

Die Zusammensetzungen basierend auf Blähton als leichte Gesteinskörnung sind in verschiedenen Veröffentlichungen zu finden (vgl. z. B. [1, 2, 21]). Die Zusammensetzungen werden an der TU Berlin kontinuierlich weiterentwickelt, weshalb sich zur Planung eines konkreten Projektes eine Recherche bezüglich neuer, verbesserter Zusammensetzungen empfiehlt.

Zum Zeitpunkt der Entstehung dieses Buches stehen Zusammensetzungen für Trockenrohddichten zwischen 600 und 800 kg/m^3 , bezeichnet mit ILC600 bis ILC800 (Tabelle 3-1), zur Verfügung, die mit mittleren Druckfestigkeiten zwischen ca. 5 und 13 MPa (Tabelle 3-2) einhergehen. Dabei sind die Rohdichteklassen in Abgrenzung zu Leichtbeton nach EC2 [20] gemäß Tabelle 3-1 zu verstehen.



Bild 3-1 Bestandteile Infraleichtbeton (Foto: Alexander Hückler)

3.2 Eigenschaften

Die nachfolgend geschilderten Eigenschaften wie auch die in späteren Kapiteln erläuterten Erkenntnisse beziehen sich auf die Zusammensetzungen aus der Dissertation »Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC)« von Hückler [21].

Im Folgenden sind die wesentlichen Kennwerte für die verschiedenen ILC-Klassen zusammengefasst. Die Angaben basieren auf umfangreichen Versuchsreihen von Hückler [21] und haben für die angegebene Zusammensetzung Gültigkeit. Detailliertere Angaben finden sich in Kapitel 7.

	Infraleichtbeton					Leichtbeton nach EC2 [20]					
	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800						
Rohdichteklasse	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Trockenrohddichte ρ_{tr} [kg/m ³]	551 bis 600	601 bis 650	651 bis 700	701 bis 750	751 bis 800	801 bis 1000	1001 bis 1200	1201 bis 1400	1401 bis 1600	1601 bis 1800	1801 bis 2000

Tabelle 3-1 Rohdichteklassen von Infraleicht- und Leichtbeton [21]

Kennwerte

	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
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 Gesteinskörnung (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
experimentell ermittelte Eigenschaften (gewichtete Mittelwerte; detaillierte statistische Auswertung, Prüfkörperabmessungen und -durchführung in Hückler [21] dokumentiert)					
Frischbetonrohddichte ρ_{frisch} [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
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/m·K]	0,141	0,153	0,166*	0,178*	0,193
* linear interpoliert					

Tabelle 3-2 Zusammensetzung und dazugehörige Eigenschaften von Infraleichtbeton, basierend auf [21, 22]

Konsistenz/Verarbeitbarkeit

Infraleichtbeton gemäß Tabelle 3-2 ist als nahezu selbstverdichtend konzipiert. 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 von ILC beim Einbau durch Rütteln ist dementsprechend nicht erforderlich und auch nicht empfehlenswert, da hierbei die Betoneigenschaften Festigkeit und Rohdichte bzw. Wärmeleitfähigkeit entscheidend verändert werden. Gegebenenfalls können einzelne Verdichtungsmaßnahmen (z. B. Außenrüttler, Stochern in den Ecken) aus optischen Gründen hilfreich sein, um z. B. Betonierhorizonte an der Oberfläche zu vermeiden (► *vgl. Kap. 8.3*).

Temperaturentwicklung

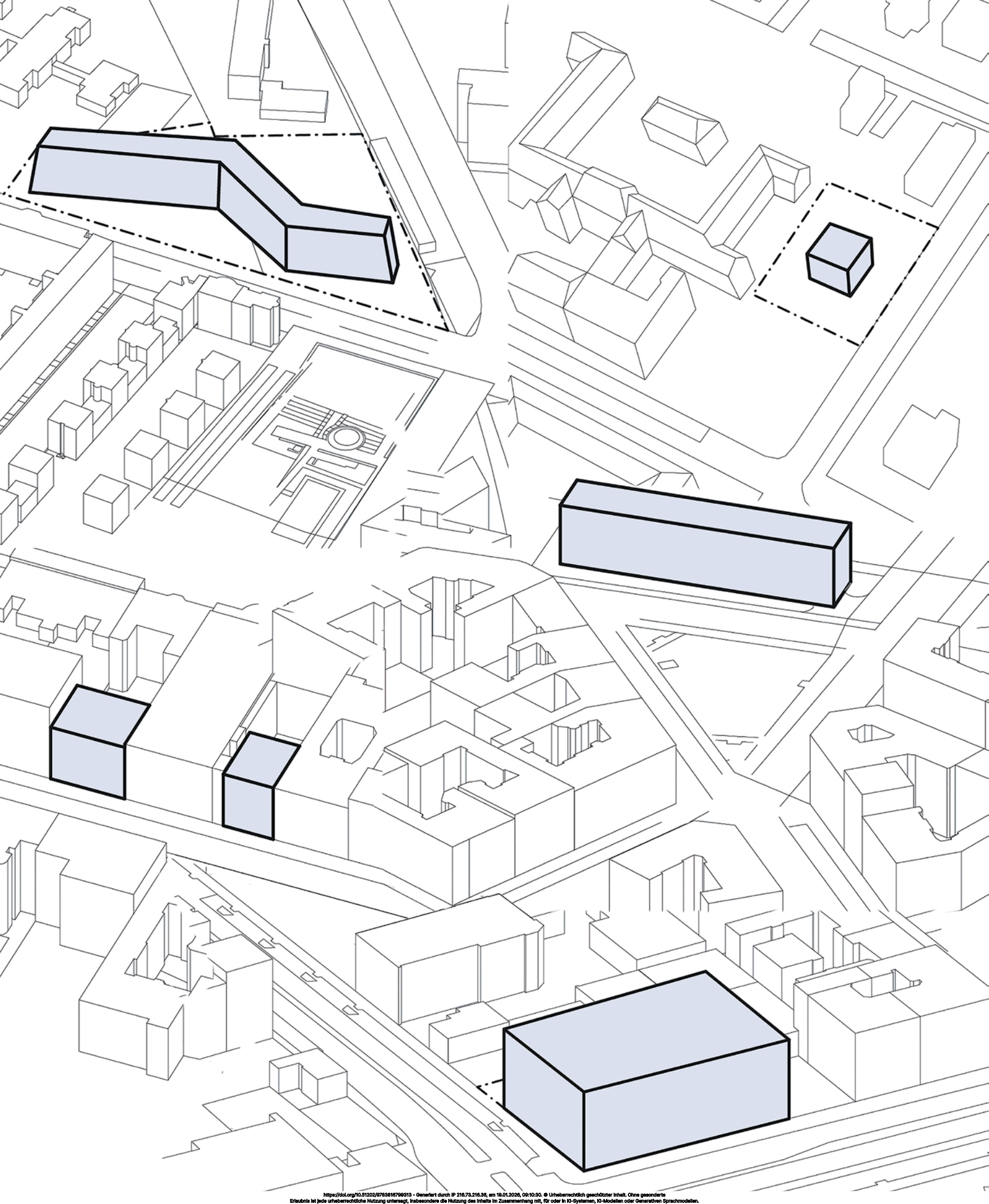
Der Temperaturanstieg T im Frischbeton während der Hydratation hängt vom Zementgehalt z , der Hydratationswärme H des Zements und der Wärmespeicherung (Produkt aus Rohdichte ρ und spezifischer Wärmekapazität c) ab [7].

$$T = z \cdot H / (c \cdot \rho) \quad (1)$$

Aus dem Zusammenhang lässt sich schließen, dass bei Leichtbeton ein stärkerer Temperaturanstieg im Vergleich zu Normalbeton stattfindet, da die Rohdichte ρ geringer ist, während die spezifische Wärmekapazität c für Normal- und Leichtbeton ähnliche Größenordnungen aufweist [7]. Zudem kann die Hydratationswärme aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit bei Leichtbeton nur verzögert abfließen.

Auch Infraleichtbeton geht mit einem verstärkten Temperaturanstieg aufgrund von Hydratation einher. Um dem entgegenzuwirken wurde für die hier vorgestellten Rezepturen 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 3-2 mit unterschiedlicher Temperaturentwicklung zu rechnen. Für ILC800 wurden bei einer Wanddicke von 45 cm beispielsweise Temperaturen bis zu 82 °C gemessen. Daher ist eine sorgfältige

Nachbehandlung (► *vgl. Kap. 8.4*) 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 (► *vgl. Kap. 9.3 und [13]*).



4 Gebäudetypologien

- 4.1 Exemplarischer Gebäudetyp
- 4.2 Baulücke
- 4.3 Zeilengebäude
- 4.4 Einfamilienhaus
- 4.5 Punkthaus/Hochhaus

Ziel der hier dargestellten Typologien ist es, Grundprinzipien bei der Konzeption und Konstruktion eines Gebäudes aus Infraleichtbeton aufzuzeigen. Sie sollen grundlegende gestalterische Möglichkeiten präsentieren und erste Orientierung im Hinblick auf einige Grundparameter, wie Wanddicken, Fensterflächenanteile, Öffnungsbreiten etc., vermitteln.

Es geht dabei ausdrücklich nicht darum, konkrete gestalterische Vorgaben für den Umgang mit dem Baumaterial Infraleichtbeton zu machen. Die Skizzen verzichten absichtlich auf entwurfliche Ausdifferenzierungen, wie z.B. Sockelgeschosse, Gebäudeabschlüsse oder Oberflächengestaltungen, mit der Absicht, dem Leser und Anwender möglichst viel Raum bei der Entwicklung eigener ästhetischer und technischer Ansätze zu überlassen.

Um den Umfang überschaubar zu halten, konzentriert sich die Betrachtung hauptsächlich auf den Geschosswohnungsbau, da sich dieser aufgrund der hohen energetischen Anforderungen einerseits und der statischen Belange andererseits besonders für den Einsatz von Infraleichtbeton eignet. Es soll an dieser Stelle nicht so verstanden werden, dass sich Infraleichtbeton nur für den Wohnungsbau eignet. Auch im Nichtwohnungsbau bietet Infraleichtbeton Vorteile und viele Anwendungsmöglichkeiten, die es in Zukunft sinnvoll zu nutzen gilt.



Bild 4-1 Gebäudetyp freistehendes Wohngebäude

4.1 Exemplarischer Gebäudetyp

Exemplarischer Aufbau eines freistehenden, mehrgeschossigen Wohngebäudes aus Infraleichtbeton

Als erste Annäherung an einen Gebäudeentwurf aus Infraleichtbeton ist es aus Sicht eines Planers zunächst notwendig, für einige der folgenden Fragen grundlegende Orientierungshilfen zu haben:

- Wie ist der grundlegende strukturelle Aufbau des Gebäudes? Welche Bauteile sind aus Infraleichtbeton und welche aus anderen konventionellen Baustoffen?
- Wie hoch kann ich bauen und welche Kombination aus Festigkeit und Wanddicke wird für die tragenden Außenwände benötigt?
- Welche Kombination aus Rohdichte und Wanddicke von Infraleichtbeton benötige ich, um die energetischen Anforderungen zu erfüllen?
- Welche Arten von Öffnungen sind möglich? Wie hoch ist der Öffnungsanteil?
- Baue ich in Ortbeton, Mischbauweise oder ggf. komplett in Fertigteilbauweise?

Der strukturelle Grundentwurf eines Beispielgebäudes (freistehendes Wohngebäude) dient dazu, für ein beliebiges Gebäude aus Infraleichtbeton Parameter für die entwürfliche und statische Vorplanung zu liefern. Die Parameter werden in Kap. 6.1 tabellarisch zusammengefasst (► *siehe hierzu Tabelle 6-1 zur Vorbemessung*).

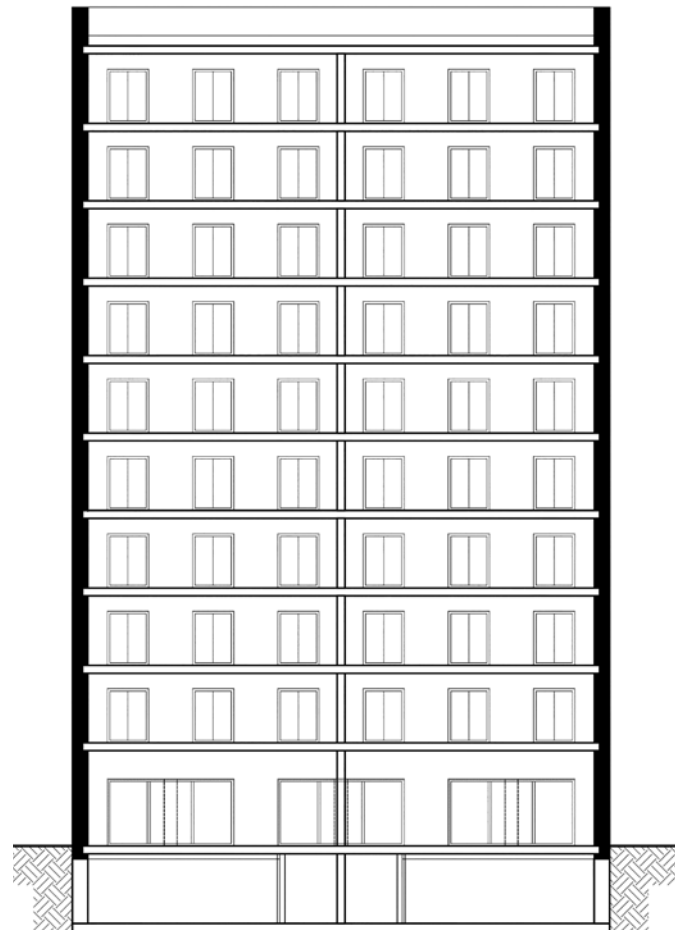


Bild 4-2 Exemplarischer Aufbau eines Gebäudes aus Infraleichtbeton:

- Außenhülle als tragende, monolithische Wand aus Infraleichtbeton (schwarz)
- Zwischendecken aus Beton, Massivholz o. Ä., auf der tragenden Außenwand aufgelagert
- tragender, innenliegender Normalbetonkern (siehe Bild 4-4)
- Dach aus Leichtbeton mit Dämmung und Abdichtung
- Keller aus konventionellen Baustoffen (hier unbeheizter Keller aus WU-Fertigteilen)

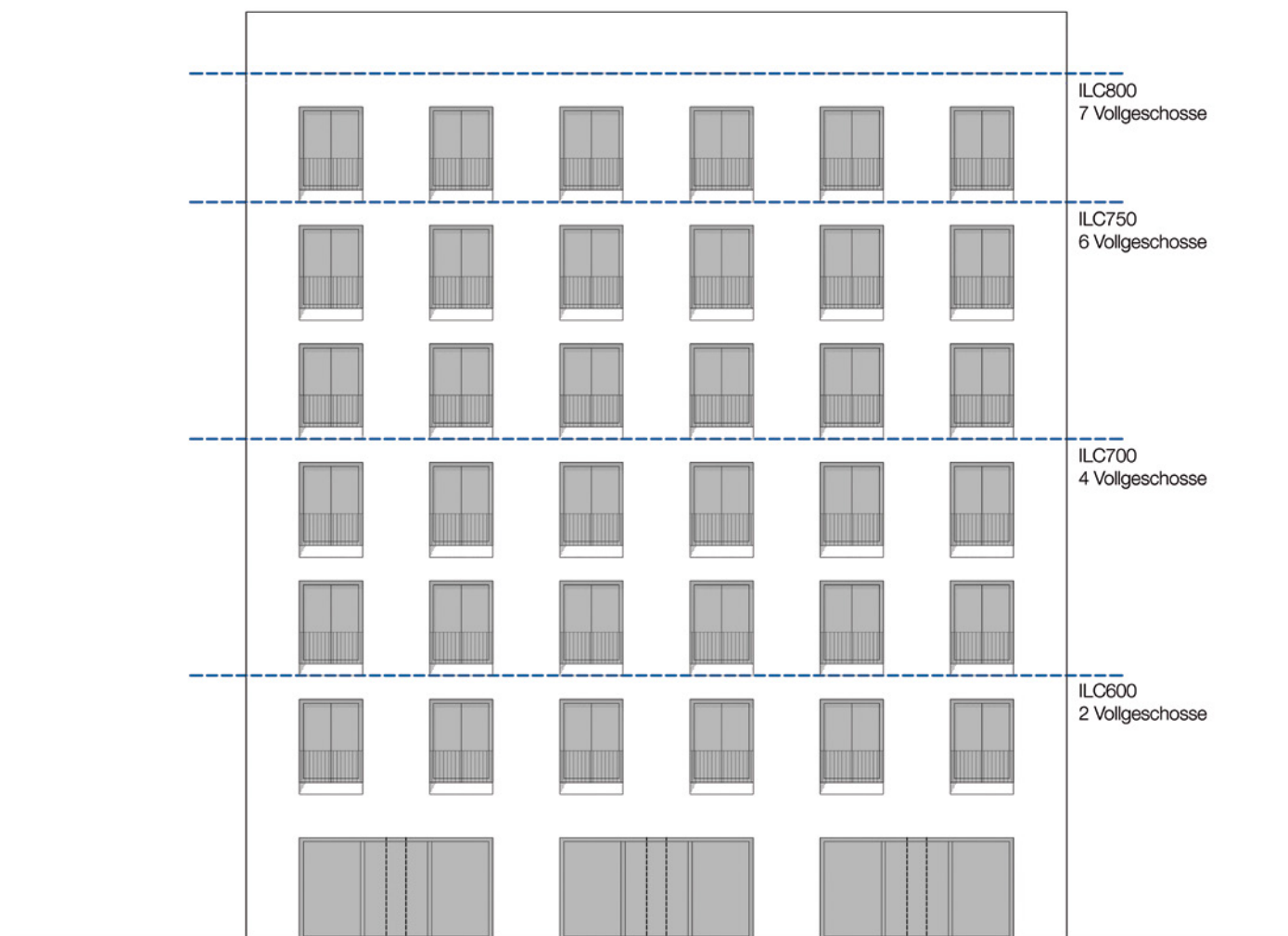


Bild 4-3 Maximale Gebäudehöhen bei unterschiedlichen ILC-Festigkeitsklassen

Gebäudehöhe, Wanddicke und Festigkeit

Als exemplarischer Gebäudetyp wird ein freistehendes Wohngebäude mit Abmessungen von 14,2 m × 20,8 m bei variabler Gebäudehöhe gewählt. Das Gebäude besteht aus einer tragend ausgebildeten Gebäudehülle aus Infraleichtbeton mit einer durchgehenden Wanddicke von 60 cm. Die Öffnungen weisen in den Untergeschossen größere Spannweiten auf.

Je nach Anzahl der Geschosse können unterschiedliche Festigkeitsklassen des ILC verwendet werden.

Mit einer Betonrohddichte von 800 kg/m³ können Gebäude mit bis zu acht Vollgeschossen ohne weitere statische Zusatzmaßnahmen geplant werden.

Energetische Anforderungen

Die Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der jeweiligen Wand ergeben sich aus der Rohddichte in Kombination mit der zur Erfüllung der Anforderungen an den Wärmeschutz notwendigen Wanddicke.

Maßgebliches Kriterium für die Wanddicke ist in der Regel die Anforderung an den Wärmeschutz; die notwendigen Wanddicken ergeben sich also meistens anhand der Berechnung der notwendigen U-Werte (► *siehe hierzu Details 5-1 und 5-2 zu Wanddicken und U-Werten*).

Mögliche Öffnungsmaße

Die in Bild 4-4 dargestellten Öffnungen fallen mit Öffnungsbreiten von ca. 1,6 m aus statischen Gesichtspunkten noch relativ moderat aus. Einzig die Öffnungen im Erdgeschoss

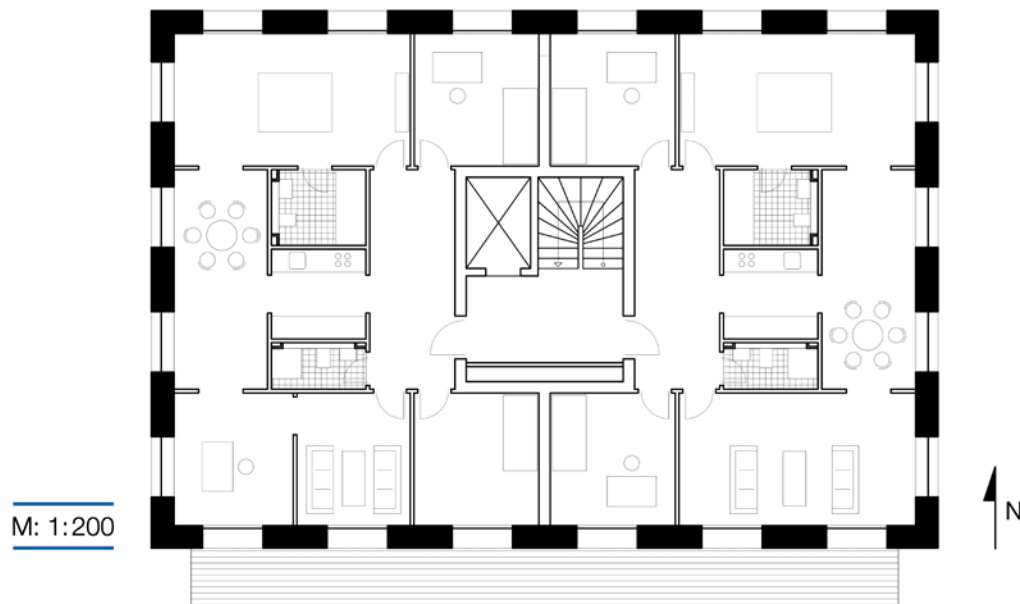


Bild 4-4 Typenentwurf »freistehendes Wohngebäude«, Grundriss Regelgeschoss

sind mit einer lichten Öffnungsbreite von 4,90 m als groß zu bezeichnen. Grundsätzlich sollten Öffnungen unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Kriterien auf ein Maß von 3,0 m beschränkt bleiben.

Größere Fensteröffnungen wären durchaus vorstellbar, der jeweilige technische, konstruktive und finanzielle Aufwand steigt jedoch.

Sommerlicher Wärmeschutz

Die hohen Wanddicken bieten die Chance, die Dicke der Wand als Teil des Konzepts für den sommerlichen Wärmeschutz zu nutzen. Fenster können in den Öffnungen so platziert werden, dass die Laibung als natürliches Verschattungselement mit genutzt wird. Bei südausgerichteten Fenstern sollten die Scheiben möglichst innenbündig eingebaut werden, bei Nord-, Ost-, und Westorientierungen

können die Fenster mittig eingebaut werden. Nach derzeitigem Stand wird der außenflächenbündige Einbau von Fenstern derzeit nicht empfohlen, da es zu starken Durchfeuchtungen der inneren Laibung kommen kann (►siehe hierzu Details 5-7 bis 5-11 zu Fensteranschlüssen).

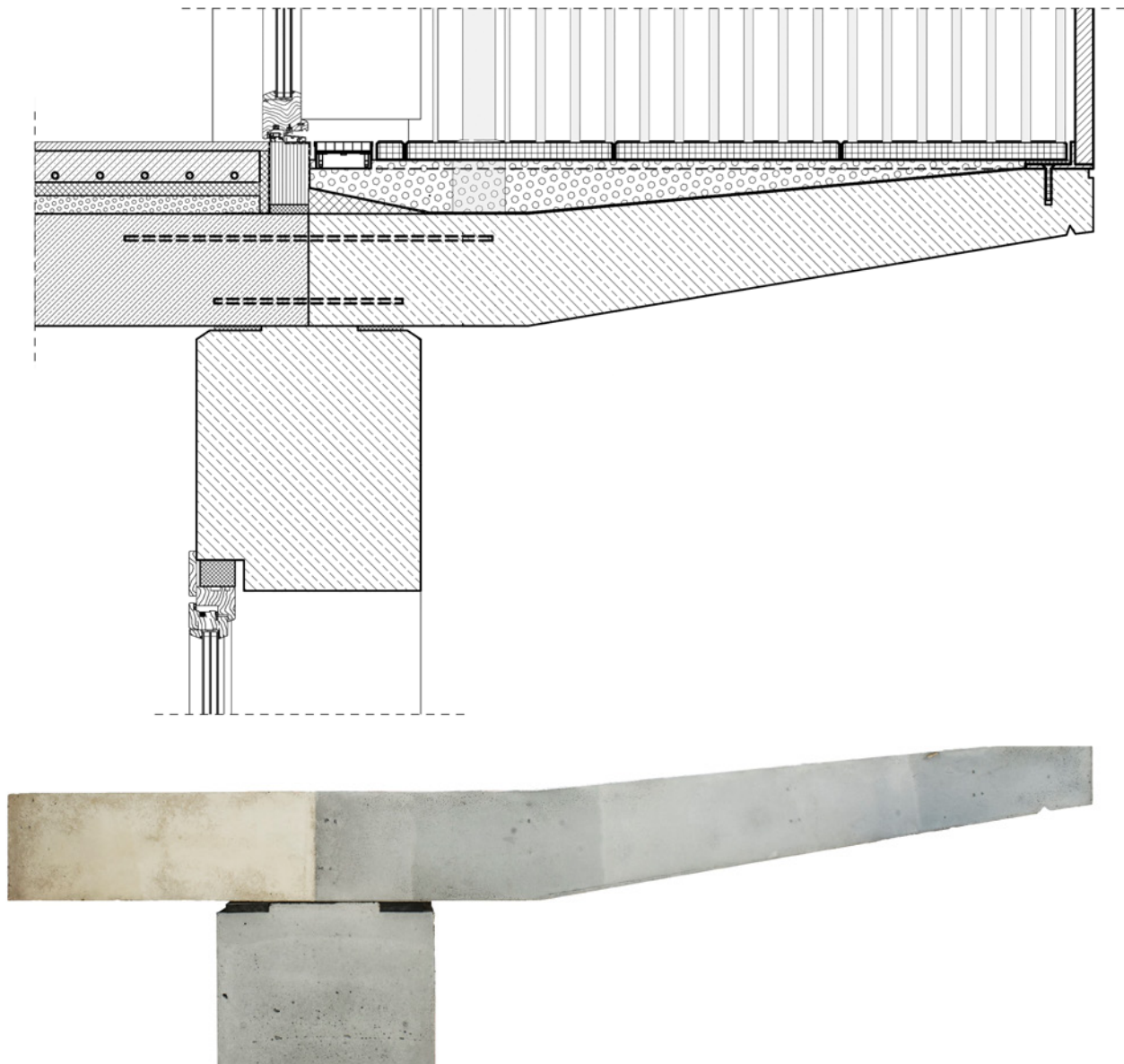


Bild 4-5 Detailanschluss Balkon aus ILC mit Rückverankerung

Balkone/Auskragungen

Für den Anschluss von Balkonen können herkömmliche Systeme mit Entkoppelungen und Rückverankerungen in die Deckenplatten genutzt werden.

Die Balkone können jedoch ebenfalls als auskragende Elemente aus Infralichtbeton konzipiert werden. Dadurch entfällt die Notwendigkeit der zusätzlichen thermischen Entkopplung. Die technische Komplexität des Baus und des Bauprozesses geht also zurück (► *siehe hierzu Detail 5-6*).

Das Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Infralichtbetonbauteilen wurde an der TU Berlin unter-

sucht. Die Ergebnisse zeigten, dass das Material bei Biegebeanspruchungen eingesetzt werden kann und auch für Bauteile wie Balkone und Vordächer geeignet ist. Der in Bild 4-5 dargestellte Prototyp einer auskragenden Balkonplatte aus Infralichtbeton (grau) und der inneren Deckenplatte aus Normalbeton (hellgrau) zeigt dieses Konstruktionsprinzip. Die Funktionsweise wurde bereits in Belastungstests nachgewiesen.

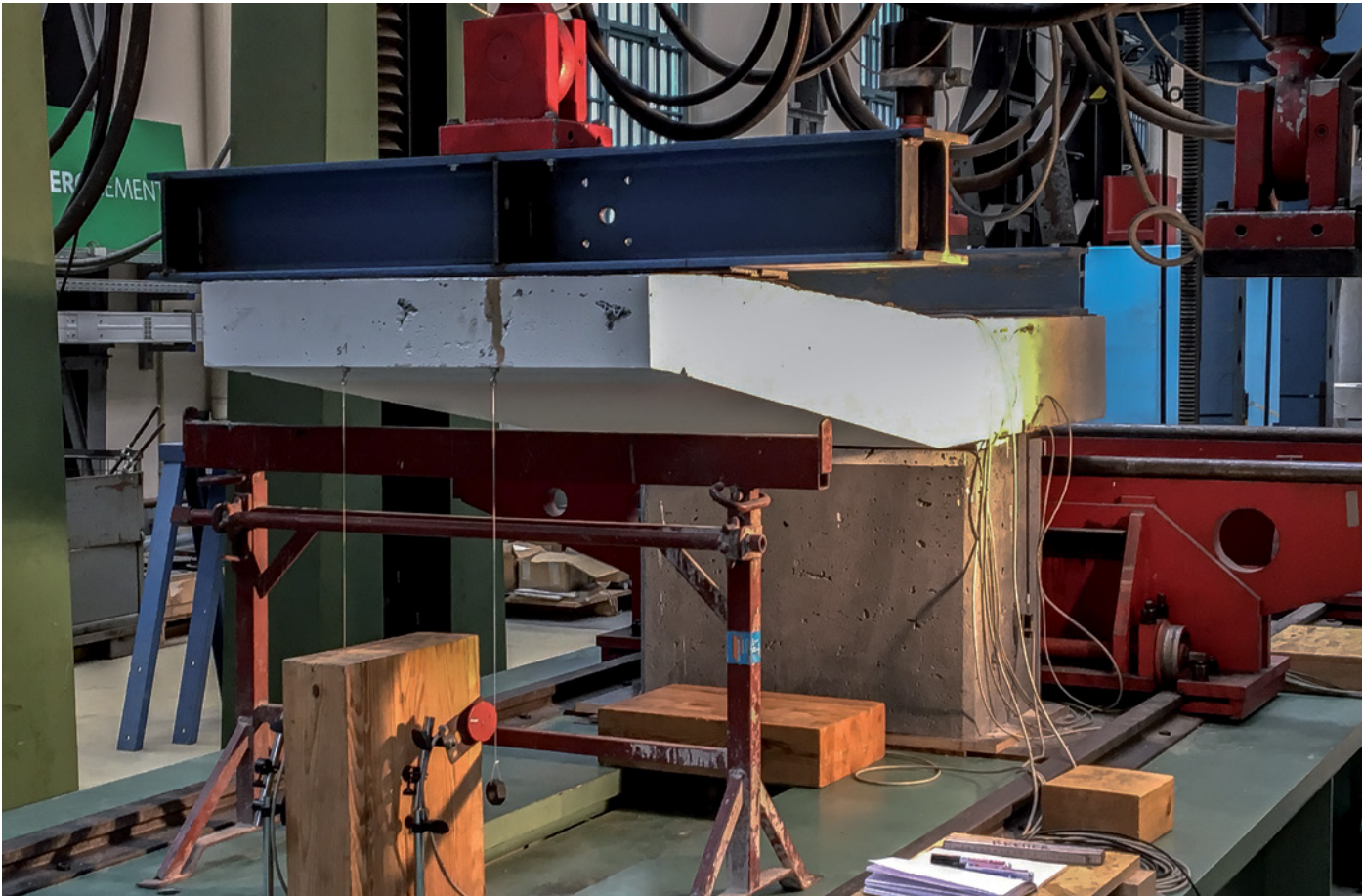


Bild 4-6 Belastungstest Prototyp Balkon mittels einer Plattenbiegemaschine

Ortbeton oder Fertigteil

Grundsätzlich sind sowohl Ortbeton- als auch Fertigteilkonstruktionen für Infraleichtbeton denkbar. Dabei sind neben der Gestaltungsfrage (Fugenbild bei Fertigteilbauweise unvermeidbar) auch andere Faktoren wie z. B. die Logistik der Baustelle und die Vorteile der Vorfertigung zu beachten.

Infraleichtbeton ist als Fertigteil derzeit noch wenig erforscht. Forschungsprojekte zu diesem Themenbereich sind jedoch in der konkreten Planung.

4.2 Baulücke



Bild 4-7 Grundriss des Mietshauses in der Leinestraße um 1910 [23]

Die klassische innerstädtische Baulücke (► *siehe Bild 4-7*) mit zwei an die Außenluft grenzenden Hüllflächen an der Straßen- und Hofseite sowie zwei thermisch gesehen neutralen (also in der Betrachtung der Hüllfläche nicht zu berücksichtigenden) Seitenwänden ist eine für neuartige Bau- und Dämmstoffe prädestinierte Typologie. Nicht nur ist der Anteil an Wandflächen in Bezug auf die Gesamthülle des Gebäudes relativ gering, auch werden diese Gebäude in den thermischen Berechnungen in der Regel bevorzugt behandelt. Durch das günstige Verhältnis von Hüllfläche zu Gebäudevolumen sinkt zudem der globale Einfluss von Wärmebrücken auf das Gebäude.

Beide hier dargestellten Vorstudien für eine Baulückenbebauung aus Infralichtbeton basieren zunächst auf dem klassischen Konstruktionsprinzip des Berliner Mietshauses. Dieses hat in der Regel eine Bebauungstiefe von 12 bis 13 m.

Der Lastabtrag findet hauptsächlich über die zwei tragenden Außenfassaden (straßenseitig und hofseitig) und eine tragende Mittelwand statt. Die Spannweite der Geschossdecken beträgt von der Mittelwand zur Außenwand ca. 6 m.

Beide hier gezeigten Gebäude ähneln sich stark in der Gestaltung der straßenseitigen Nordfassade (► *siehe Bild 4-8 und Bild 4-9*). Sie präsentieren sich als einfache urbane Lochfassade ohne weitere, an dieser Stelle hervorzuhebende Details. Mehr Aufwand wurde auf die Gestaltung der hofseitigen Südfassade verwendet. Hier spielt neben der gestalterischen und konstruktiven Frage auch das Thema der Verschattung der großen Fensterflächen eine wesentliche Rolle (kleinere Fenster nach Norden, größere Fenster nach Süden).

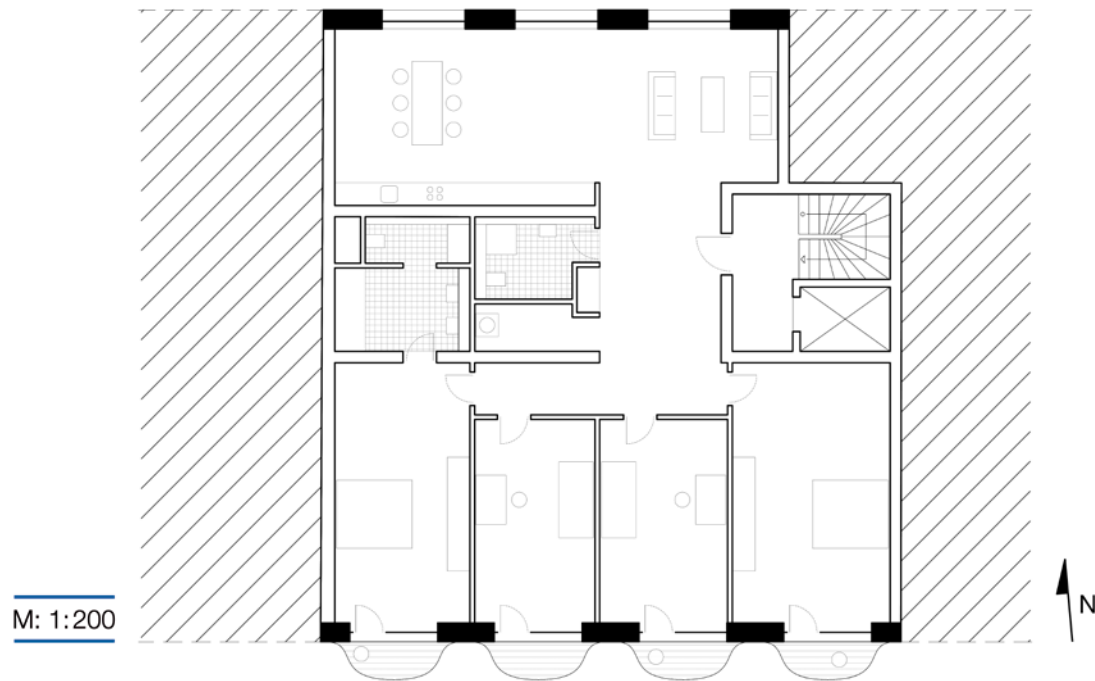


Bild 4-8 Typenentwurf »Baulücke« in Ortbetonbauweise, Grundriss Regelgeschoss

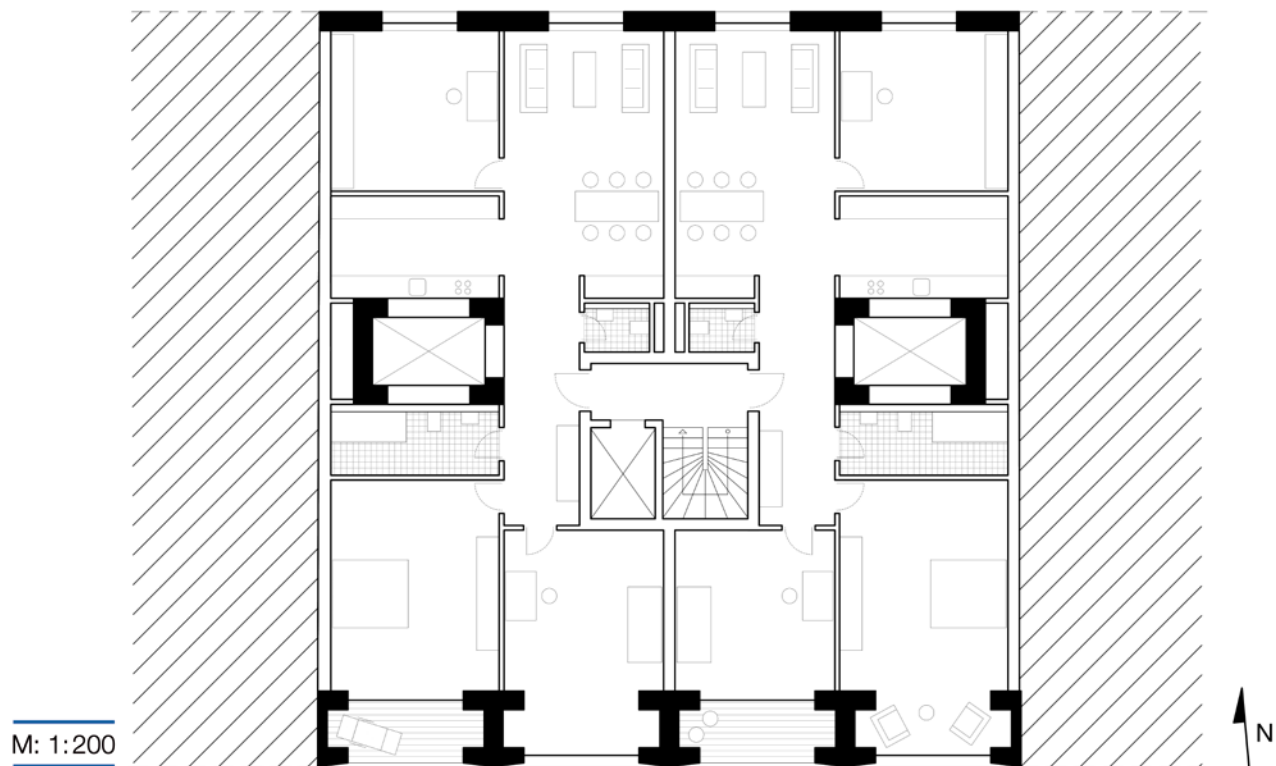


Bild 4-9 Typenentwurf »Baulücke« in Fertigteilbauweise, Grundriss Regelgeschoss



Bild 4-10 Visualisierung des Typenentwurfs »Baulücke« in Ortbetonbauweise



Bild 4-11 Prototyp eines Wandausschnitts mit Balkon aus ILC ohne Rückverankerung

Die Fassade im Ortbetonbau – Anwendungspotenziale als tragende Freiform

Infralichtbeton bietet das Potenzial, Fassaden »aus einem Guss« herzustellen (►siehe Bild 4-10). Dadurch müssen Baukörper wie Balkone oder Erker nicht additiv an die Fassade gesetzt werden, sie können sich auch aus der Fassade heraus entwickeln. Dies kann formal in vielfältiger Weise umgesetzt werden. Im hier dargestellten ersten Beispiel werden die Kräfte über bogenähnliche Konsolen direkt in die tragende Wand eingeleitet (►siehe Bild 4-11). Die Geschosdecke dient also nicht mehr als Rückverankerung für die auskragende Balkonplatte. Die Fassade wird hier zu einem räumlichen Bauteil, Vor- und Rücksprünge sind inhärente Teile der Konstruktion (►siehe Detail 5-6).

Die Wärmebrücke bleibt selbstverständlich nach wie vor bestehen, da man sie bei jeder punktuellen Reduktion eines Bauteilquerschnitts vorfindet. Die hier gezeigte Variante stellt eine materialgerechte Alternative zu gängigen thermisch-

entkoppelten Balkonkonstruktionen dar. Trotz auskragender Bauteile ist auf diese Weise eine monolithische Wandkonstruktion weiterhin möglich (►siehe hierzu Kapitel 6.4.3, Wärmebrückenberechnung).

Eine derart konzipierte Fassade ist als Ortbetonkonstruktion wahrscheinlich überzeugender als in Fertigteilbauweise, da sich bei dieser die technisch bedingten Fugen nicht vermeiden lassen. Bei Infralichtbeton werden durch die großen Wandquerschnitte große Betonmengen benötigt, was bei innerstädtischem Bauen in Ortbetonbauweise mit komplizierter Baustellenlogistik sicher von Nachteil ist. Auch hier hat die Baulücke aufgrund des geringen Hüllflächenanteils einen deutlichen Vorteil gegenüber dem frei stehenden Gebäude.



Bild 4-12 Visualisierung des Typenentwurfs »Baulücke« in Fertigteilbauweise

Die Fassade aus Fertigteilen – Anwendungspotenziale in Neubau und Sanierung

Bei der direkt angrenzenden Baulückenbebauung in Bild 4-12 wurde ein grundsätzlich anderes Entwurfsprinzip bei der Gestaltung der Südfassade angewendet als in Bild 4-10. Diese wird durch ein System gleichartiger »Loggienmodule« bestimmt. Die Bauteile werden als Fertigteile angeliefert und sind allseitig aus Infralichtbeton gefertigt. Anders als beim Balkon ist hier eine Nutzung als Loggia oder als allseitig gedämmter Teil des Innenraumes möglich. Durch diese weitere Nutzungsmöglichkeit wird die Fassade zu einem eigenständigen Raumelement.

Ein derartiges Prinzip einer Fassade aus Fertigteil-Raumelementen kann sowohl im Neubau als auch bei der Sanierung zum Einsatz kommen. Im Neubau dienen die Elemente gleich mit zum Lastabtrag der Decken des Gebäudes. Bei der Sanierung können die Module als zusätzliche Fassade vor das Gebäude gestellt werden. Sie bilden dann

sowohl die Schicht zur energetischen Ertüchtigung der bestehenden Hüllfläche des Bestandsgebäudes als auch eine räumliche Erweiterung der Wohnungen.

Ähnlich wie beim Sanierungsprojekt im »Quartier du Grand Parc«, Bordeaux, aus dem Jahr 2016 durch das Architekturbüro Lacaton & Vassal, entsteht eine zusätzliche Nutzungsschicht, die auf einer oder sogar auf zwei Seiten vor das Gebäude gestellt werden kann. Gerade der standardisierte Massenwohnungsbau mit seiner seriellen Konstruktionslogik immer gleicher Geschosse erscheint hier als besonders geeignet.

Beim Einsatz von Elementen aus Infralichtbeton kann die zusätzlich entstehende Schicht nicht nur als thermische Zwischenschicht genutzt werden, sie erfüllt außerdem die gleichen Anforderungen wie der normale Wohnraum. Gerade in Klimazonen mit hohen Anforderungen an die Gebäudedämmung erscheint diese Konstruktionsmethode als besonders geeignet.

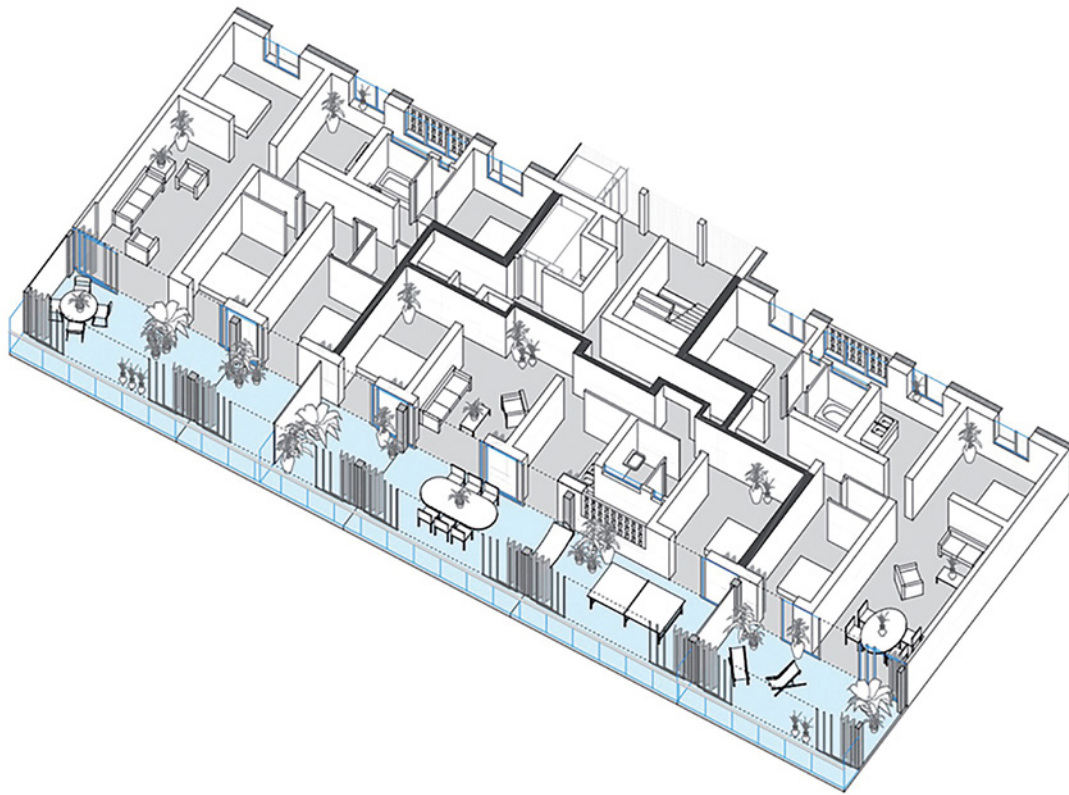


Bild 4-13 Schematische Darstellung »Quartier du Grand Parc«, Bordeaux (Quelle: Anne Lacaton & Jean Philippe Vassal; Visualisierung: Frédéric Druot, Christophe Hutin)



Bild 4-14 Nachträglich hinzugefügte Loggien beim »Quartier du Grand Parc«, Bordeaux (Quelle: Anne Lacaton & Jean Philippe Vassal; Foto: Philippe Ruault)

4.3 Zeilengebäude

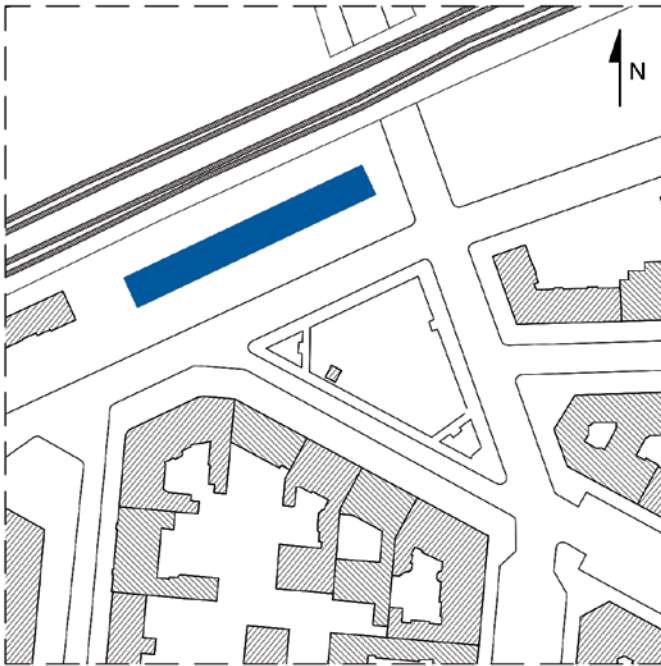


Bild 4-15 Lageplan des Typenentwurfs »Zeilensbau« in Ortbetonbauweise

Die lange Gebäudezeile ist eine spätestens seit dem Beginn der architektonischen Moderne gängige Bautypologie im städtischen Wohnungsbau des 20. und 21. Jahrhunderts. Auch das Material Infraleichtbeton bietet unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten für diese Typologie.

Das hier aufgeführte Beispiel zeigt eine Anwendungsmöglichkeit für diese Typologie auf, die sich sowohl aus den speziellen städtebaulichen Situationen als auch aus der Kombination mit anderen Baustoffen, wie dem Einsatz von Holz für die Deckenkonstruktionen, ergibt.

Der hier beispielhaft gezeigte Zeilenbau am Kracauerplatz befindet sich auf einem Grundstück entlang der stark befahrenen Ost-West-Verbindung der Berliner S-Bahn. Die Nordseite des Gebäudes bildet eine Art Schallmauer zur vorhandenen Bahntrasse, während die offene Südseite dem städtischen Platz zugewandt ist.

Um der städtebaulich speziellen Lage gerecht zu werden, hat das Gebäude eine fast vollständig geschlossene Rückfassade aus Infraleichtbeton und eine großflächig offene Südfassade aus Holz und Glas mit durchlaufenden, verschattenden Balkonen. Bei diesem Beispiel soll das auf seiner flächenbezogenen Masse basierende Schalldämm-Maß des Materials gezielt eingesetzt werden (► *vgl. Kap. 6.3.8*). Gleichzeitig wurden anhand dieser ca. 60 m langen Wand aus Ortbeton die Effekte des Kriechens und Schwindens theoretisch untersucht (► *vgl. Kap. 7.4.4 und 7.6.4*).

Die nach Norden orientierte Rückwand des Gebäudes bildet eine Zone, in der die Nebenräume untergebracht sind. Das Gebäude hat also eine klare Ausrichtung mit einem der Stadt zugewandten öffentlichen Teil und einem rückseitigen privaten Teil. Hier befinden sich Toiletten, Küchen, Arbeitsräume und teilweise auch die Schlafräume. Die Wand variiert in ihrer Dicke und bildet punktuell kleine Taschen (Pochés) aus, in denen wandintegrierte Schränke oder auch kleine Nutzungseinheiten untergebracht werden können.

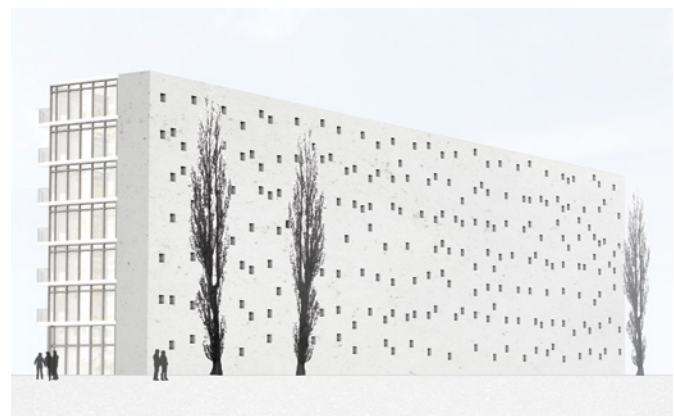


Bild 4-16 Visualisierung des Typenentwurfs »Zeilensbau« in Ortbetonbauweise

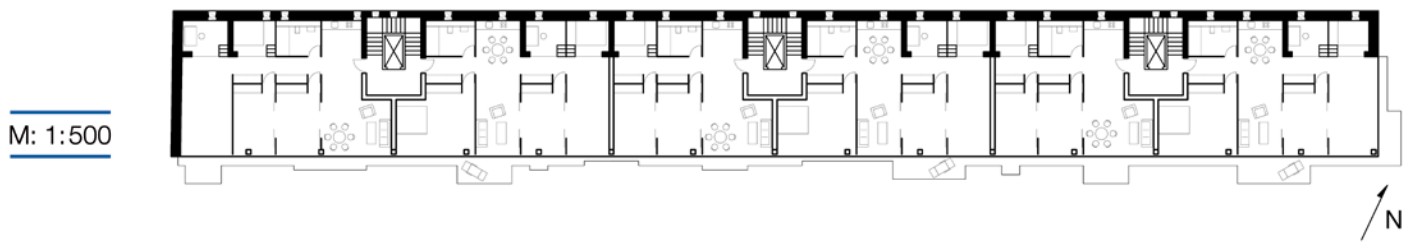
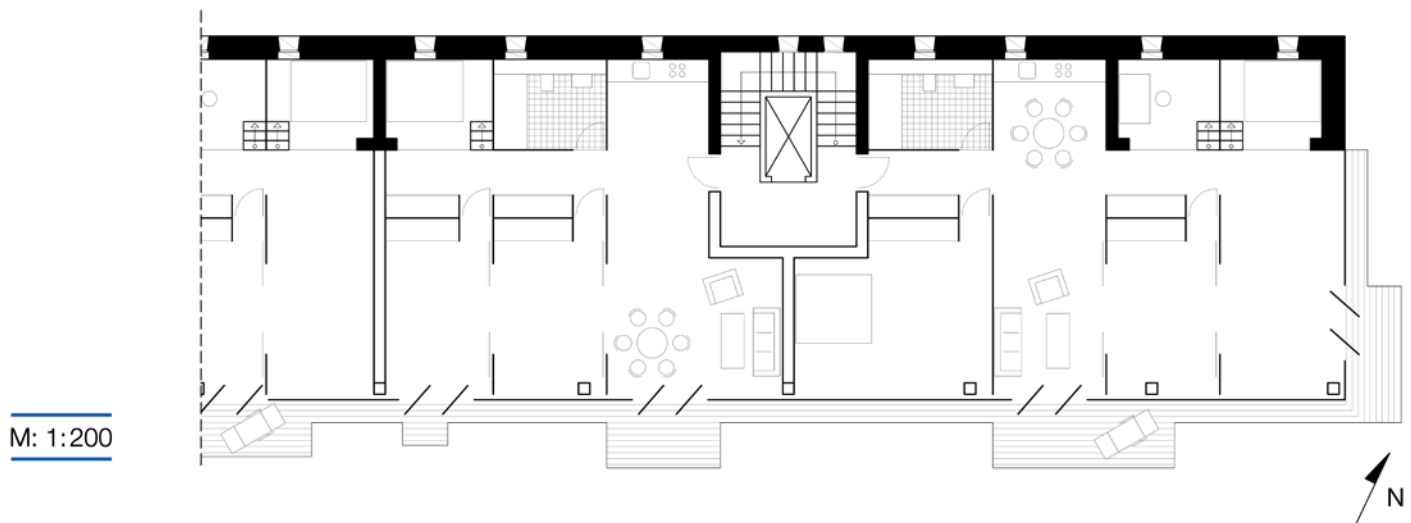


Bild 4-17 Typenentwurf »Zeilenbau« in Ortbetonbauweise, Grundriss Regelgeschoss

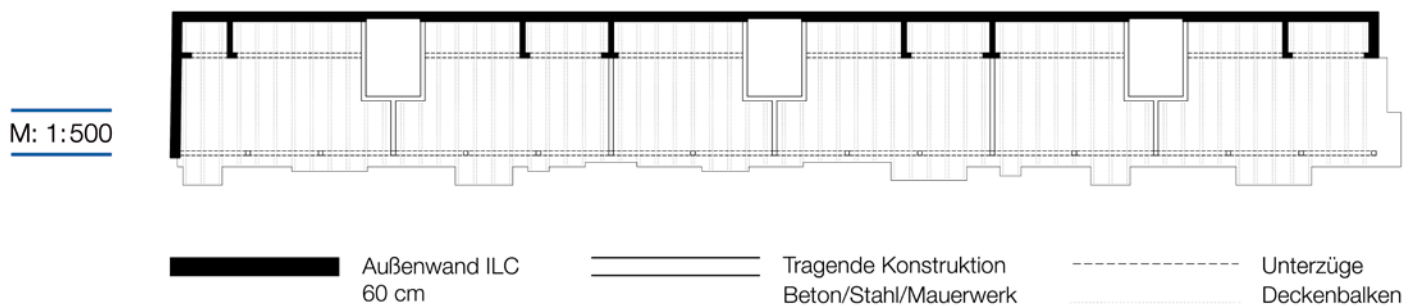


Bild 4-18 Konstruktionsprinzip Typenentwurf »Zeilenbau« in Ortbetonbauweise

Die kleinen Öffnungen in der Rückwand (►siehe Bild 4-17) haben eine Größe von 65 cm × 65 cm und sind in unregelmäßigem Raster über die gesamte Wandfläche verteilt. Die Schalung erfolgt mit Standard-Schaltafeln mit Abmessungen von 2,5 m × 2,5 m. Dieses rigide Schalmuster bildet das Leitmotiv der rückseitigen Fassade.

Die Decken des Gebäudes werden durch quer zur Rückwand verlegte Holzbalken gebildet (►siehe Bild 4-18).

Diese durchstoßen die Südfassade des Gebäudes und bilden so die mäandrierenden Balkone entlang des Stadtplatzes.

Auch hier kommt es also zu einer Verbindung von Infralicht-betonbau mit einer Holzkonstruktion. Nachzuweisen ist neben der bauphysikalischen Eignung des Materials in der gewählten Konfiguration also auch der Anschluss von Holzdecken an eine tragende Wand aus ILC.

4.4 Einfamilienhaus



Bild 4-19 Visualisierung des Typenentwurfs »Einfamilienhaus«

Die frei stehende Villa ist eine der Typologien, bei denen Infraleichtbeton oder andere Dämmbetone bis dato am meisten eingesetzt wurden. Dies lag in der Regel an der noch geringen Tragfähigkeit des Materials bei frühen Rezepturen. Gleichzeitig ist das anteilige Risiko bei den relativ niedrigen Baukosten eines Einfamilienhauses natürlich deutlich geringer, sodass ambitionierte Einzelprojekte durch motivierte Einzelpersonen umgesetzt werden konnten.

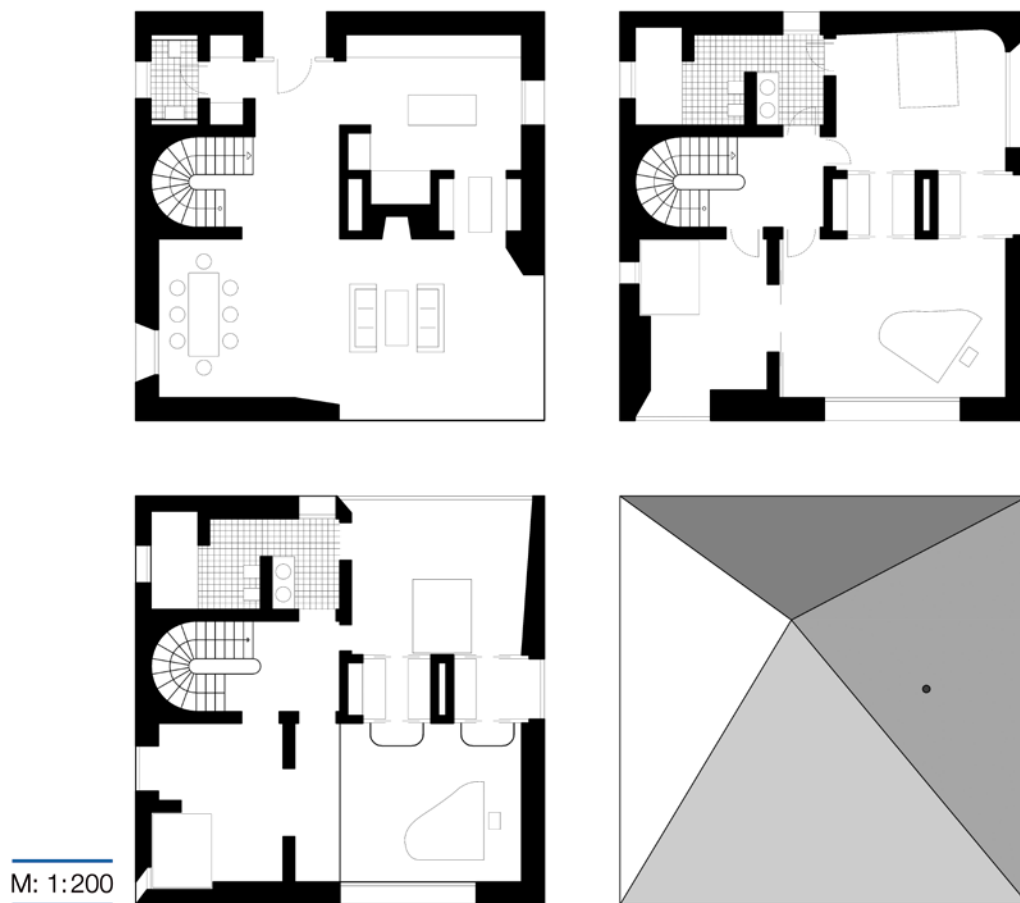
Die Tragfähigkeit des Infraleichtbetons stellt für den Anwendungsfall des Einfamilienhauses oder der Stadtvilla technisch keinerlei Problem mehr dar. Die Typologie eignet sich nach wie vor für eine Betrachtung spezifischer Lösungen mit Infraleichtbeton. Gerade im Hinblick auf das Gestaltungspotenzial sind die Spielräume mit dem Material bei dieser Bauaufgabe noch nicht gänzlich ausgereizt worden, bietet doch gerade das Einfamilienhaus die Möglichkeit Wanddicken zu variieren, Oberflächen differenziert auszubilden und Anschlussdetails radikal auszubilden. Der hier dargestellte Entwurf soll folglich dazu dienen, eines der wesentlichen Gestaltungsthemen beim Umgang mit dem primären Element des Materials, nämlich den architektonischen Umgang mit der »dicken Wand« aufzuzeigen (►siehe hierzu Kapitel 2.3 *Gestalterisches Potenzial*).

Die zahlreichen bereits realisierten Gebäude, von denen eine kleine Auswahl am Ende dieser Publikation vorgestellt wird, verdeutlichen in ausreichender Weise die Potenziale eines monolithischen Materials bei dieser Typologie. Die bei dem Beispielgebäude dargestellten Fassaden und die äußere Erscheinung des Gebäudes sind bei diesem Beispiel von untergeordneter Bedeutung, sie werden nur zum besseren Verständnis gezeigt. Es geht bei der hier folgenden Betrachtung in erster Linie um den Grundriss des Gebäudes.

Die Innenseite der Außenwand

Im Unterschied zum Geschosswohnungsbau, der dazu neigt generische, ökonomisch optimierte Lösungen für Wohnungsgrundrisse zu produzieren, bietet das Einfamilienhaus die Chance, spezifische, auf einzelne Nutzer hin abgestimmte räumliche Lösungen zu finden. Gleichzeitig ist hier der Druck, möglichst günstige und effiziente Lösungen zu finden, geringer als im kollektiven Wohnbau. Die Wanddicke unterliegt nicht denselben ökonomischen Zwängen und kann freier moduliert werden.

Damit rückt ein architektonisches Thema in das Zentrum der Betrachtung, nämlich die Gestaltung von Räumen mittels



M: 1:200

Bild 4-20 Typenentwurf »Einfamilienhaus«, Grundrisse

dicker Wände, Versprünge, Nischen oder Pochés (Taschen). Die dicke Wand wird also von einem aus technischen Anforderungen (Tragwerk und Bauphysik) heraus dimensionierten Bauteil zu einem gestalterischen Leitmotiv. Dabei erschöpft sich das Anwendungsspektrum nicht in der Zurschaustellung möglichst perfekter, innen und außen gleicher Sichtbetonflächen. Über die Ästhetik des minimalistischen Gebäudes mit allseitigen Sichtbetonflächen hinaus ist der Gestaltungsspielraum von Dämmbeton bis dato noch nicht besonders ausgereizt worden (► *siehe hierzu auch Kapitel 8.2 Oberflächengestaltungen*).

Die Wand kann also in vielfältiger Weise genutzt werden. Fensternischen werden zu Sitzgelegenheiten; Wände bilden Nischen für Möbel und Einbauten; sie kann streng orthogonal, glatt und gerade sein, aber auch konkav oder in Freiformen gestaltet werden. Sogar die horizontalen Flächen wie das Dach oder die Decke können zum Teil des Innenraumkonzeptes werden (► *siehe Bild 4-21*).

Große Spannweiten und Auskragungen

Bei der Betrachtung gebauter Referenzhäuser aus Dämmbeton zeigt sich immer wieder, dass Architekten die aus dem Stahlbetonbau kommenden technischen Möglichkeiten der Realisierung großer Spannweiten und Auskragungen gerne auf den Dämmbetonbau übertragen. An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass Infraleichtbeton und Dämmbeton hier zwar in bestimmten Bereichen einsetzbar sind, allerdings bei zu großen Spannweiten schnell an die Belastungsgrenzen kommen. Lösungen durch tragfähigere Hilfsmittel, wie z. B. erhöhte Bewehrungsmengen oder integrierte Stahlträger, sind zwar durchaus denkbar, sind jedoch aufwendig, gehen ggf. mit dämmtechnischen Einbußen einher und entsprechen eher nicht dem Anspruch des materialgerechten Bauens.



Bild 4-21 Innenraum des Projektes »Birg mich, Cilli«, Peter Haimerl (Foto: Edward Beierle)

Dieser Hinweis soll Gebäude, bei denen über die eigentliche technische Machbarkeit hinaus gebaut wurde, jedoch auch nicht kategorisch in Frage stellen. Naturgemäß sollten gerade Gebäude aus dem plastisch frei formbaren Infraleichtbeton auch für derartige Entwurfsansätze immer offen sein.



Bild 4-22 Technisch anspruchsvolles, gelungenes Beispiel für einen Bau in Dämmbeton, Neubau der Meisterhäuser in Dessau (Bruno, Fioretti, Marquez Architekten, Foto: Christoph Rokitta)

4.5 Punkthaus/Hochhaus

Nach derzeitigem Stand ist Infraleichtbeton als lastabtragendes Material bis zu einer maximalen Geschosszahl von etwa sieben bis zehn Vollgeschossen, je nach Entwurf und Tragwerk, einsetzbar. Sind aber auch zukünftig Hochhäuser in Infraleichtbeton denkbar?

Im Jahr 2014 wurde in Berlin der Urban Living Wettbewerb, ein Ideenwettbewerb für zukunftsfähige Wohnformen in der Hauptstadt, ausgelobt. Das von Barkow Leibinger Architekten und schlaich bergemann partner entworfene Hochhaus an der Karl-Marx-Allee ging als einer der ersten Preise aus dem Wettbewerbsverfahren hervor.

Es ist deshalb interessant, da das Material hier weit über seine bisherigen Grenzen ausgereizt wird und seine Anwendungsmöglichkeiten im Hochhausbau mit monolithischem Fassadenaufbau aufgezeigt werden.

Entwurfskonzeption

Die geschwungene tragende Außenwandkonstruktion des Gebäudes basiert auf einem einzigen mehrfach gekrümmten Wandtyp, der durch Mehrfachanordnung die monolithische Außenhülle des Gebäudes bildet. Zwischen den einzelnen Bauteilen liegen geschosshohe Fensterflächen. Balkone und Außenräume entstehen durch die Versprünge in der geschwungenen Fassade.



Bild 4-23 Beitrag Urban Living Wettbewerb, Berlin

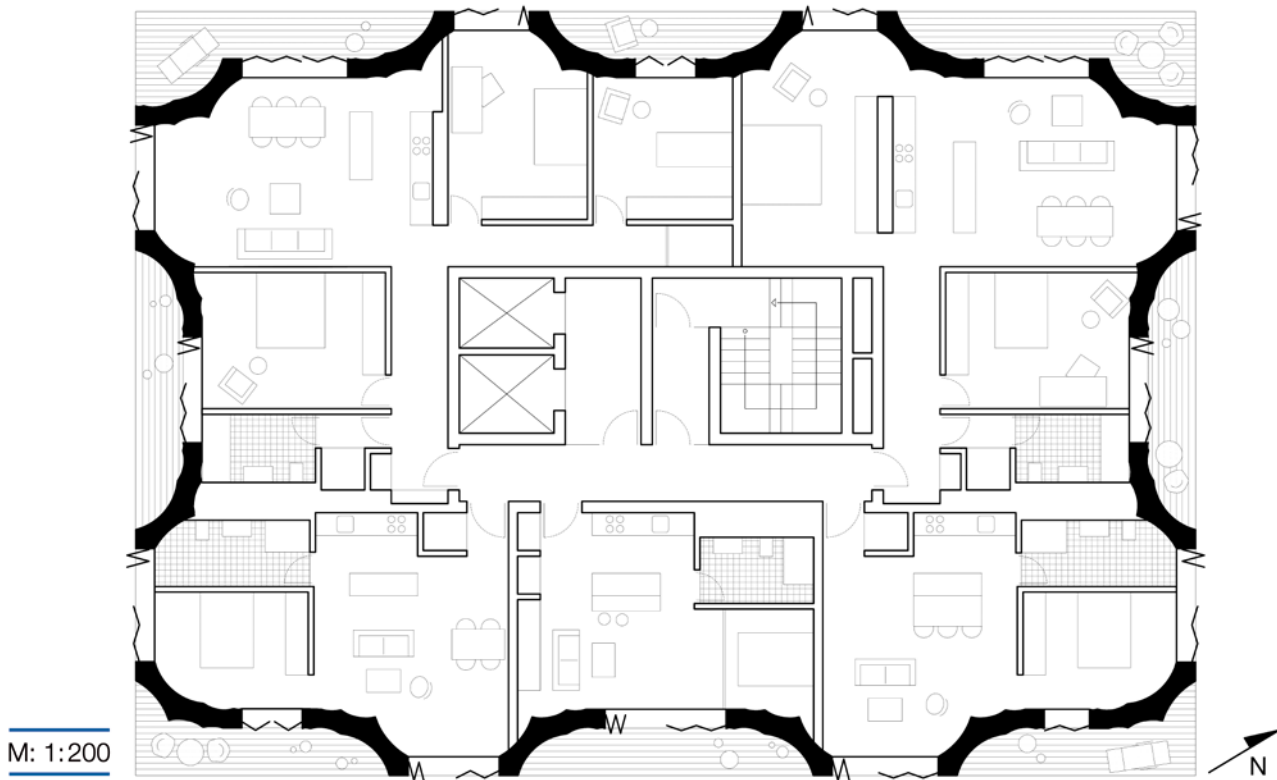


Bild 4-24 Typenentwurf »Punkthochhaus«, Grundriss Regelgeschoss

Die Form der Fassade bildet sich auch im Innenraum direkt ab und bestimmt in maßgeblicher Weise die Atmosphäre der Innenräume. Durch die Freilegung der Struktur der Innenwand zeigt sich das Material der Hülle innen in anderer Form als außen.

Tragwerkskonzept

Da die Tragfähigkeit des ILCs allein bei dieser Geschosszahl nicht ausreicht, werden bei diesem Projekt in der Querschnittsmitte Bewehrungsstäbe als sogenannte Druckstäbe angeordnet, die hauptsächlich den Lastabtrag übernehmen. Der umgebende Infraleichtbeton dient in diesem Fall weniger der Ableitung der Vertikallasten, sondern eher der Aussteifung der Stäbe gegen Knicken (► siehe Bild 4-26). Die Untersuchung dieses Tragkonzepts der sogenannten Stabwände ist im Rahmen eines separaten Forschungsprojekts geplant.



Bild 4-25 Prototyp smart material house, Infraleichtbeton

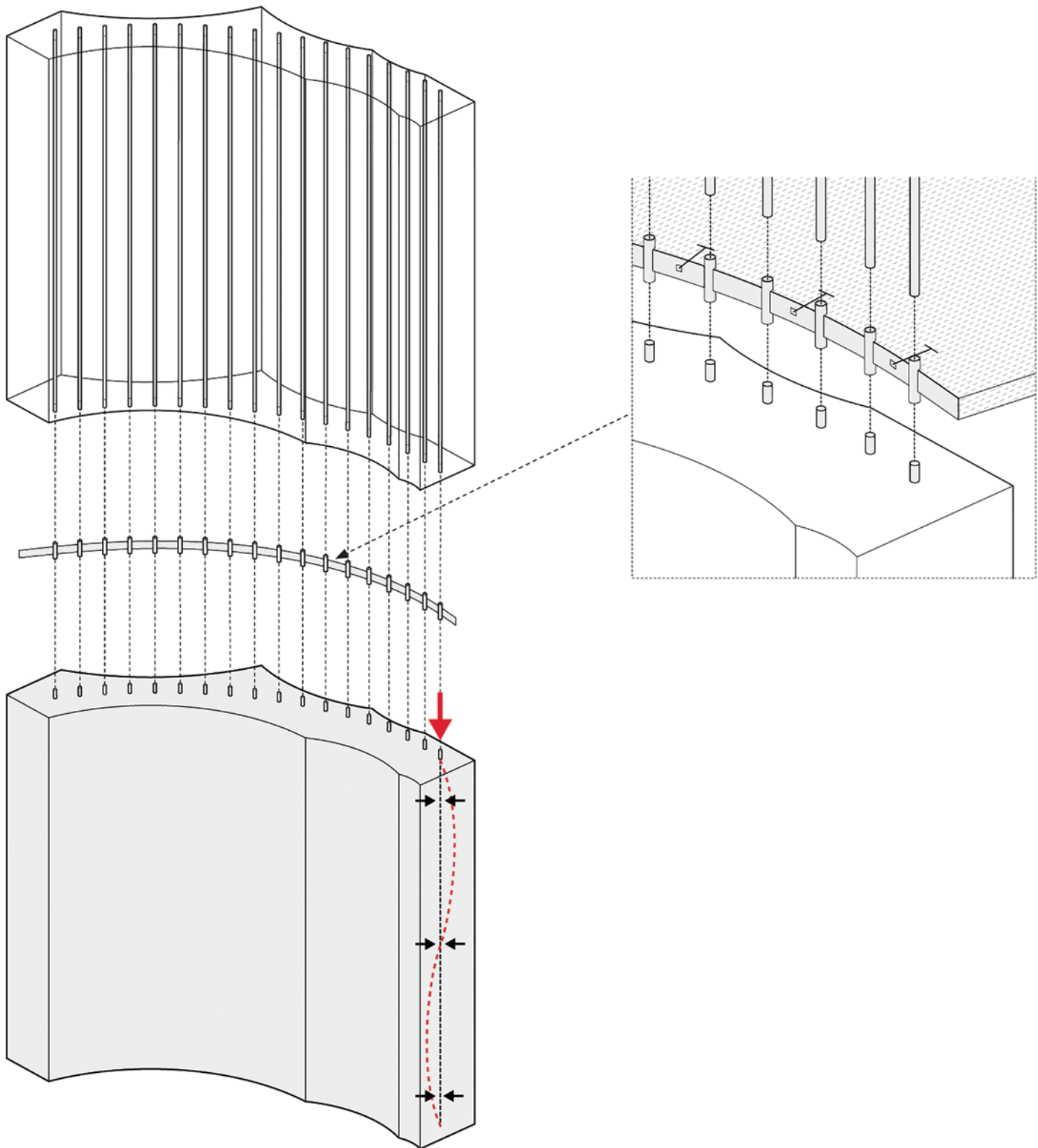


Bild 4-26 Konstruktionsprinzip der Stabwände mit Infraleichtbeton

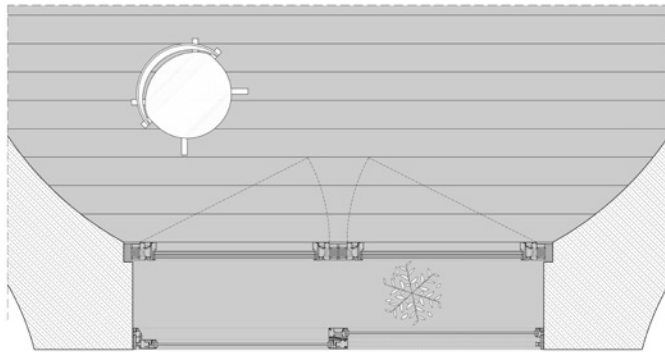


Bild 4-27 Detail des begehbaren Loggiafensters

Energetische Betrachtung – Betrachtung des Fensterflächenanteils

Bei der parallel zur Weiterentwicklung des Projektes erfolgten EnEV-Berechnung ergab sich schnell, dass massive Wände mit 60 cm Dicke im Hinblick auf die thermischen Verluste der Hüllfläche in der Gesamtbetrachtung weniger bedeutsam sind als bei anderen Bauformen. Vielmehr gab es relativ betrachtet größere Energieverluste bei den transparenten Bauteilen. Der Fensterflächenanteil ist mit ca. 35 % durchaus vertretbar, fällt aber durch die frei stehende Typologie des Punkthauses in diesem Fall besonders ins Gewicht. Eine gängige Möglichkeit zur Optimierung ist in einem solchen Fall die Verringerung des Fensterflächenanteils, was entsprechend drastische Konsequenzen für das Erschei-

nungsbild der Fassade hätte. Hier wurde allerdings versucht, einen neuen Lösungsansatz zu finden, der der dicken massiven Wand aus ILC gerecht wird und daraus neue Potenziale schöpft. Die Wahl fiel daher auf den Einbau einer hinterlüfteten Dreischeibenverglasung als begehbare Loggia.

Diese greift die Dicke der Wand auf und erzeugt einen nutzbaren variablen Zwischenraum, der im Winter geschlossen wird. Dieser Zwischenraum wirkt im Winter als zusätzlicher thermischer Puffer, der die Effizienz der Verglasung in erheblichem Maße erhöht. Im Sommer hingegen dient dann entweder nur die äußere Einscheibenverglasung oder die innenliegende Dreischeibenverglasung als äußerer Gebäudeabschluss.



5 Baukonstruktive Leitdetails

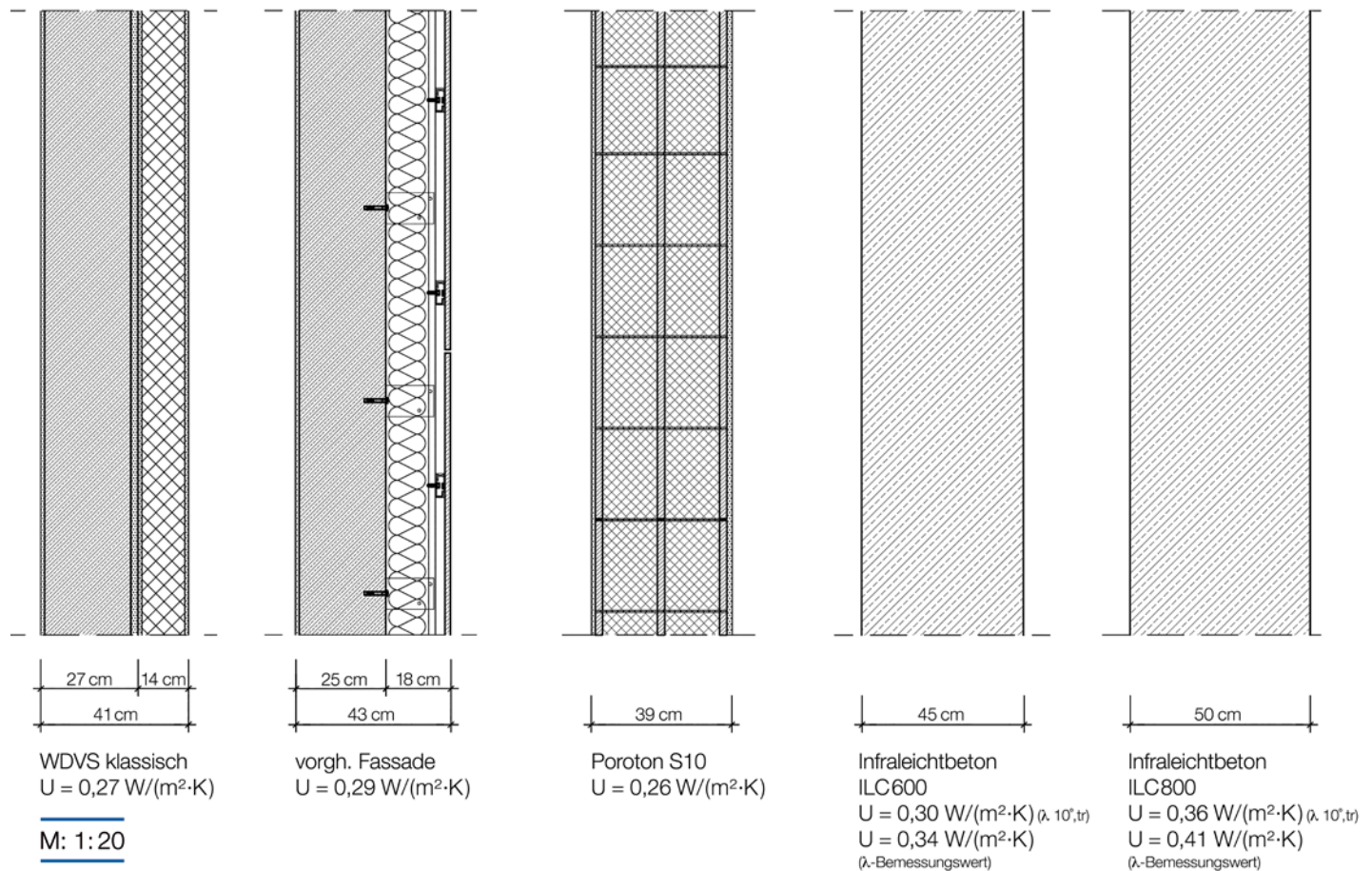
- 5.1 Wandaufbauten
- 5.2 Deckenanschlüsse
- 5.3 Balkone und Auskragungen
- 5.4 Fensteranschlüsse
- 5.5 Fußpunkte
- 5.6 Attikaanschluss bei Flachdächern

Das oft dem Architekten Mies van der Rohe unterstellte Zitat »Der liebe Gott steckt im Detail« entlehnte dieser mutmaßlich dem Kunsthistoriker Aby Warbourg. Mies van der Rohe greift den Satz im Sinne eines architektonischen Wirkungsprinzips zwischen der Gesamterscheinung eines Gebäudes und den es konstituierenden Einzelementen auf. Jedes Detail eines Hauses spiegelt den Geist des Gesamtgebäudes wider.

Im Entwurfsprozess steht man als Planer stets vor der gleichen scheinbar banalen Frage: Wie mache ich das jetzt konkret im Detail?

Die hier aufgeführten Beispiele dienen der Orientierung zu Beginn dieser Fragestellung. Sie versuchen die grundlegende Einfachheit eines Gebäudes aus Infraleichtbeton widerzuspiegeln. Sie sind nach bestem Wissen an den aktuellen Stand der Bautechnik angepasst.

5.1 Wandaufbauten



Detail 5-1 Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten nach EnEV 2016 (Außenwände mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,28 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$)

Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten nach EnEV 2016 (Außenwände mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,28 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$)

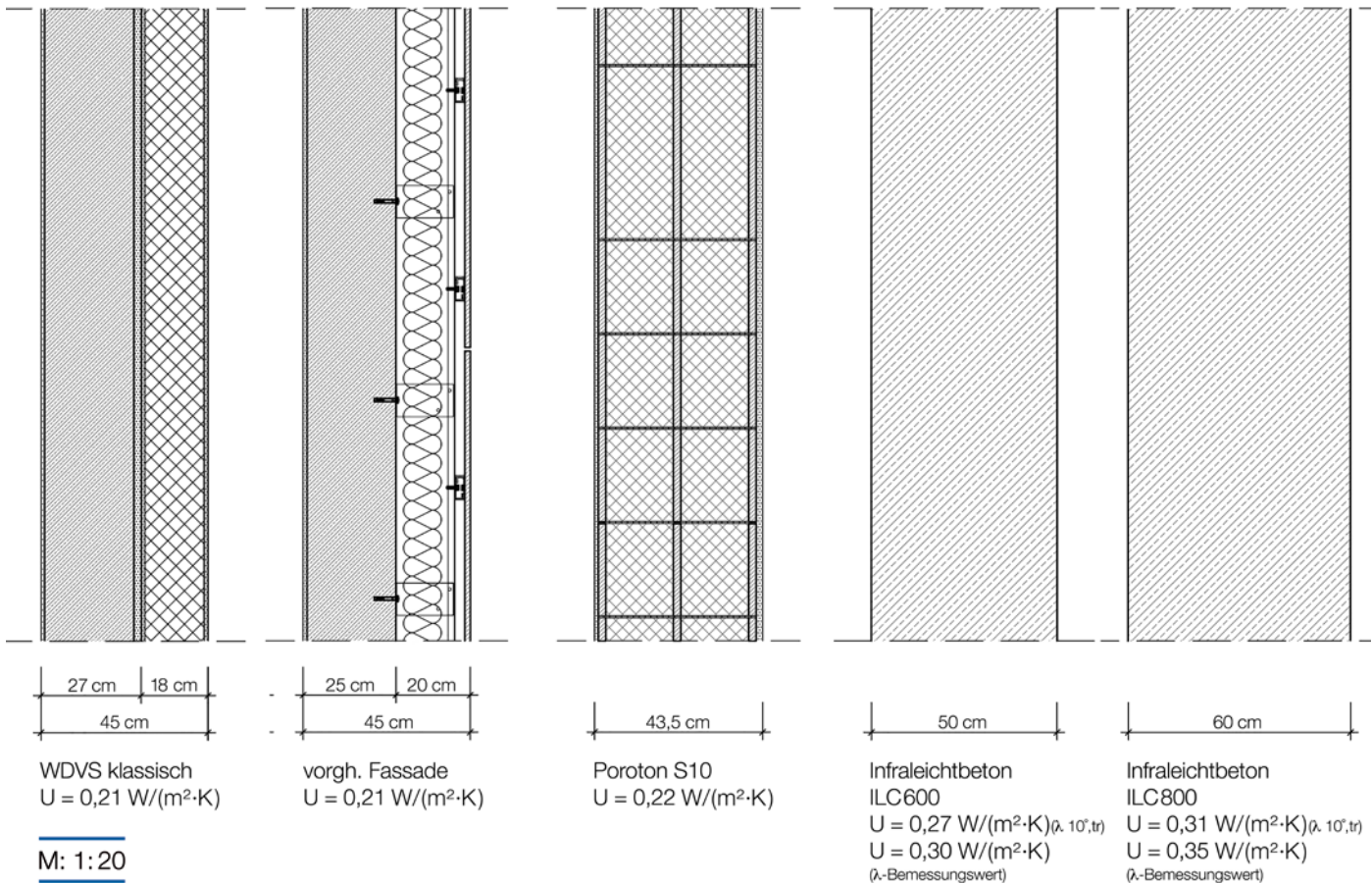
Während in Deutschland keine festen Anforderungen an den Wärmedurchlasswiderstand von Einzelbauteilen bestehen, da hier der auf die gesamte wärmeübertragende Hüllfläche bezogene Transmissionswärmeverlust $H'T$ betrachtet wird, müssen in anderen Ländern feste Zielanforderungen erreicht werden. Hier kann die Erreichung des notwendigen U -Wertes nur über die Dicke der Außenwand erreicht werden.

In Deutschland können die teilweise notwendigen Kompensationen der Bauteilstärken durch andere Bauteile erfolgen

(z. B. durch Fenster, Dach, Sohlplatte, exponierte Deckenbauteile etc.).

Zugrunde gelegt wurde bei der Betrachtung des ILC der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (λ_{Bem}). Dieser liegt ca. 20 % über dem Messwert der Wärmeleitfähigkeit ($\lambda_{10^\circ, tr}$) von ILC bei 10 °C im trockenen Zustand.

Hinweis: Bei der Bewehrung von komplexen Bauteilen mit hohem Bewehrungsanteil muss die Bewehrung teilweise mit in die Berechnung des U -Wertes der Außenwand einfließen.



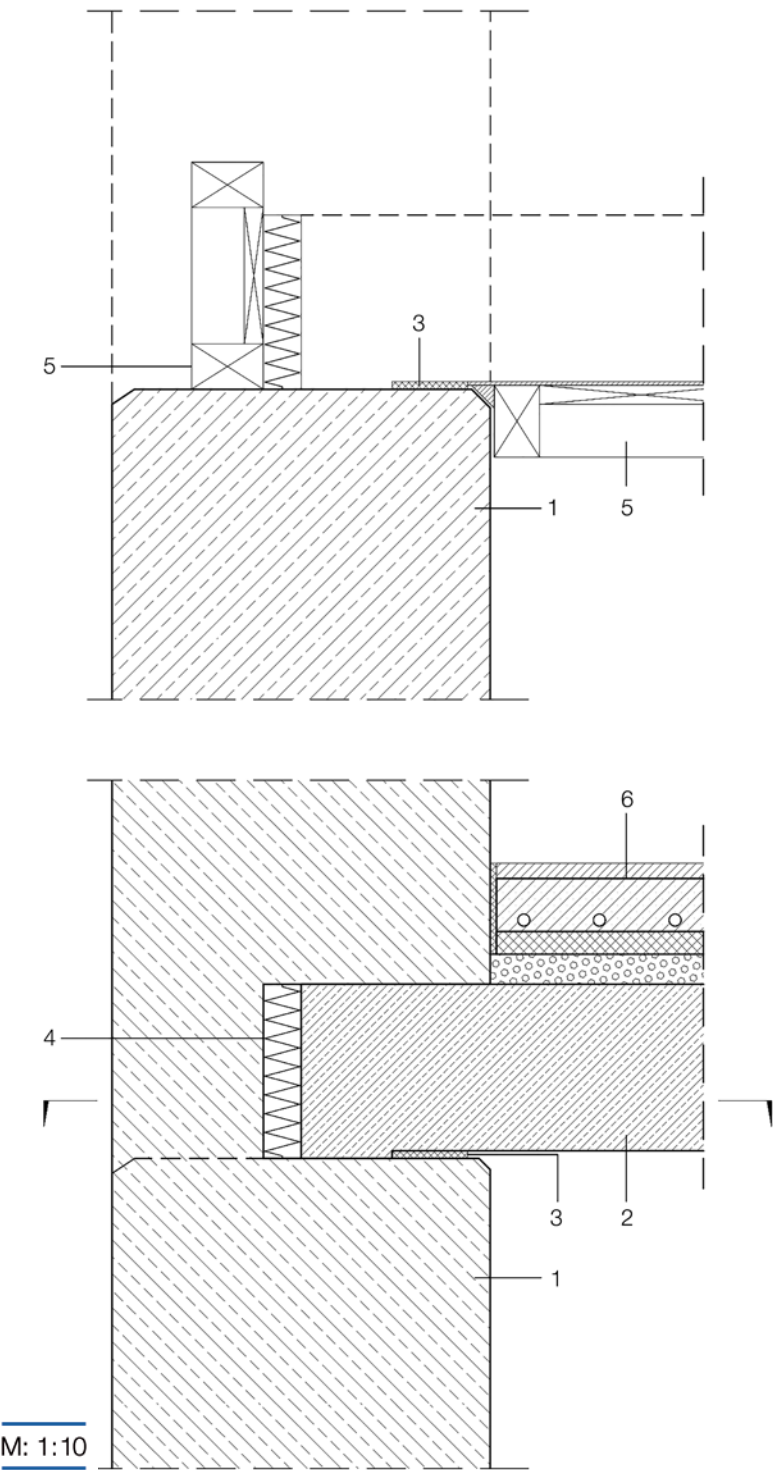
Detail 5-2 Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten nach EnEV 2016 – 20 % (Außenwände mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,21 W/(m^2 \cdot K)$)

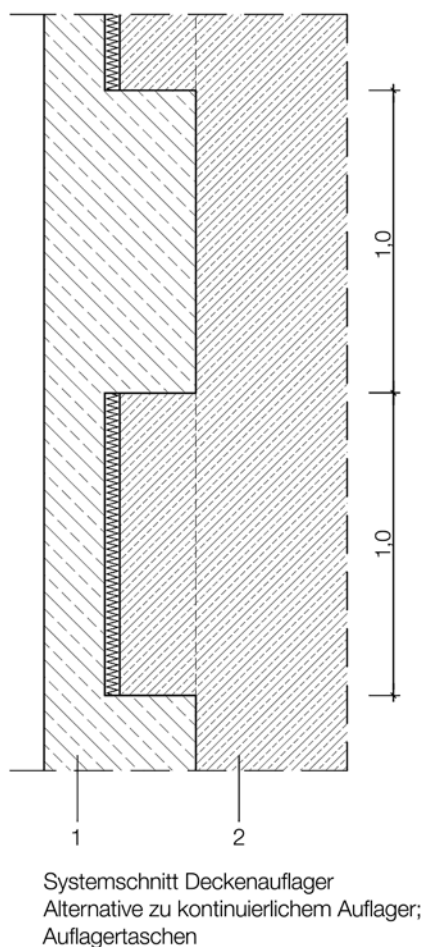
Vergleich unterschiedlicher Wandaufbauten nach EnEV 2016 – 20 % (Außenwände mit einem mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,21 W/(m^2 \cdot K)$)

Es ist damit zu rechnen, dass in Zukunft mit Einführung des neuen Gebäudeenergiegesetzes die Anforderungen an die

Gebäudehüllfläche weiter verschärft werden. Hier gezeigt werden die Auswirkungen einer Verschärfung um ca. 20 %, was für das Bauteil Außenwand einen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten von $U = 0,21 W/(m^2 \cdot K)$ bedeuten würde.

5.2 Deckenanschlüsse





Detail 5-3 Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit gedämmter Stirnseite

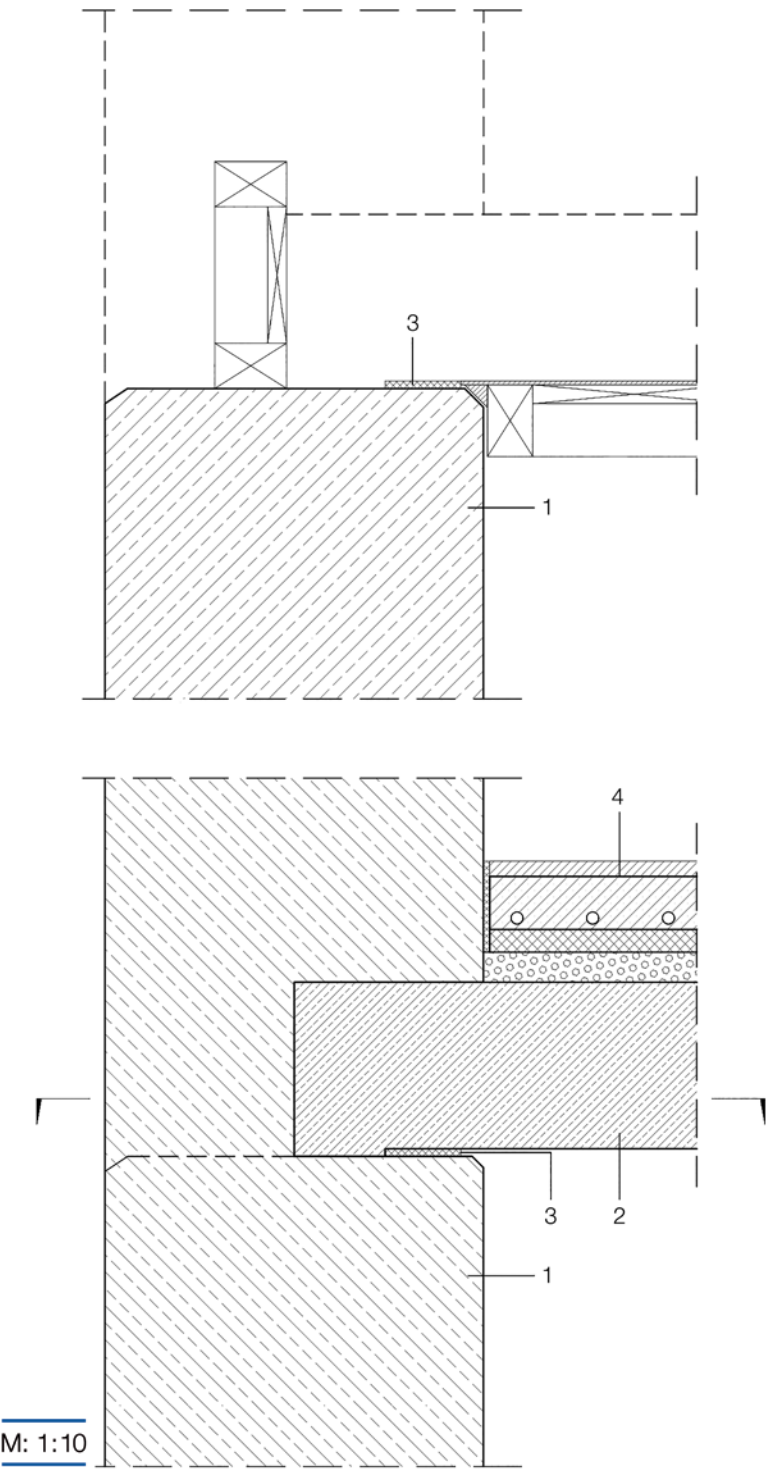
- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2400 kg/m³
- 3 Auflager: Moosgummi
- 4 Stirndämmplatte zur Reduktion des
Wärmebrückeneffektes
- 5 Schalung
- 6 Bodenaufbau:
 - Schüttung Bläherlite (Installationen)
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag

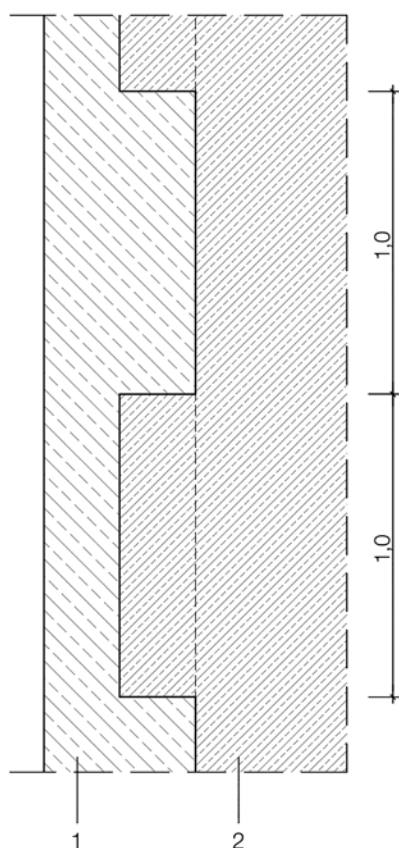
Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit gedämmter Stirnseite

Grundsätzlich ist ein biegesteifer Anschluss möglich; ein gelenkiger, weicher Anschluss, analog zum Vorgehen bei Mauerwerk, ist jedoch in der Regel zu bevorzugen. Zur Reduzierung der unvermeidbaren geometrisch-stofflichen Wärmebrücke wird die Stirnseite der Deckenplatte zusätzlich gedämmt. Diese Dämmung senkt bei einer detaillierten Wärmebrückenberechnung den Einfluss von Wärmebrücken auf die Hüllfläche.

Optional kann die Deckenplatte mit Auflagertaschen mit einer Länge von beispielsweise ca. 0,8 bis 1,0 m ausgebildet werden. Die Taschen dienen zum einen der Reduktion von Wärmebrücken, zum anderen können hierdurch Bereiche für den ungestörten vertikalen Lastfluss geschaffen werden. Zur Reduzierung der Gefahr von Abplatzungen im Bereich des Auflagers wird ein Streifen aus Moosgummi in die Schalung eingebracht.

Die Schüttfuge wird im Bereich der Unterkante der anschließenden Deckenplatte angeordnet. Zur Reduzierung von Ausbrechungen kann hier zusätzlich mit einer horizontal eingebauten Dreiecksleiste gearbeitet werden.





Systemschnitt Deckenaufleger
Alternative zu kontinuierlichem Auflager;
Auflagertaschen

Detail 5-4 Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit ungedämmter Stirnseite

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2400 kg/m³
- 3 Auflager: Moosgummi
- 4 Schalung
- 5 Bodenaufbau:
 - Schüttung Blähpelrite (Installationen)
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag

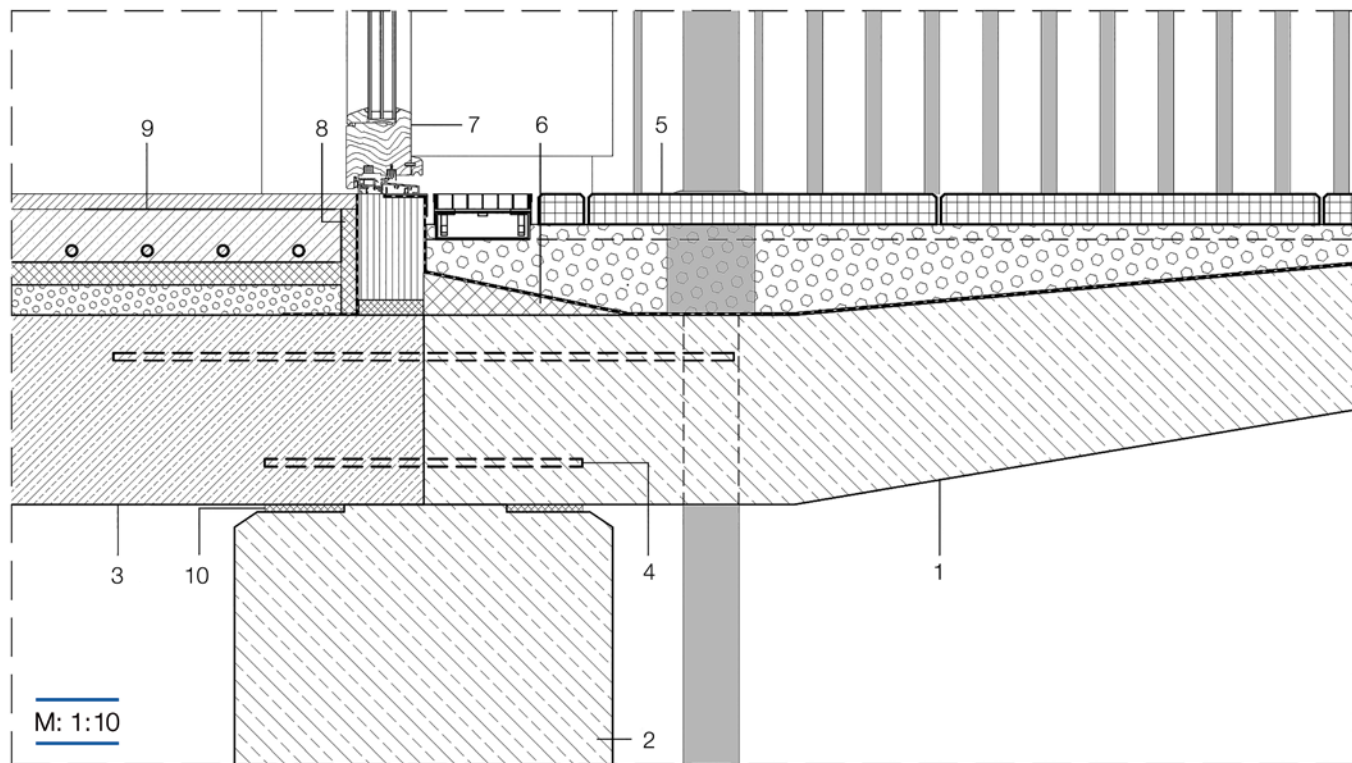
Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit ungedämmter Stirnseite

Die durch die Einbindung der Normalbetondecke entstehende geometrisch-stoffliche Wärmebrücke an der Stirnseite der Deckenplatte wird nicht zusätzlich gedämmt. Bauphysikalisch ist diese Detailausbildung möglich. Tauwasser

fällt nach den erstellten Berechnungen nicht an, allerdings ist der Einfluss der Wärmebrücke größer als in der gedämmten Variante.

Entsprechend dem Anschluss mit gedämmter Stirnseite kann die Deckenplatte mit Auflagertaschen ausgebildet werden (► vgl. **Detail 5-3**).

5.3 Balkone und Auskragungen



Auskragende Balkonplatte (ILC-Fertigteil) mit Rückverankerung in der Deckenplatte bei einer Außenwand aus Infraleichtbeton

Der Balkon ist auf seiner ganzen Länge in der Stahlbetondecke rückverankert. Die Konstruktion ähnelt dem System der Rückverankerung mittels einer thermischen Trennung, nur dass hier keine Dämmebene eingesetzt wird, sondern der ganze Balkon als Dämmelement fungiert.

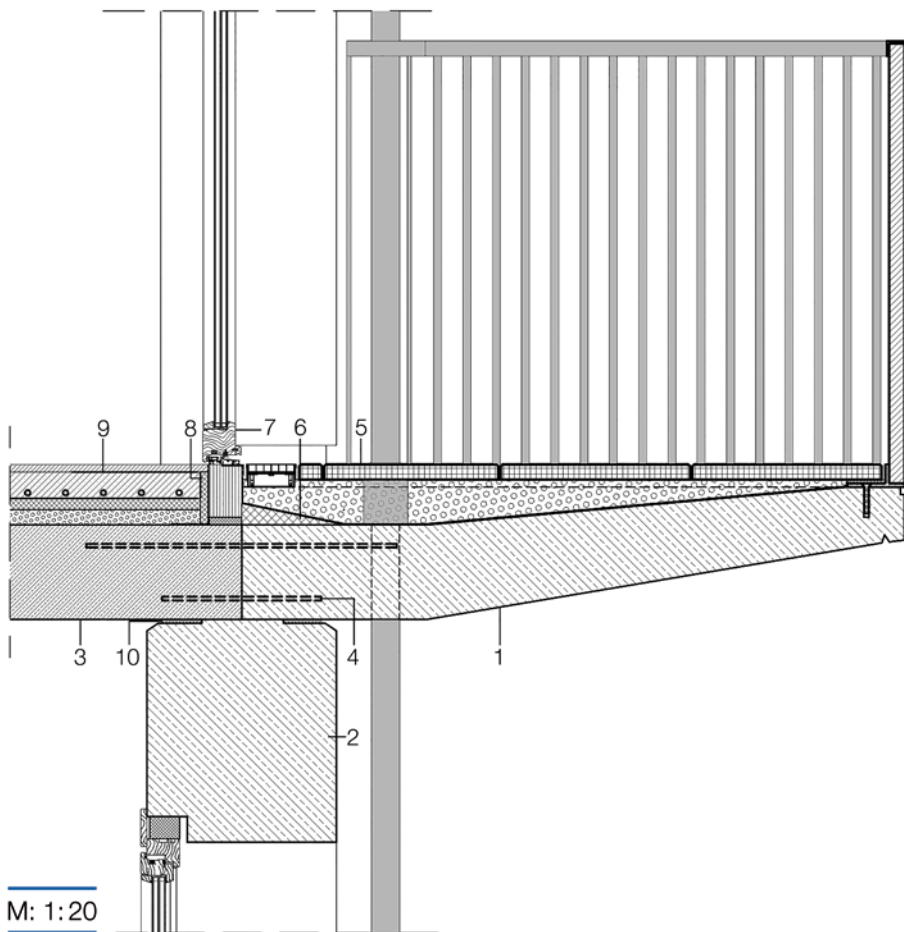
Die dargestellte, sich verjüngende Form der Balkonplatte zum Rand hin ist keine statische Notwendigkeit, sie führt zu einer Materialeinsparung sowie einer Verschmälerung der Ansichtskante des Balkons im Randbereich.

Der Balkon kann als Fertigteil vorgefertigt und dann auf der Baustelle montiert werden. Durch das geringe Gewicht von

ILC können sehr große Elemente transportiert und montiert werden. Zu beachten ist jedoch die unterschiedliche Ausdehnung von Balkon- und Geschossdecke bei hohen Differenzen zwischen Außen- und Innentemperatur, die durch entsprechende Dehnungsfugen in den Balkonplatten berücksichtigt werden sollte.

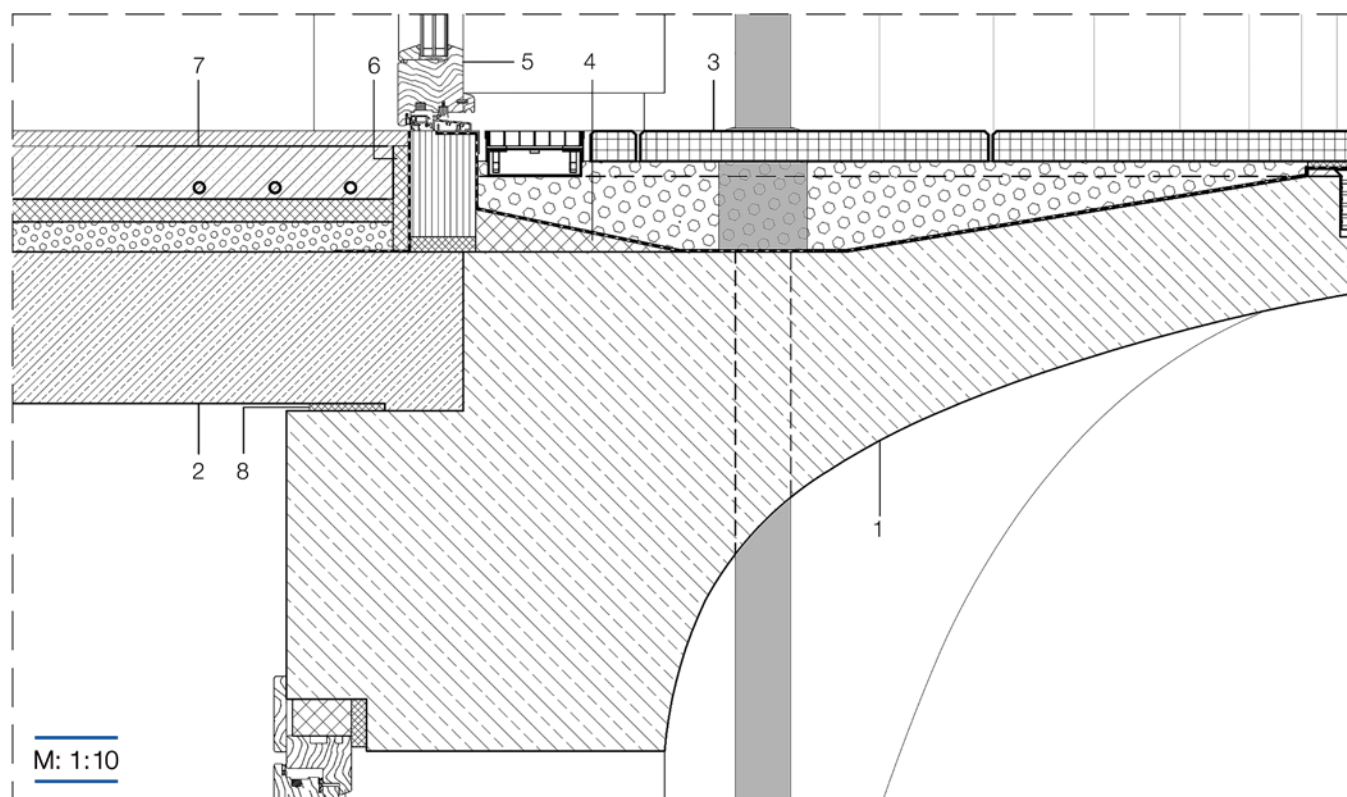
Zur Erfüllung der im Allgemeinen als Flachdachrichtlinie bezeichneten Anwendungsregel für Abdichtungen [24, 25] wird ein aufgeständerter Terrassenaufbau mit darunterliegender Abdichtung verwendet.

Aufgrund der hohen Porosität des Materials wird empfohlen, die Balkonplatten aus Infraleichtbeton nicht ohne zusätzliche Abdichtungsebene einzusetzen.



Detail 5-5 Auskragende Balkonplatte (ILC-Fertigteil) mit Rückverankerung in der Deckenplatte bei einer Außenwand aus Infraleichtbeton

- 1 Balkonplatte: ILC800, 14–25 cm
Bewehrung: Glasfaser, korrosionsbeständig
- 2 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 3 Geschossdecke: Normalbeton (NB), 2400 kg/m^3
Bewehrung: Betonstahl
- 4 durchgeführte Bewehrung, korrosionsbeständig
- 5 Terrassenaufbau:
– Abdichtung
– Flüssigkunststoff
– Kiesbett
– Betonstein
- 6 Dämmkeil
- 7 Fenster:
Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 8 Randdämmstreifen
- 9 Bodenaufbau Innenraum:
– Schüttung Blähperlite
– Trittschalldämmung
– Heizestrich
– Fußbodenbelag
- 10 Auflager: Moosgummi



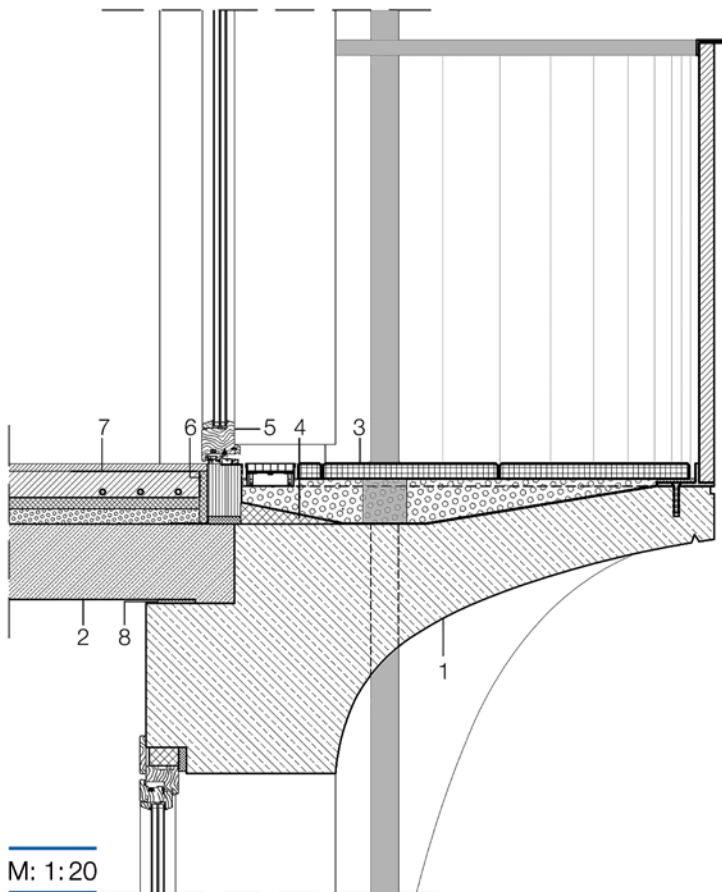
Auskragende Balkonplatte (ILC-Ortbeton) ohne Rückverankerung in der Deckenplatte bei einer Außenwand aus Infraleichtbeton

Der Balkon ist nicht in der Stahlbetondecke rückverankert, sondern entwickelt sich als eigenständiges Bauteil analog zu einer Konsole aus der Wand heraus.

Die dargestellte, sich zum Rand hin verjüngende Form der Balkonplatte ist auch hier keine statische Notwendigkeit, sie führt zu einer Materialeinsparung sowie einer Verschmäle-

rung der Ansichtskante des Balkons im Randbereich. Bei dieser Konstruktionsweise ist der Balkon als Teil der Außenwand und nicht als Deckenelement konzipiert. Die Verwendung von Balkon-Fertigteilen bei dieser Variante bietet sich daher nicht an (►vgl. Kapitel 4.2 – Die Fassade im Ortbetonbau – Anwendungspotenziale als tragende Freiform).

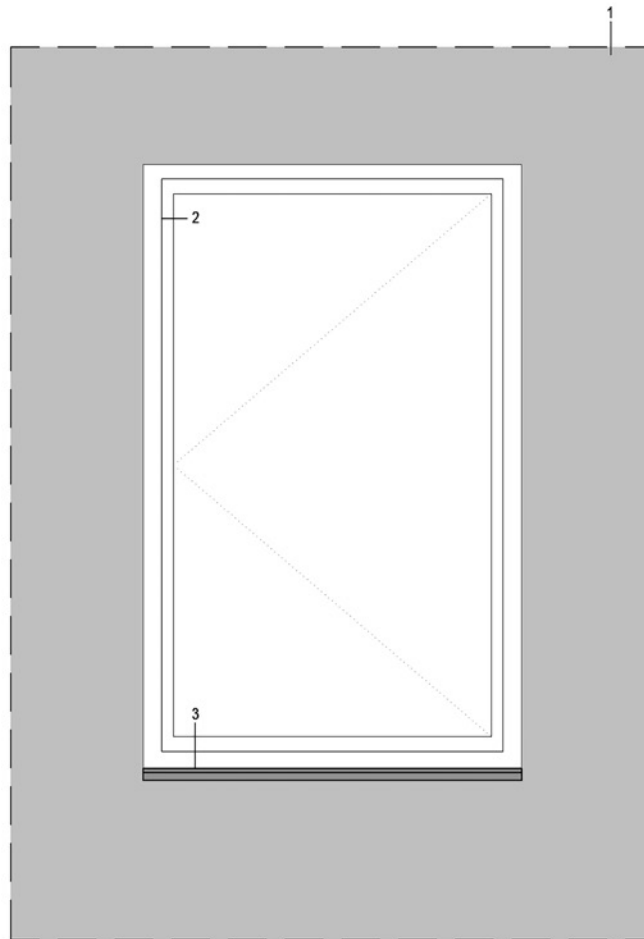
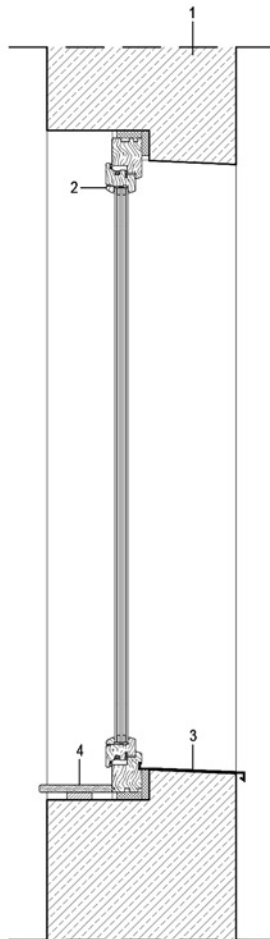
Auch bei dieser Detailausbildung wird ein aufgeständerter Terrassenaufbau mit darunterliegender Abdichtung verwendet (►vgl. Detail 5-5).



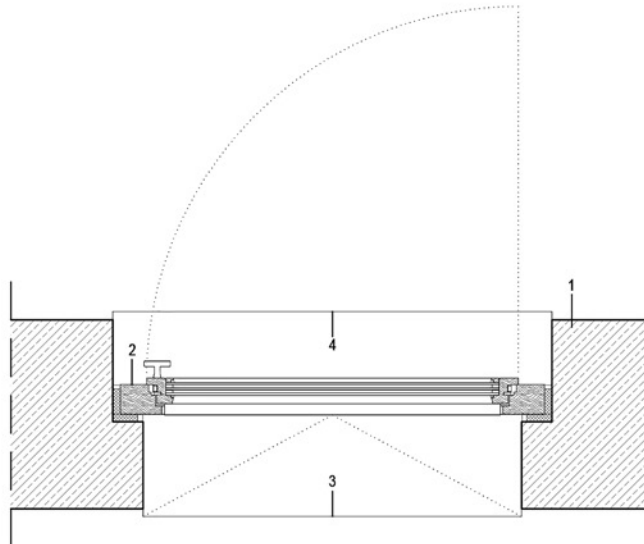
Detail 5-6 Auskragende Balkonplatte (ILC-Ortbeton) ohne Rückverankerung in der Deckenplatte bei einer Außenwand aus Infralichtbeton

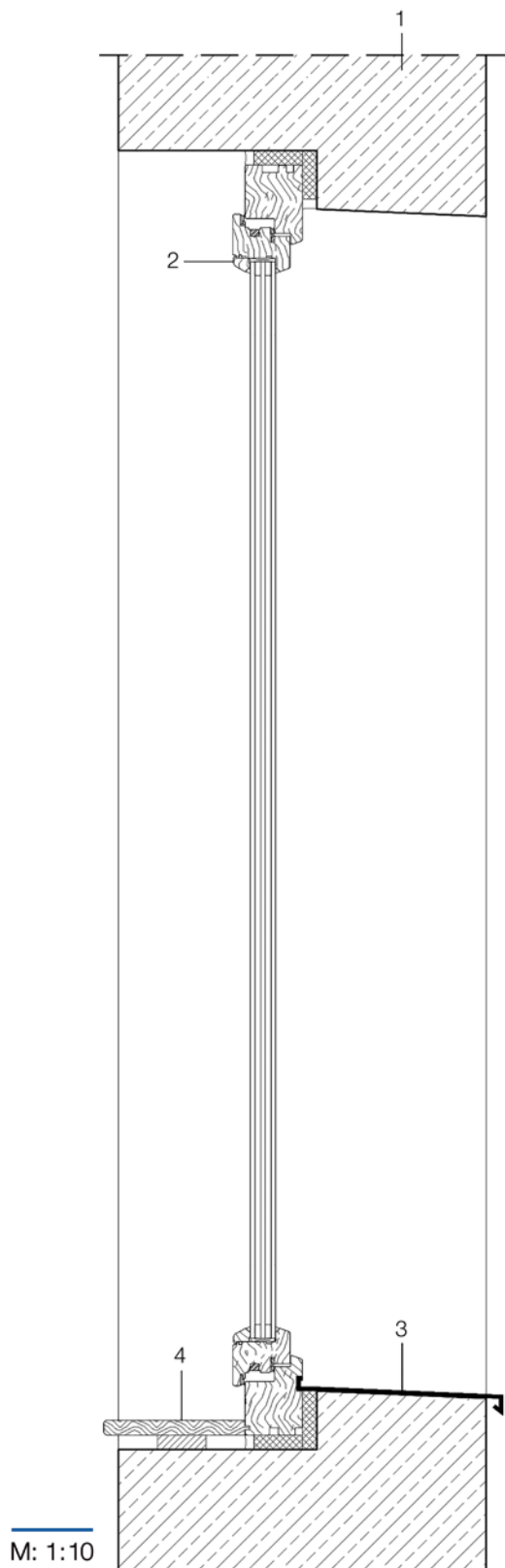
- 1 Balkonplatte: ILC800
Bewehrung: Glasfaser, korrosionsbeständig
- 2 Geschossdecke: Normalbeton (NB), 2 400 kg/m³
Bewehrung: Betonstahl
- 3 Terrassenaufbau:
– Abdichtung
– Flüssigkunststoff
– Kiesbett
– Betonstein
- 4 Dämmkeil
- 5 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 6 Randdämmstreifen
- 7 Bodenaufbau Innenraum:
– Schüttung Bläuperlite
– Trittschalldämmung
– Heizestrich
– Fußbodenbelag
- 8 Auflager: Moosgummi

5.4 Fensteranschlüsse



M: 1:20





Detail 5-7 Fensterposition mittig, mit Fensteranschlag und Fensterblech

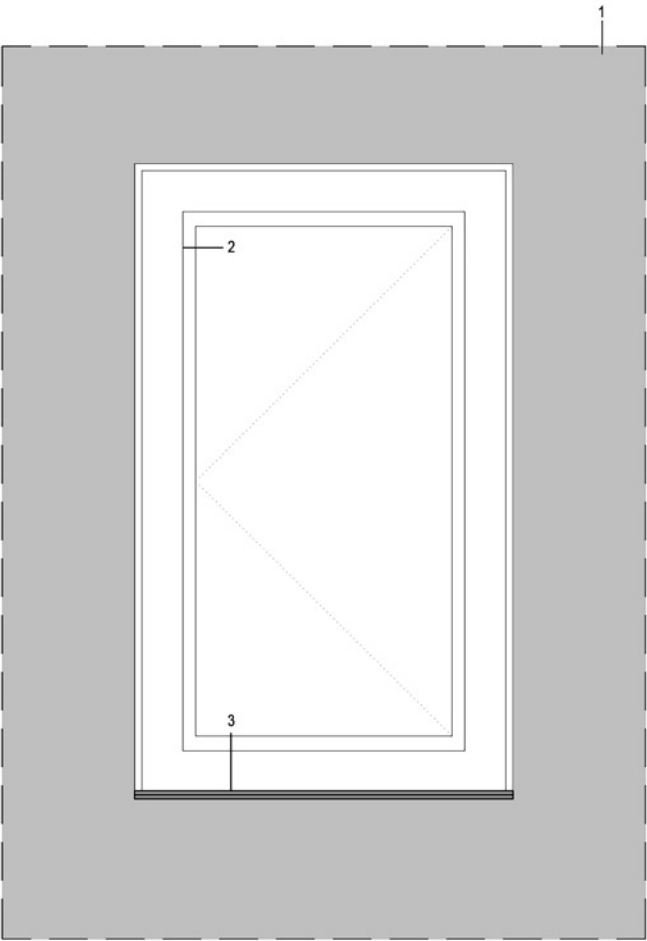
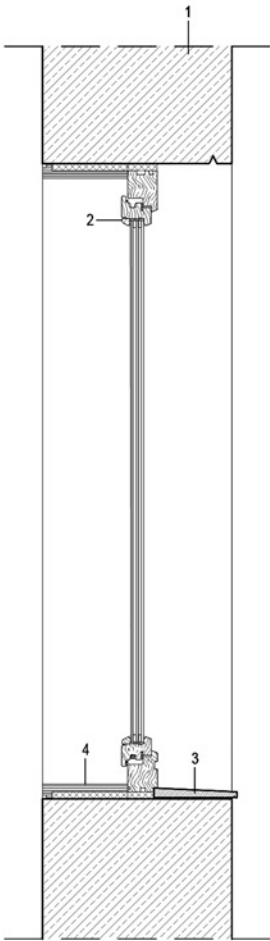
- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 3 Fensterverblechung mit Neigung aus Zink
- 4 Fensterbank innen: Vollholz

Fensterposition mittig, mit Fensteranschlag und Fensterblech

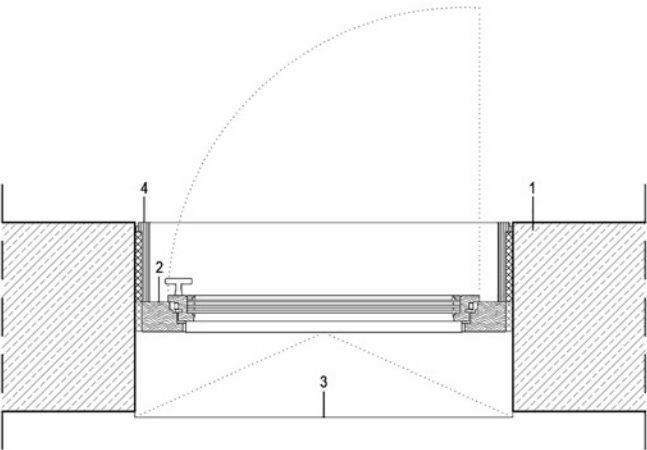
Hier gezeigt ist ein mittig in der Wand angeordnetes Fenster mit typischem 6 bis 8 cm breitem Fensteranschlag. Durch den Fensteranschlag wird die Wärmebrücke im Bereich der Fensterlaibung reduziert, sodass auf zusätzliche Dämmmaßnahmen verzichtet werden kann.

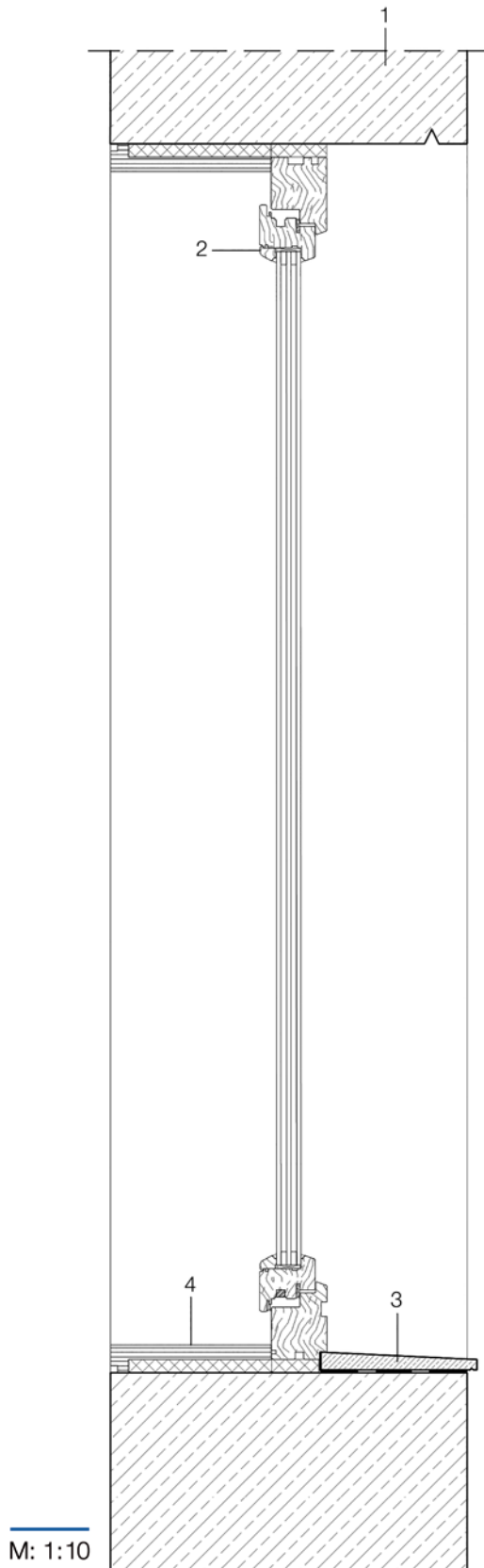
Um zusätzliche Schalkkosten und langfristige Bauschäden zu vermeiden, wird die innenliegende Fensterbrüstung mit einem konventionellen Fensterbrett ausgestattet. Im Außenbereich wird ein Fensterblech auf der schrägen Auflagerfläche befestigt.

Der Fenstersturz kann ebenfalls mit einem leichten Winkel ausgebildet werden, um eine sichere Ablaufkante oberhalb des Fensters zu gewährleisten.



M: 1:20





Detail 5-8 Fensterposition mittig, ohne Fensteranschlag, mit Formsteinelement

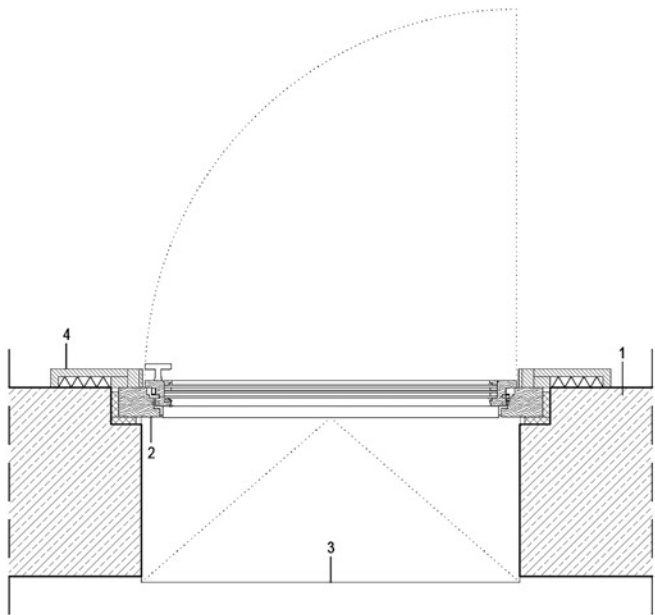
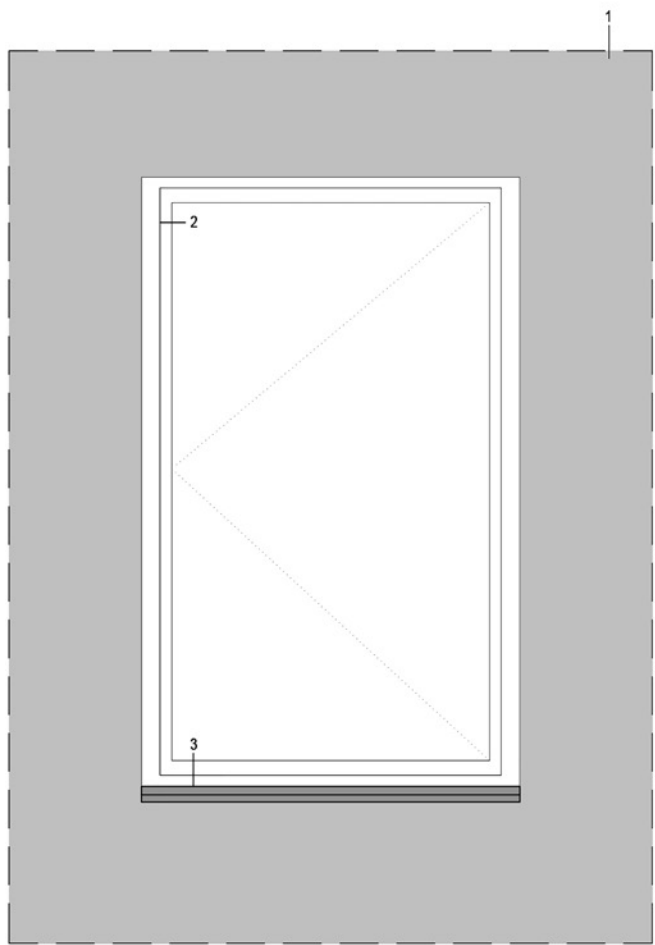
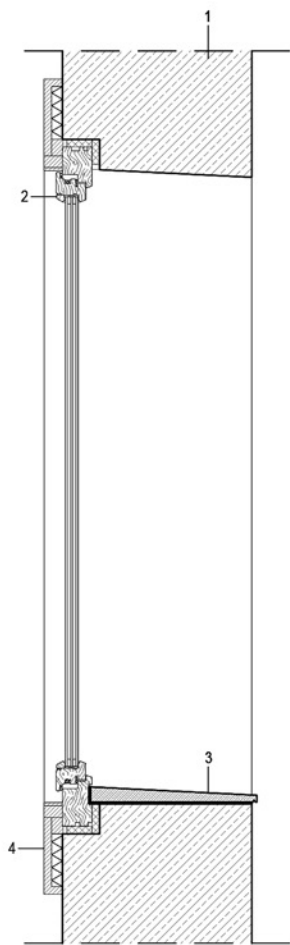
- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Fenster:
Holzfenster mit
Dreischeibenverglasung
- 3 Sohlbankenelement:
Element aus WU-Faserzement
- 4 Verkleidung der inneren Laibung:
– Vollholz
– Laibungsdämmplatte 20 mm,
WL 020,
vollflächig verklebt

Fensterposition mittig, ohne Fensteranschlag, mit Formsteinelement

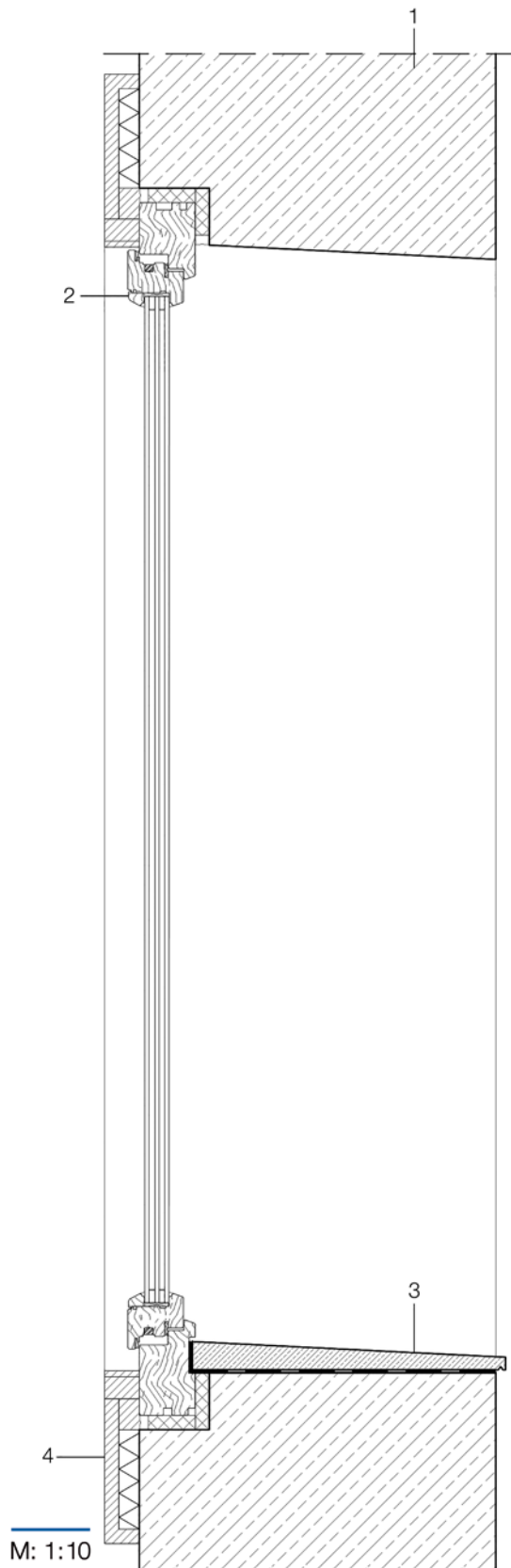
Hier gezeigt ist ein mittig in der Wand angeordnetes Fenster ohne zusätzlichen Fensteranschlag. Um die Gefahr des Tauwasserausfalls im Bereich der inneren Fensterlaibung zu reduzieren, sollte das Fenster umlaufend mit einer gedämmten Innenlaibung ausgestattet werden. Die Dicke der Dämmung sollte bei 20 bis 25 mm liegen. Je nach Dämmmaterial ist eine zusätzliche Dampfbremse zu verwenden.

Im Außenbereich kann alternativ zu einem Fensterblech (► siehe Detail 5-7) auch ein geeignetes Formsteinelement verwendet werden. Die Fensterbrüstung kann zusätzlich unterhalb des Formsteinelementes abgedichtet werden.

Alternativ zur angeschrägten Ausführung des Fenstersturzes (► siehe Detail 5-7) wurde der Fenstersturz hier mit einer in die Schalung eingelegten Dreiecksleiste ausgebildet.



M: 1:20

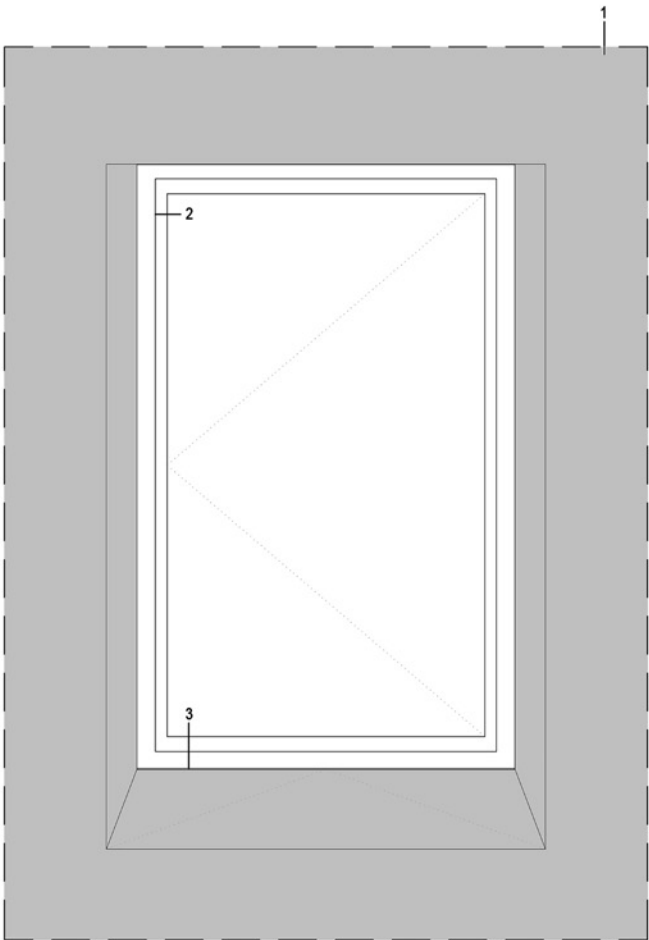
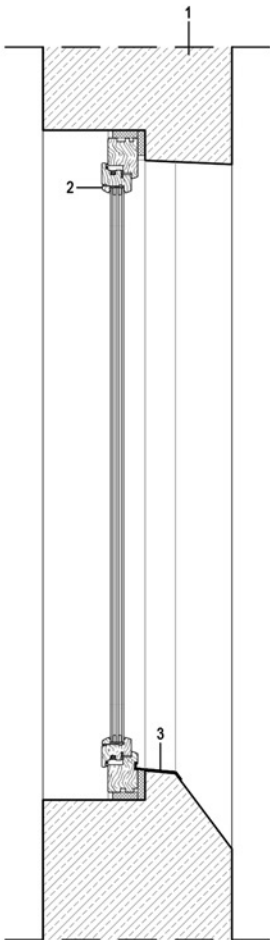


Detail 5-9 Fensterposition innen,
mit Fensteranschlag und
Formsteinelement

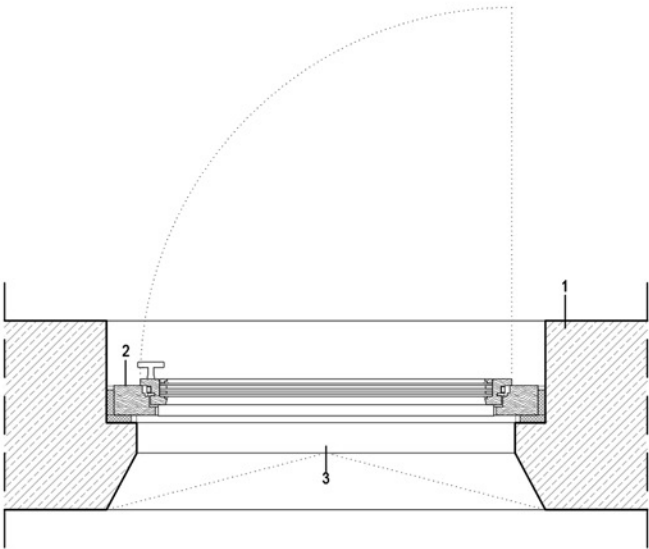
- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Fenster:
Holzfenster mit
Dreischeibenverglasung
- 3 Sohlbänkelement:
Element aus WU-Faserzement
- 4 Fensterrahmen innen:
Holz mit Laibungsdämmplatte,
30 mm,
WLG 020,
vollflächig verklebt

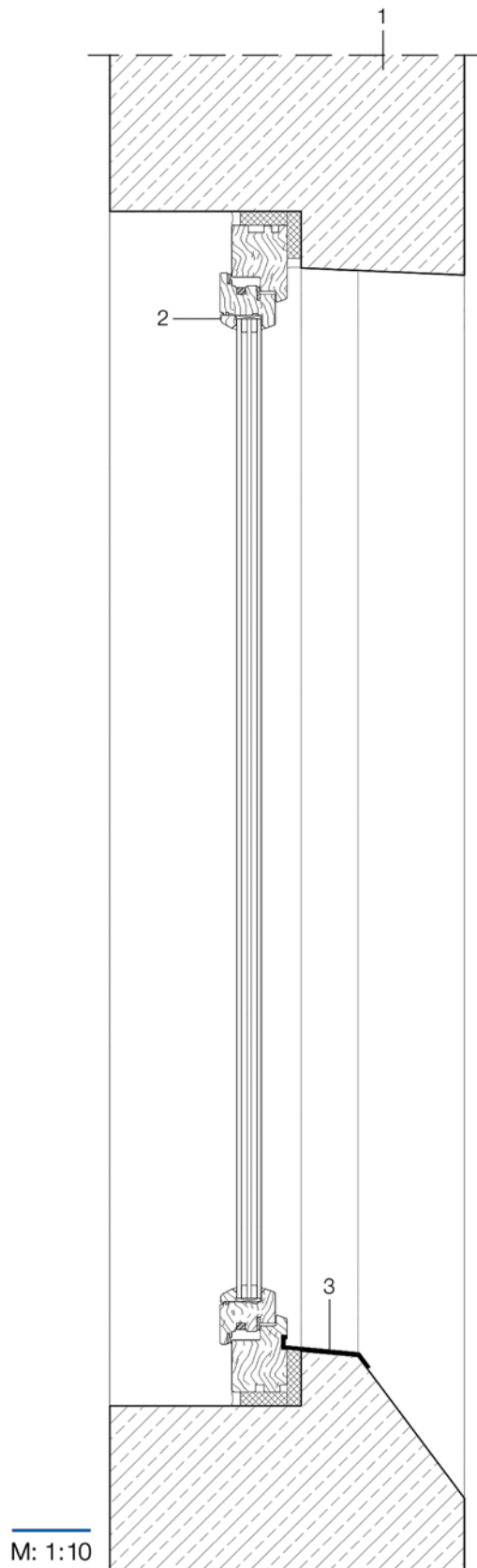
Fensterposition innen, mit Fensteranschlag und Formsteinelement

Das Fenster wird innenbündig in die Wand eingesetzt. Um die Gefahr des Tauwasserausfalls im Bereich der Fensterlaibung zu reduzieren, sollte das Fenster umlaufend mit einem gedämmten Innenrahmen ausgestattet werden. Für die Lösung des Details der Fensterbrüstung außen sowie des Fenstersturzes sind unterschiedliche Varianten möglich (►vgl. Detail 5-7 und 5-8).



M: 1:20





Detail 5-10 Fensterposition mittig, mit Fensteranschlag, geneigter Betonfläche und zusätzlichem Fensterblech

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 3 Fensterverblechung mit Neigung im Bereich des horizontalen Fensteranschlags, Fensterbank außen aus hydrophobiertem Sichtbeton

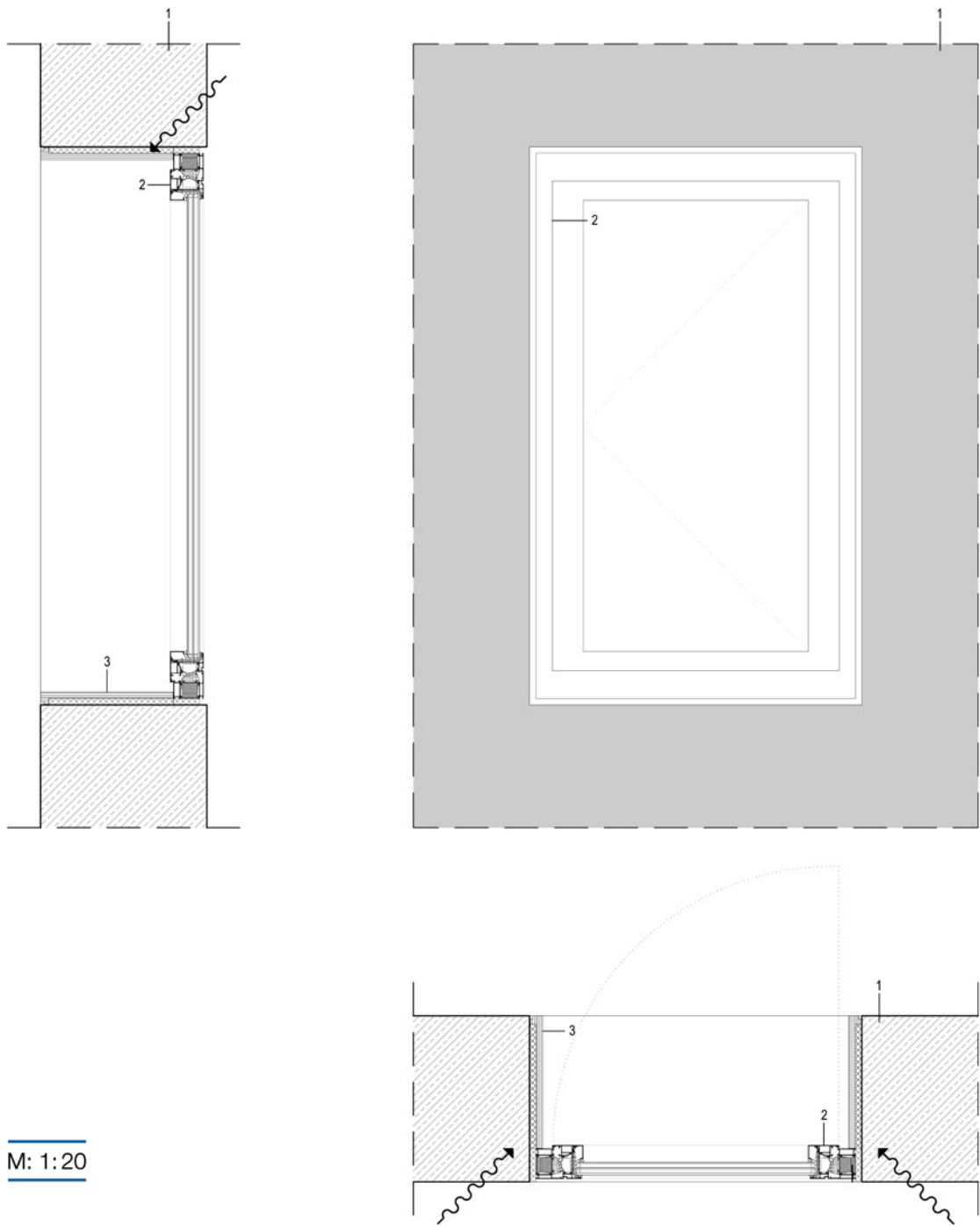
Fensterposition mittig, mit Fensteranschlag, geneigter Betonfläche und zusätzlichem Fensterblech

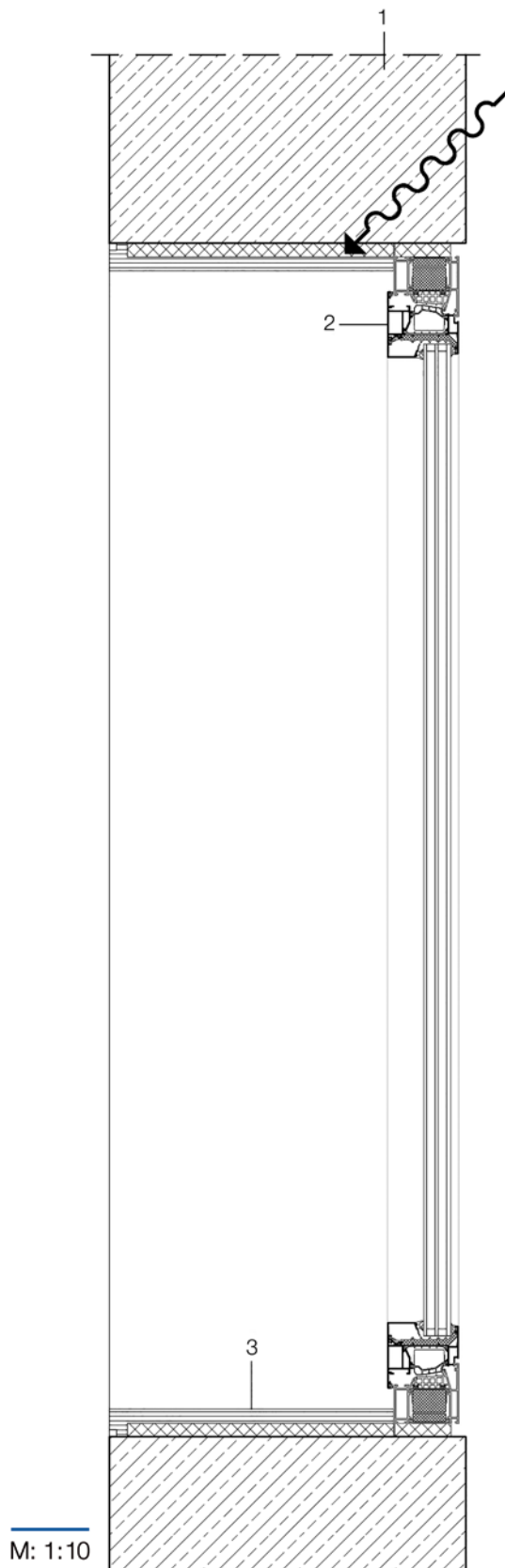
Das Fenster ist mittig in der Wand angeordnet mit Fensteranschlag und Fensterbrüstung aus hydrophobiertem ILC. Durch den Fensteranschlag wird die Wärmebrücke im Bereich der Fensterlaibung reduziert, sodass auf zusätzliche Dämmmaßnahmen verzichtet werden kann.

Um ein außenliegendes Fensterbrett weitgehend zu vermeiden, wird die monolithische Fensterbrüstung außen mit einem sehr großen Ablaufwinkel ausgestattet.

Im horizontalen Bereich der Aufkantung (Pos.3) wird ein Winkel aus Blech mit einer Neigung von ca. 3° in den Unterschnitt des Fensters eingeschoben. Eine zusätzliche Hydrophobierung der Flächen ist unbedingt anzuraten.

Hinweis: Dieses Detail wurde in ähnlicher Form in Prototypen realisiert und das Verhalten bei Starkregen simuliert. Aus der Praxis gibt es keine Erfahrungen. Die hohe Wasseraufnahmefähigkeit des Materials legt nahe, dass Lösungen mit Brüstungselementen aus Metall oder hochfestem Beton dauerhafter sind.





Detail 5-11 Fensterposition außen, ohne Anschlag

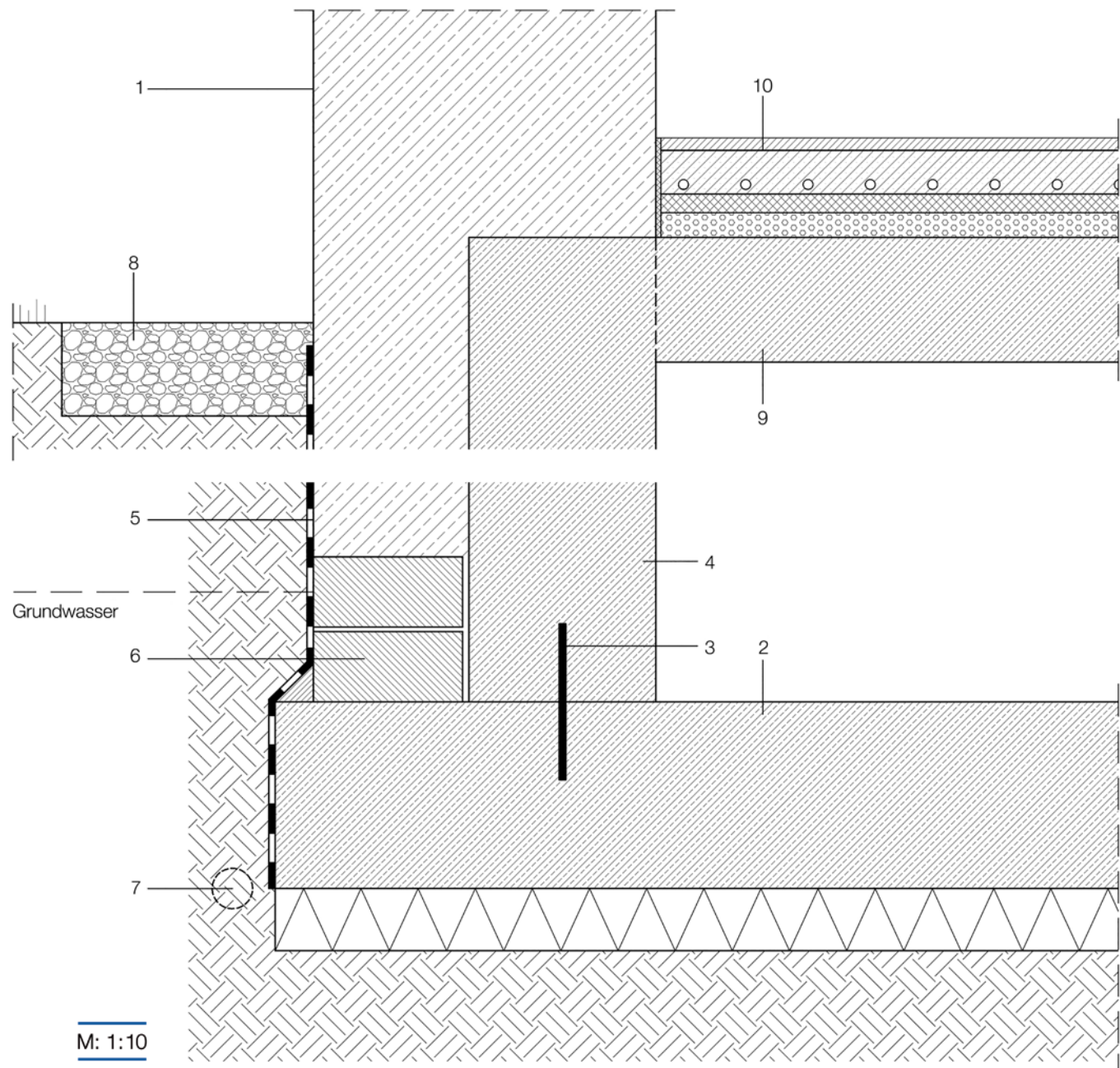
- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Fenster:
Aluminiumfenster mit
Dreischeibenverglasung
- 3 Verkleidung der
inneren Laibung mit Vollholz,
Laibungsdämmplatte 20 mm,
WLG 020,
vollflächig verklebt

Fensterposition außen, ohne Anschlag

Das außenbündige Fenster stellt einen Sonderfall in der Betrachtung dar. Trotz der unbestreitbaren architektonischen Qualitäten dieser Lösung ist diese gerade im Fall von Infraleichtbeton als kritisch zu betrachten. Durch die hohe Wasseraufnahmefähigkeit des Materials bei Schlagregenfällen direkt auf die Fassade kann es hier aus der Sicht der Autoren zu starken Durchfeuchtungen im Bereich der inneren Laibung kommen.

Aus diesem Grund wird diese Lösung beim derzeitigen Stand der Technik und der Werkstoffentwicklung nicht zur Ausführung empfohlen.

5.5 Fußpunkte



Detail 5-12 Gebäude unterkellert, Außenwand aus ILC auf Sohlplatte heruntergeführt

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Sohlplatte: WU-Beton und Dämmschicht
- 3 Fugenbleche
- 4 Kellerwand: WU-Beton
- 5 vertikale Abdichtung
- 6 KS-Stein bis
Grundwasserspiegel
- 7 Drainage nach
Bodenverhältnissen
- 8 Kiesschicht
- 9 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2400 kg/m³
- 10 Bodenaufbau:
 - Schüttung Blähpelrite
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag

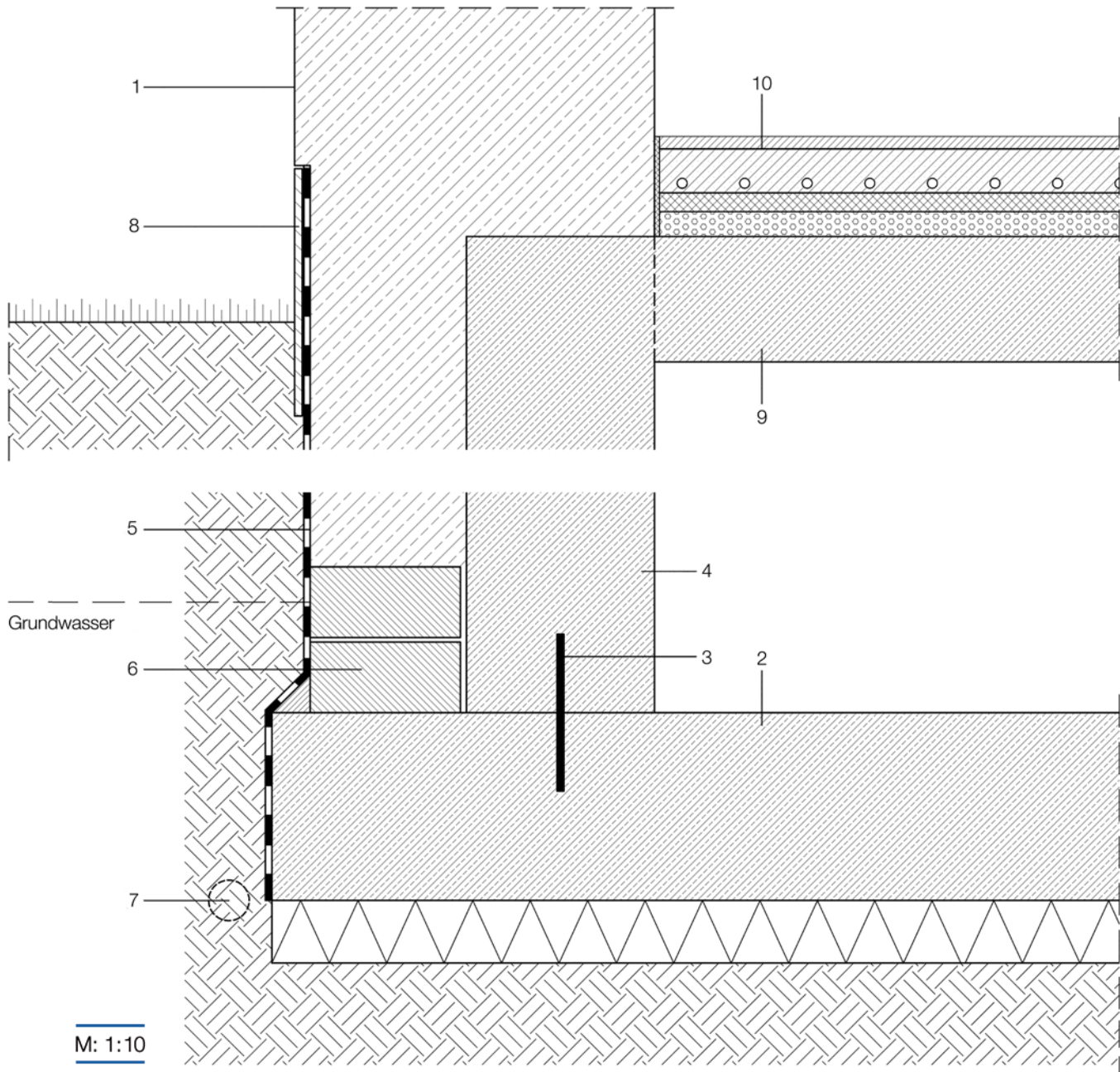
Gebäude unterkellert, Außenwand aus ILC auf Sohlplatte heruntergeführt

Das Gebäude ist vollflächig unterkellert. Die Außenwand aus Infraleichtbeton wird als dämmende Außenschale vor der Kellerwand aus WU-Beton heruntergeführt.

Aufgrund der hohen Wasseraufnahmefähigkeit des Materials sollte die Kellerwand außen vollflächig abgedichtet werden. Niveauunterschiede zwischen Erdgeschoss und Kellergeschoss sind entwurfsabhängig. Die Betonwand des Gebäudes läuft ohne Übergang in das Erdreich.

Im Falle eines Gebäudes ohne Unterkellerung ist das Detail entsprechend anzupassen.

Hinweis: Bei dem hier dargestellten Detail kann es aufgrund von Spritzwasser zu Durchfeuchtungen der Außenwand im Übergangsbereich von Außenluft zu Erdreich kommen. Je nach Ausbildung des Dachrandes/Dachüberstandes kann das Detail entsprechend angepasst werden (z. B. Hydrophobierung des Sockels; Abdichtung über das Erdreich führen, ► vgl. Detail 5-13).



Detail 5-13 Gebäude unterkellert, Außenwand aus ILC
auf Sohlplatte heruntergeführt, Sockel abgedichtet

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Sohlplatte: WU-Beton und Dämmschicht
- 3 Fugenbleche
- 4 Kellerwand WU-Beton
- 5 vertikale Abdichtung
- 6 KS-Stein bis
Grundwasserspiegel
- 7 Drainage nach
Bodenverhältnissen
- 8 Bodeneinbindende Platte
aus Faserzement
- 9 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2 400 kg/m³
- 10 Bodenaufbau:
 - Schüttung Blähpelrite
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag

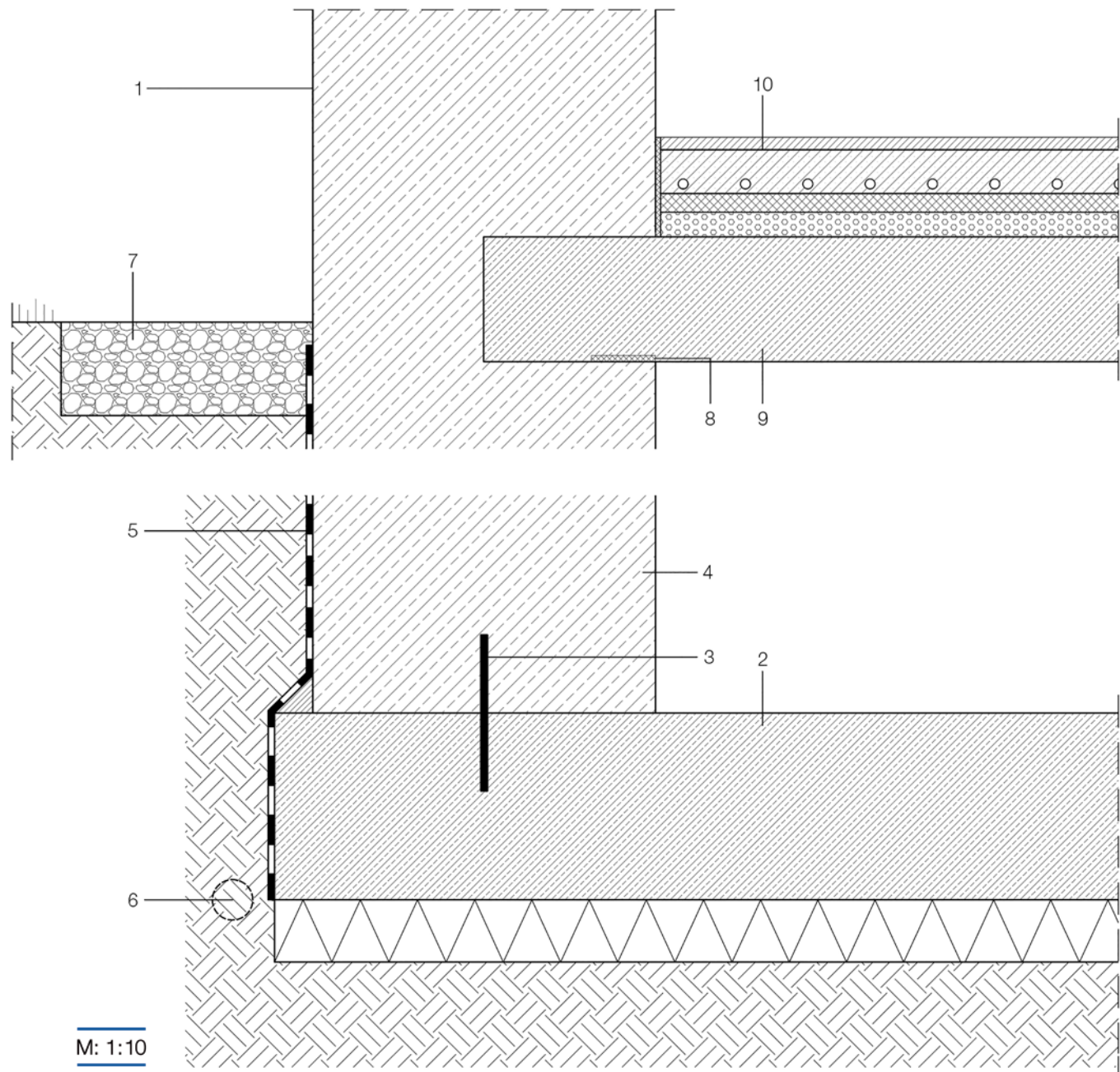
**Gebäude unterkellert, Außenwand aus ILC
auf Sohlplatte heruntergeführt, Sockel abgedichtet**

Das Gebäude ist vollflächig unterkellert. Die Außenwand aus Infralichtbeton wird als dämmende Außenschale vor der Kellerwand aus WU-Beton heruntergeführt.

Aufgrund der hohen Wasseraufnahmefähigkeit des Materials sollte die Kellerwand außen vollflächig abgedichtet werden. Um die Sockeldurchfeuchtung durch Spritzwasser zu ver-

meiden, wird die Abdichtung bis ca. 30 cm über das Erdreich geführt. Eine bis in das Erdreich hineingeführte Platte aus Faserzement bildet den unteren Abschluss des Gebäudes.

Niveauunterschiede zwischen Erdgeschoss und Kellergeschoss sind entwurfsabhängig. Im Falle eines Gebäudes ohne Unterkellerung ist das Detail entsprechend anzupassen.



Detail 5-14 Gebäude unterkellert,
Kellerwand aus ILC

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Sohlplatte: WU-Beton
und Dämmschicht
- 3 Fugenbleche optional
- 4 Kellerwand: ILC
- 5 vertikale Abdichtung
- 6 Drainage nach
Bodenverhältnissen
- 7 Kiesschicht
- 8 Auflager: Moosgummi, 10 mm
- 9 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2 400 kg/m³
- 10 Bodenaufbau:
 - Schüttung Blähpelrite
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag

Gebäude unterkellert, Kellerwand aus ILC

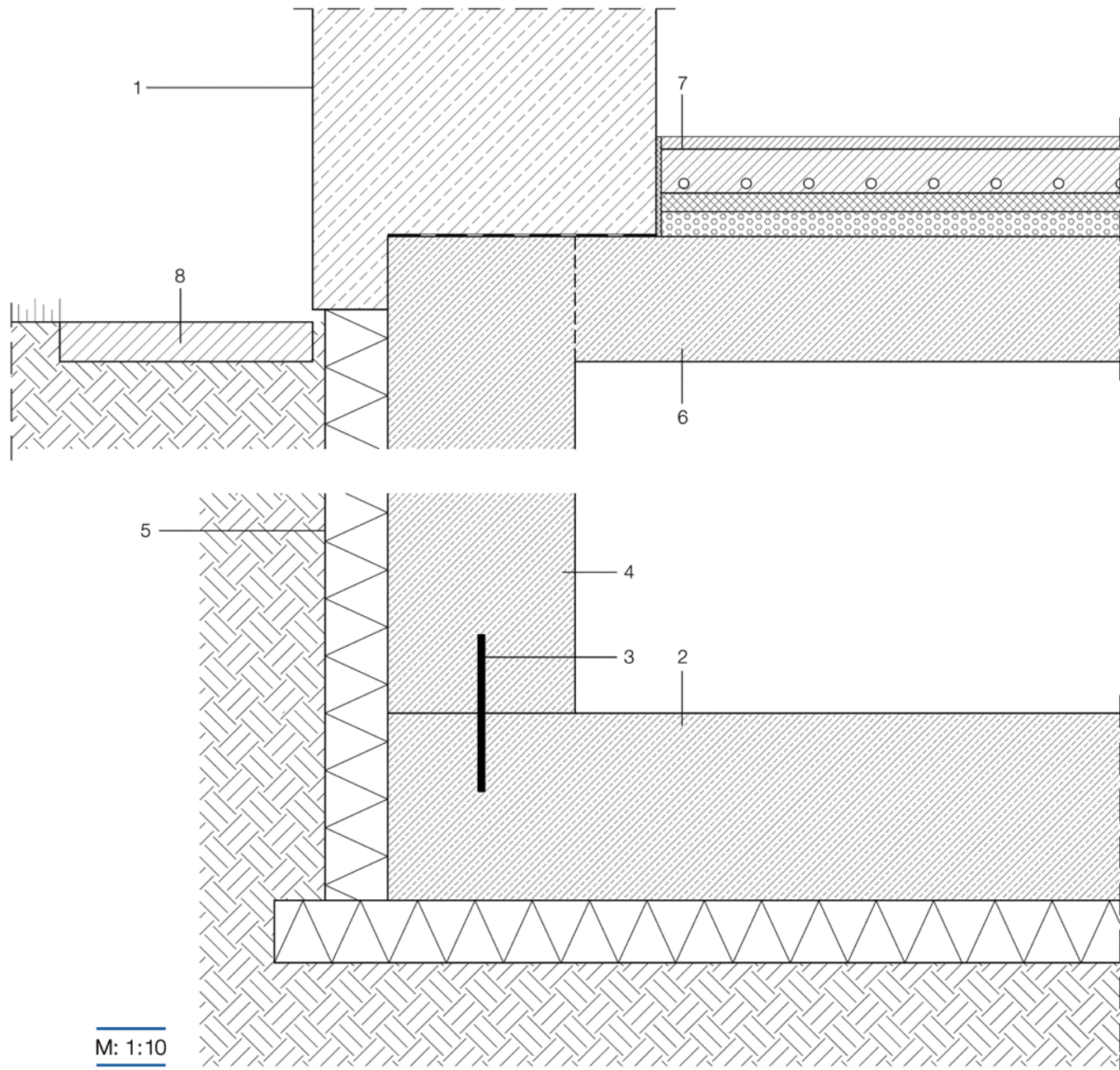
Das Gebäude ist vollflächig unterkellert. Die Außenwand aus Infralichtbeton wird als tragendes und dämmendes Außenbauteil nach unten durchgeführt.

Aufgrund der hohen Wasseraufnahmefähigkeit des Materials sollte die Kellerwand außen vollflächig abgedichtet werden.

Niveauunterschiede zwischen Erdgeschoss und Kellergeschoss sind entwurfsabhängig. Die Betonwand des Gebäudes läuft ohne Übergang in das Erdreich.

Im Falle eines Gebäudes ohne Unterkellerung ist das Detail entsprechend anzupassen.

Hinweis: Bei dem hier dargestellten Detail kann es aufgrund von Spritzwasser zu Durchfeuchtungen der Außenwand im Übergangsbereich Außenluft zu Erdreich kommen. Je nach Ausbildung des Dachrandes/Dachüberstandes kann das Detail entsprechend angepasst werden.



Detail 5-15 Gebäude unterkellert,
ILC endet am Übergang zum Erdreich

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Sohlplatte: WU-Beton
und Dämmschicht
- 3 Fugenbleche
- 4 Kellerwand: WU-Beton
- 5 Kellerdämmung: XPS
- 6 Geschossdecke: Normalbeton (NB),
2 400 kg/m³
- 7 Bodenaufbau:
 - Schüttung Blähperlite
 - Trittschalldämmung
 - Heizestrich
 - Fußbodenbelag
- 8 umlaufender Spritzschutz
aus Betonwerkstein

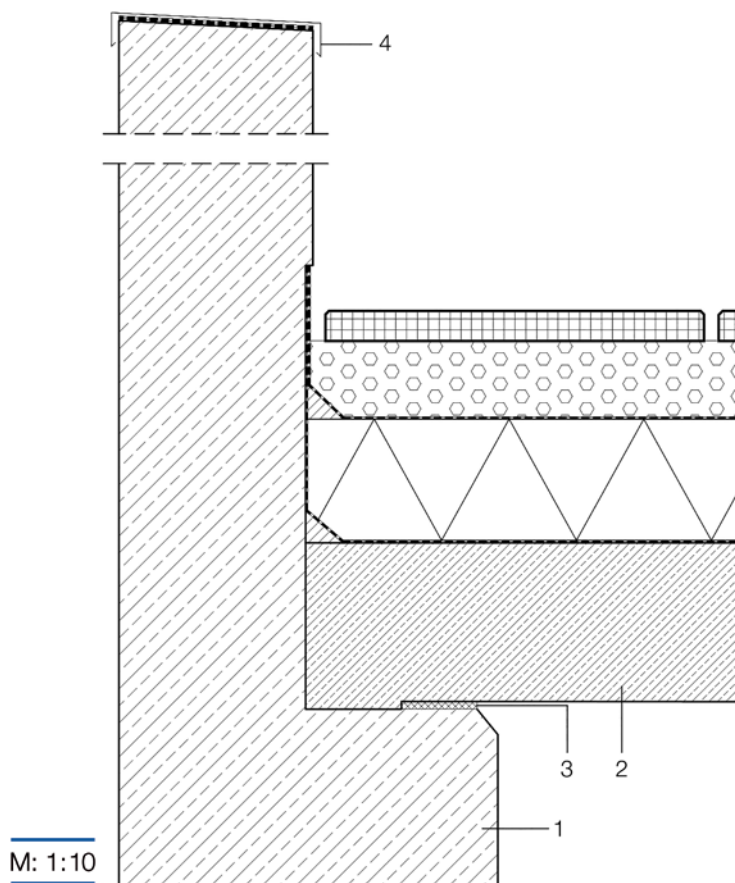
Gebäude unterkellert, ILC endet am Übergang zum Erdreich

Das Gebäude ist vollflächig unterkellert. Die Außenwand aus Infralichtbeton endet im Bereich des Übergangs zwischen Erdgeschoss und Kellergeschoss. Die Wand des Kellergeschosses aus WU-Beton wird mit einer Perimeterdämmung aus Polystyrol-Extruderschäumstoff (XPS) gedämmt und braucht keine zusätzliche Abdichtung.

Niveauunterschiede zwischen Erdgeschoss und Kellergeschoss sind entwurfsabhängig. Im Falle eines Gebäudes ohne Unterkellerung ist das Detail entsprechend anzupassen.

Hinweis: Bei dem hier dargestellten Detail kann es zu Durchfeuchtungen der Außenwand im Übergangsbereich Außenluft zu Erdreich kommen. Diese sind allerdings lediglich auf Spritzwasser zurückzuführen.

5.6 Attikaanschluss bei Flachdächern



Detail 5-16 Attika mit Sichtbetonfläche auf der Innenseite

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Flachdachaufbau:
 - Normalbetonplatte, 210 mm
 - Dampfsperre
 - Dämmung, 160 mm im Mittel
 - Dämmstoffkeile in den Randbereichen
 - Abdichtung
 - Kiesschüttung, 100 mm
 - Betonplatten, 40 mm
- 3 Auflager: Moosgummi, 10 mm
- 4 Attikaverblechung

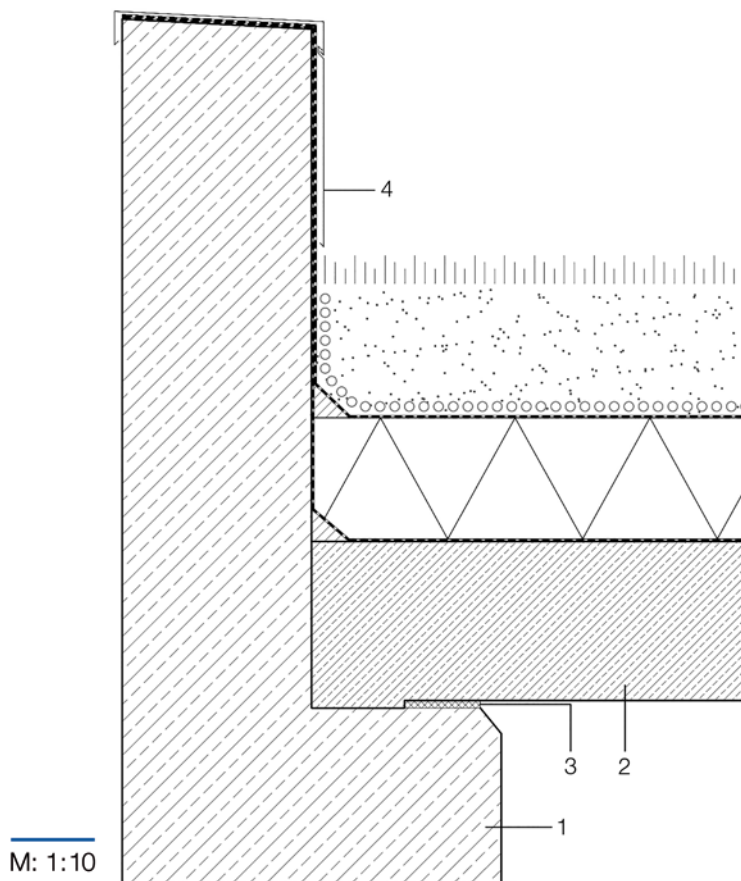
Attika mit Sichtbetonfläche auf der Innenseite

Hier gezeigt ist eine Attika mit einer Innenseite aus Sichtbeton, z. B. als Terrassenbrüstung. Die Attika verjüngt sich am Auflagerpunkt des Flachdachs aus Normalbeton.

Die Dachabdichtung kann entweder auf der Oberseite der Dämmung oder aber auf der Unterseite also direkt auf dem Betonflachdach (Umkehrdach, hier nicht dargestellt) ange-

bracht werden. Die Abdichtung wird dann am Übergang zum Terrassenbelag an der Attika hochgeführt.

Hinweis: Bei möglichen Schneeanhäufungen drohen Undichtigkeiten. Die Oberkante der Brüstung sollte mit geeigneten Materialien (hier Blechabdeckung als eine Möglichkeit) abgedichtet sein. Alternativ kann hier z. B. auch ein Beton-Fertigteilelement verwendet werden.



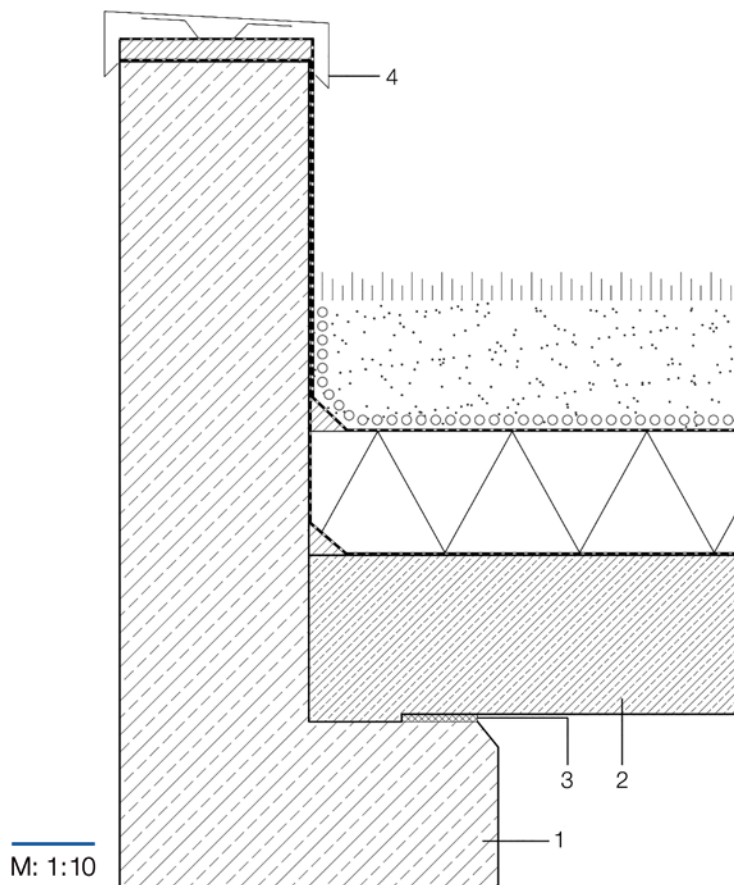
Detail 5-17 Attika mit Abdichtung auf der Innenseite und Verblechung

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Flachdachaufbau:
 - Normalbetonplatte, 210 mm
 - Dampfsperre
 - Dämmung, 160 mm im Mittel
 - Dämmstoffkeile in den Randbereichen
 - Abdichtung, Drainageschicht
 - Dachbegrünung, 170 mm
- 3 Auflager: Moosgummi, 10 mm
- 4 Attikaverblechung innen
an der Attika heruntergeführt

Attika mit Abdichtung auf der Innenseite und Verblechung

Hier gezeigt ist eine Attika mit Abdichtung auf der Innenseite und zusätzlicher Verblechung; die Attika verjüngt sich am Auflagerpunkt des Flachdachs aus Normalbeton.

Die Dachabdichtung kann entweder auf der Unterseite der Dämmung, auf der Oberseite der Dämmung oder auf dem Betonflachdach (Umkehrdach, hier nicht dargestellt) angebracht werden.

**Detail 5-18** Attika mit Abdichtung auf der Innenseite

- 1 Außenwand: ILC, 50–60 cm
Bewehrung, korrosionsbeständig
- 2 Flachdachaufbau:
 - Normalbetonplatte, 210 mm
 - Dampfsperre
 - Dämmung, 160 mm im Mittel
 - Dämmstoffkeile in den Randbereichen
 - Abdichtung
 - Drainageschicht
 - Dachbegrünung, 170 mm
- 3 Auflager: Moosgummi, 10 mm
- 4 Zinkblechabdeckung
Multiplexauflage
Zinkblech, 0,7 mm

Attika mit Abdichtung auf der Innenseite

Bei der hier gezeigten Attika mit Abdichtung auf der Innenseite wird die Abdichtungsebene (Kunststoff oder Bitumen) hochgeführt; die Attika verjüngt sich am Auflagerpunkt des Flachdachs aus Normalbeton. An frei exponierten Stellen muss die Abdichtung UV-beständig ausgeführt werden.

Die Dachabdichtung kann entweder auf der Unterseite der Dämmung, auf der Oberseite der Dämmung oder auf dem

Betonflachdach (Umkehrdach, hier nicht dargestellt) angebracht werden.

Zum Ausgleich von Ungenauigkeiten im Betoniervorgang wird hier eine konventionelle Attikaverblechung mit Auflager aus Multiplexplatten angebracht.



6 Grundlagen der Planung

- 6.1 Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung
- 6.2 Infraleichtbeton im Kontext der EnEV
- 6.3 Bauphysikalische Eigenschaften
- 6.4 Dynamische simulationsbasierte Untersuchungen
- 6.5 Ökobilanz
- 6.6 Kosten
- 6.7 Rechtliche Grundlagen

Infraleichtbeton ist ein sehr leichter konstruktiver Leichtbeton, der in vielen Eigenschaften konventionellen Leichtbetonen ähnelt, sich aber in manchen Eigenschaften dennoch deutlich unterscheidet. Diesen Eigenschaften muss bei der Planung Rechnung getragen werden. Das betrifft neben den Bereichen Tragverhalten, Konstruktion und Dauerhaftigkeit auch die Bauphysik (Wärmeschutz, Schallschutz, Brandschutz etc.) sowie weitere planerische Aspekte, wie z. B. die Ausschulfristen, und natürlich die Kosten.

Die nächsten beiden Kapitel sollen Ansätze zur Planung mit Infraleichtbeton aufzeigen. Weitestgehend wird dabei auf ILC-spezifische Erkenntnisse zurückgegriffen, die auf Forschungsergebnissen der TU Berlin beruhen. Bei Themen, zu denen noch keine expliziten Ergebnisse für Infraleichtbeton vorliegen, wird einschlägige Literatur herangezogen, um hierauf basierend Planungsansätze vorzuschlagen.

Infraleichtbeton wird weder von der gültigen Norm erfasst, noch liegt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) vor. Alle hier aufgeführten Ansätze sind daher im Rahmen eines Verfahrens zur Zustimmung im Einzelfall (ZiE) zu prüfen, abzustimmen und ggf. den Erfordernissen des jeweiligen Bauvorhabens anzupassen.

6.1 Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung

Zu Beginn der Planung eines Gebäudes mit monolithischen Wänden aus Infraleichtbeton stellen sich für viele Planer stets die gleichen Fragen. Eine der ersten Fragen des Architekten wird beispielsweise sein, welche Wanddicke zur Einhaltung der statischen und bauphysikalischen Anforderungen notwendig ist.

Ohne konkretes Wissen sind hier zeitaufwendige Informationsbeschaffung und Detailabstimmungen durch Architekt, Tragwerksplaner und Energieberater zu erbringen. Oft sind bereits dieser Mangel an grundlegenden Erfahrungen und der damit verbundene Mehraufwand der Planung für Bauherren und Planer ein wesentlicher Grund, warum neue Baustoffe wie Infraleichtbeton als Option für die Hülle des Gebäudes ausgeschlossen werden.

Um diesen Mangel an Information zumindest in Teilen zu kompensieren, wurden unterschiedliche exemplarische Testentwürfe für Wohngebäude erarbeitet und diese im Hinblick auf die statischen und energetischen Anforderungen nach derzeitigem Kenntnisstand vorbereiten (**► siehe hierzu auch Kap. 4**). Die Ergebnisse dieser Studie wurden in einer Parametertabelle zusammengefasst, die Planern zur groben Vorplanung künftiger Gebäude dienen sollen. Die Tabelle ersetzt selbstverständlich nicht die in einem Planungsprozess notwendige Ausarbeitung eines Projektes, bietet jedoch zumindest eine Ausgangsbasis für die weitere Arbeit.

Dargestellt ist zunächst die mögliche Geschosshöhe bei unterschiedlichen Rohdichteklassen von Infraleichtbeton für die Wanddicken von 50 und 60 cm für den Gebäudeentwurf des exemplarischen, freistehenden Wohngebäudes aus Kap. 4.1. Da die realisierbaren Geschosshöhen maßgeblich vom Entwurf bzw. Tragkonzept eines Gebäudes abhängen, sind diese Angaben nur als Anhaltspunkte zu verstehen. Durch die entsprechende Wahl des Tragwerks und Maßnahmen, wie z. B. einer Staffelung der ILC-Rohdichten über die Gebäudehöhe, sind auch größere Geschosshöhen machbar.

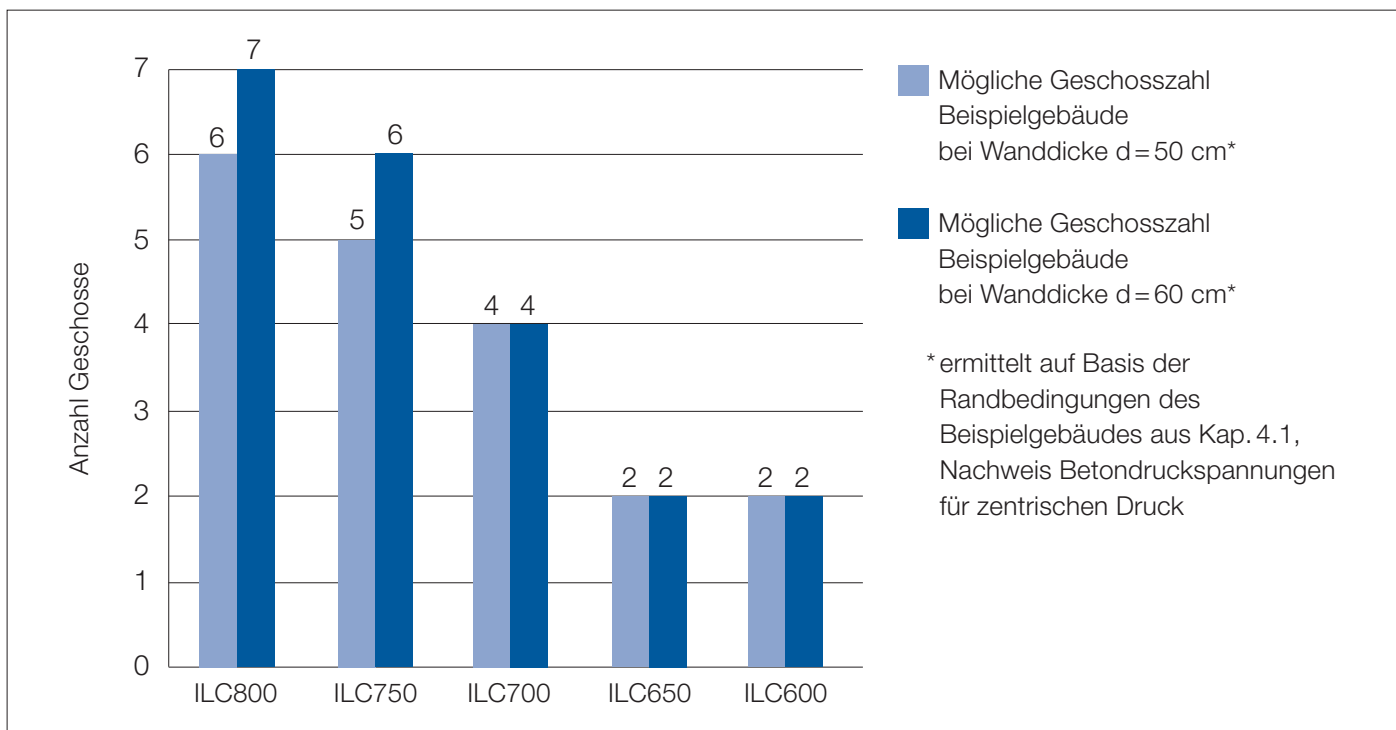


Bild 6-1 Mögliche Geschosshöhen des Beispielgebäudes aus Kap. 4.1 in Abhängigkeit der ILC-Klasse

Die folgende Grafik zeigt die U-Werte der Außenwände in Abhängigkeit der Rohdichteklasse und Wanddicke. Zugrunde gelegt wurde in diesem Zusammenhang der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit (► vgl. Kap. 6.3.1).

Die Parametertabelle (► siehe Tabelle 6-1) schließlich zeigt die möglichen Auswirkungen auf ein konkretes Projekt unter Hinzuziehung der Anforderungen der EnEV 2016 [26].

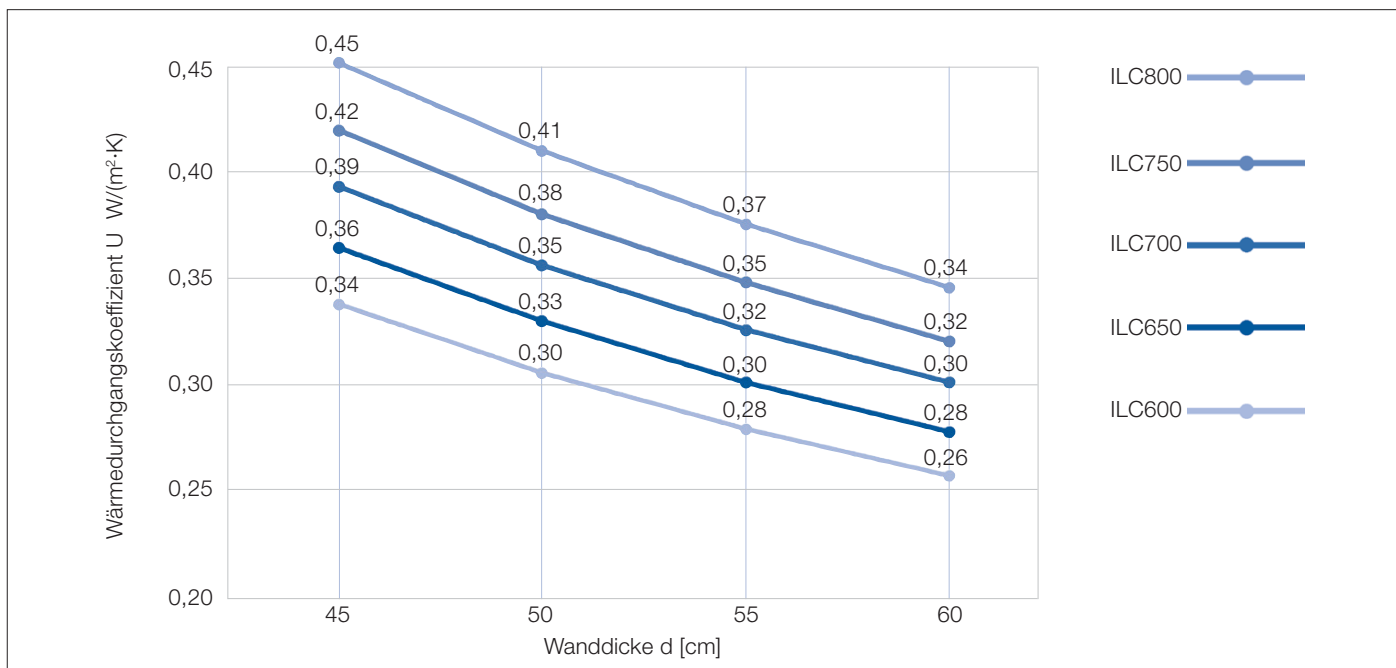


Bild 6-2 U-Werte in Abhängigkeit der Wanddicke und ILC-Klasse (basierend auf Bemessungswert Wärmeleitfähigkeit ► vgl. Kap. 6.3.1)

Projekt / Parameter	allgemeine Parameter ILC				Angaben zum Wärmeschutz/Anforderungen nach EnEV 2016									
	Rezeptur	gewählte Wandstärke ILC [cm]	gewählte Anzahl Vollgeschosse	gewählte Bauweise	Fensterflächenanteil	U-Wert Wand $W/(m^2 \cdot K)$	U-Wert Fenster $W/(m^2 \cdot K)$	U-Wert Dach $W/(m^2 \cdot K)$	H'T zulässig EnEV 2016 $W/(m^2 \cdot K)$	H'T zulässig Referenzg. $W/(m^2 \cdot K)$	H'T vorhanden $W/(m^2 \cdot K)$	Wärmebrückenkorrekturfaktor	Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis A/V_e	Primärenergiefaktor Heizung + WW
4.1 Exemplarischer Gebäudetyp freistehendes Gebäude	ILC800 ILC700 ILC600	60	7	Ortbeton/ Fertigteil	34 %	0,34	0,88	0,14	0,50	0,56	0,47	0,05	0,32	0,7
4.2 Baulücke Freiform	ILC800 ILC700 ILC600	50	7	Ortbeton	44 %	0,41	0,87	0,14	0,65	0,50	0,46	0,10	0,23	0,7
4.2 Baulücke Loggiafassade	ILC800 ILC700 ILC600	50	7	Fertigteil + Ortbeton	36 %	0,41	0,96	0,14	0,65	0,48	0,48	0,10	0,19	0,7
4.3 Zeilenbau ILC als Rückwand	ILC800 ILC700 ILC600	60	7	Ortbeton	30 %	0,30	0,95	0,14	0,50	0,54	0,50	0,10	0,31	0,7
4.4 Einfamilienhaus Villa	ILC800 ILC700 ILC600	60	3	Ortbeton	22 %	0,34	0,95	0,14	0,50	0,61	0,49	0,10	0,53	0,7
4.5 Hochhaus mit Stabwänden	ILC800 ILC700 ILC600	60	17	Fertigteil + Stabwand	34 %	0,30	0,67	0,14	0,50	0,62	0,48	0,10	0,24	0,7

Tabelle 6-1 Parametertabelle zu exemplarischen Testentwürfen aus ILC [27]

6.2 Infraleichtbeton im Kontext der EnEV

Infraleichtbeton besitzt gleichzeitig eine dämmende und eine lastabtragende Wirkung. Je geringer die Rohdichte eines Leichtbetons, desto geringer ist auch die Wärmeleitfähigkeit, jedoch sinkt in der Regel auch die Druckfestigkeit. Die Wärmeleitung durch den Beton kann demnach nur bis zu einem gewissen Grad unterbunden werden, da gleichzeitig die Tragfähigkeit gewährleistet sein muss. Auch wenn die Werkstoffentwicklung noch keineswegs abgeschlossen ist, kann ein derartiger Baustoff per se nicht mit einer nur auf den Dämmeffekt ausgelegten, nichttragenden Wärmedämmung konkurrieren. Dies führt bei noch gerade akzeptablen Wanddicken von 55 bis 60 cm zu U-Werten, die oberhalb derer für gängige mehrschichtige Aufbauten wie Wärmedämmverbundsysteme liegen.

Anders als in anderen EU-Staaten werden in Deutschland keine speziellen Anforderungen an einzelne Bauteile erhoben, d. h. die relativ gesehen »schlechteren« Werte einer Außenwand aus Infraleichtbeton können durch andere Bauteile effektiv kompensiert werden.

Mit der Einführung des Gebäudeenergiegesetzes (GEG) [28], das Stand 2017 als Referentenentwurf beim BMBU vorliegt, treten in Deutschland ab voraussichtlich 2021 neue Anforderungen für den Wohnungsbau auf. Insbesondere entfällt die stationäre Betrachtung des auf die wärmeübertragende Hüllfläche bezogenen Transmissionswärmeverlustes H'T. Es gelten fortan die Anforderungen des Referenzgebäudes.

Vor allem der Einsatz von aktiven, aus regenerativen Energien gespeisten Wandsdämmungen erscheint vor diesem Hintergrund als zunächst sinnvollste Variante, um die in anderen EU-Ländern geltenden, oft stationären Anforderun-

gen an Bauteilniveaus zu erfüllen oder generell höhere Dämmstandards einzuhalten.

Die zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Handbuchs vorhandenen Infraleichtbetonmischungen haben bereits deutlich geringere Wärmeleitfähigkeiten als gängige Leichtbetonmischungen. Es ist davon auszugehen, dass die derzeit erzielten Wärmeleitfähigkeiten durch eine weitere Optimierung der Rezeptur künftig noch verbessert werden können (► *siehe hierzu auch [15]*).

6.3 Bauphysikalische Eigenschaften

6.3.1 Wärmeleitfähigkeit/Wärmedurchgangskoeffizienten

Anforderungen

In der aktuellen EnEV ist der U-Wert für Außenwände des EnEV-Referenzgebäudes für Raum-Solltemperaturen im Heizfall von $\geq 19^\circ\text{C}$ mit $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ angegeben [26]. Wie im vorherigen Abschnitt erläutert werden jedoch in Deutschland, anders als in anderen EU-Staaten, keine speziellen Anforderungen an einzelne Bauteile erhoben (Stand 2017). Dementsprechend ist der aufgeführte U-Wert von $0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ nicht zwingend einzuhalten, sondern vielmehr als Richtwert zu verstehen. Stattdessen gilt es, die Anforderungen an Transmissionswärmeverlust und Primärenergiebedarf für das Gebäude als Ganzes zu erbringen.

Prüfwerte und Berechnungsansätze

Die Wärmeleitfähigkeit von Infraleichtbeton wurde von der zugelassenen Prüfstelle KIWA GmbH in Berlin mithilfe eines Plattengeräts [29] ermittelt. Die Proben wurden dabei vorab getrocknet und bei einer Temperatur von 10°C getestet.

Der Messwert wird dementsprechend mit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$ bezeichnet. Die Prüfung wurde für ILC800, ILC650 und ILC600 durchgeführt, die Werte für ILC700 und ILC750 darauf basierend linear interpoliert.

Unter realen Nutzungsbedingungen stellt sich im Bauteil ein bauüblicher Feuchtegehalt ein, der die Wärmeleitfähigkeit im

Vergleich zur getrockneten Probe erhöht und damit die Dämmwirkung verringert. Um die realen Bedingungen berücksichtigen zu können, wird aus dem messtechnisch ermittelten $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$ ein Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit λ_{Bem} gemäß DIN EN ISO 10456 [30] abgeleitet. In die Berechnung gehen unter anderem die statistische Qualität der Messdaten, Zuschläge für Temperatur und Feuchtegehalt sowie ein Zuschlag für Alterung ein.

Die Berechnung des Bemessungswerts λ_{Bem} wurde für ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 exemplarisch durchgeführt und die ermittelte Erhöhung gegenüber dem Messwert $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$ anschließend für die weiteren ILC-Klassen übernommen.

Zur Berechnung des Bemessungswerts von ILC800 ist Folgendes anzumerken:

- Die statistische Qualität wird über die Anzahl der vorhandenen Messwerte (hier $n=3$) berücksichtigt. Eine Verbesserung, d. h. ein geringerer Zuschlag, könnte an dieser Stelle durch weitere Prüfungen zur Erhöhung der Anzahl der Messergebnisse erzielt werden. Dies ist im Verlauf der weiteren Forschungsaktivitäten an der TU Berlin geplant.
- Die Umrechnungsfaktoren für Temperatur und Feuchtegehalt wurden für die Umgebungsbedingungen von 23°C und 80 % rel. Luftfeuchtigkeit ermittelt. Die DIN EN ISO 10456 gibt für Leichtbeton mit Blähtonzuschlag hierfür einen Feuchtegehalt von $u=0,03 \text{ kg/kg}$ an. Dieser Wert wurde durch experimentelle Untersuchungen mit ILC800 bestätigt, sodass die Angaben der DIN für ILC verwendet werden können.
- Nicht klar definiert sind die Auswirkungen der Alterung. Hier gibt die Norm keine Anhaltspunkte für Umrechnungsregeln vor. Diesbezügliche Erfahrungen liegen für Infraleichtbeton noch nicht vor. Die bisherigen Erkenntnisse lassen vermuten, dass ILC keine nennenswerten Alterungsprozesse durchläuft, die sich auf die Wärmeleitfähigkeit auswirken. Daher wird vorgeschlagen, den Alterungsfaktor mit 1,0 anzusetzen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass bei Verwendung von anderen Zusammensetzungen als der aus Tabelle 3-2 die Berechnung des Bemessungswerts auf Basis der jeweiligen Prüfergebnisse der Wärmeleitfähigkeit separat zu erfolgen hat und die hiesigen Zuschläge bzw. Werte nicht

übertragbar sind. Alternativ zur Berechnung des Bemessungswerts kann eine Prüfung auf Bemessungsniveau, d. h. bei Umgebungsbedingungen von 23 °C und 80 % rel. Luftfeuchtigkeit, erfolgen.

Für die Zusammensetzung aus Tabelle 3-2 ergeben sich die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Bemessungswerte λ_{Bem} und die einhergehenden Wärmedurchgangskoeffizienten für exemplarische Wanddicken von 50 bis 65 cm. Der U-Wert wurde dabei wie folgt bestimmt:

$$U = \frac{1}{R_{\text{si}} + \frac{d}{\lambda_{\text{Bem}}} + R_{\text{se}}} \quad [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})] \quad (2)$$

mit

$R_{\text{si}} = 0,13 \text{ [m}^2\text{K/W]}$ innerer Wärmeübergangswiderstand, Wärmestrom horizontal gerichtet [31]

$R_{\text{se}} = 0,04 \text{ [m}^2\text{K/W]}$ äußerer Wärmeübergangswiderstand [31]

d : Wanddicke [m]

λ_{Bem} : Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

Fazit

Die aktuelle EnEV (Stand 2017) schreibt keine zwingend einzuhaltenden Grenzwerte für Wärmedurchgangskoeffizienten

von Außenwänden vor. Der U-Wert von ILC-Wänden bewegt sich bei Wandstärken von 50 bis 65 cm zwischen 0,41 und 0,24 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Der Richtwert des EnEV-Referenzgebäudes von $U = 0,28 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ wird damit durch ILC-Außenwände in den meisten Fällen überschritten. Dies kann jedoch durch andere Bauteile effektiv kompensiert werden.

6.3.2 Frost-Tau-Widerstand

Anforderungen

Infraleichtbeton wird in der Regel als Außenbauteil eingesetzt, dessen senkrechte Oberfläche Regen und Frost ausgesetzt ist, und wäre somit in Anlehnung an die informativen Beispiele des EC2 [20] gemäß Expositionsklasse XF1 (mäßige Wassersättigung ohne Taumittel) beansprucht. Expositionsklasse XF3 beinhaltet Umgebungsbedingungen, die eine hohe Wassersättigung ohne Taumittel bewirken. Hierfür nennt EC2 als informatives Beispiel im Hinblick auf Normalbeton waagrechte Flächen mit direkter Bewitterung. Letzteres ist als Einsatzvariante für Infraleichtbeton wenig wahrscheinlich bzw. sollte vermieden werden. Zu beachten ist jedoch, dass ILC nach bisherigen Erkenntnissen aufgrund seines Gefüges zu einer langfristigeren Wasseraufnahme als Normalbeton neigt, was zu einem erhöhten Sättigungsgrad auch bei vertikalen Bauteilen führen kann. Ob ILC also ggf. auch bei Einsatz als vertikale, direkt bewitterte Außenwand als XF3 und nicht XF1 einzustufen wäre, ist diskussionswürdig.

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}} [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0,141	0,153	0,166*	0,178*	0,193
Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit** $\lambda_{\text{Bem}} [\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	0,160	0,174	0,189	0,202	0,219
U-Wert für Wanddicke 50 cm $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0,30	0,33	0,35	0,38	0,41
U-Wert für Wanddicke 55 cm $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0,28	0,30	0,32	0,35	0,37
U-Wert für Wanddicke 60 cm $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0,26	0,28	0,30	0,32	0,34
U-Wert für Wanddicke 65 cm $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32
* linear interpoliert ** Zuschlag für ILC800 berechnet und für ILC600-750 übernommen					

Tabelle 6-2 Wärmeleitfähigkeit und Wärmedurchgangskoeffizienten von Infraleichtbeton gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2

Prüfergebnis und Einordnung in Expositionsklassen

Zur näheren Betrachtung des Frost-Tau-Widerstands von Infraleichtbeton wurden experimentelle Untersuchungen [32] mit ILC800 und ILC600 in Anlehnung an DIN CEN/TS 12390-9:2006 [33] durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass ILC800 das in Anlehnung an Faust [7] über die Trockenrohdichte modifizierte Abnahmekriterium für XF3 erfüllt, weshalb ILC800 für XF3 und XF1 als geeignet angesehen werden kann. Die Ergebnisse für ILC600 hingegen lagen deutlich über dem Abnahmekriterium für XF3. Eine Aussage für XF1 kann nicht getroffen werden, da keine Empfehlung für ein Abnahmekriterium vorhanden war [32], jedoch legt die deutliche Überschreitung für XF3 nahe, dass auch die Einhaltung von XF1 ohne Oberflächenschutz nicht gegeben ist.

Eigenschaft	ILC600	ILC800
Abwitterung (Mittelwert) [g/m ²]	1 620	262
Abnahmekriterium für XF3 gemäß [32] [g/m ²]	275	374

Tabelle 6-3 Frost-Tau-Widerstand von ILC600 und ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2, basierend auf [32]

DIN 1045-2 legt für Leichtbetone in Abhängigkeit der Expositionsklassen Mindestanforderungen für z. B. Zementgehalt, Wasser-Zementwert usw. fest. Der Mindestzementgehalt beispielsweise beträgt für XF1 280 und für XF3 300 kg/m³ (jeweils 270 unter Anrechnung von Zusatzstoffen) [34]. Wie der Zusammensetzung aus Tabelle 3-2 zu entnehmen ist, liegen die Zementgehalte von ILC600 bis einschließlich ILC700 unter 270 kg/m³, nur ILC800 liegt über 300 kg/m³, ILC750 liegt bei 296 kg/m³. Wenn man die Übertragbarkeit der Kriterien auf Infraleichtbeton unterstellt, wäre auch hier ILC600 also nicht einer Expositionsklasse XF1 zuzuweisen (ILC800 erfüllt die Anforderung für XF3, was sich mit den Versuchsergebnissen der Frost-Tau-Prüfung deckt).

Bei der Bewertung der Ergebnisse der Frost-Tau-Untersuchungen sollte beachtet werden, dass die Prüfungen für Normalbeton und dessen Verhalten während der kapillaren Flüssigkeitsaufnahme konzipiert wurden. ILC hingegen nimmt nach bisherigen Erkenntnissen über einen längeren Zeitraum Wasser auf, weshalb vor allem zum Ende der Prüfung hin von einem erhöhten Sättigungsgrad auszugehen ist, was ein verstärktes Schadensbild unterstützt. Ob sich

ein solch erhöhter Sättigungsgrad auch in der Praxis einstellt, hängt von den Randbedingungen des Einbaus, wie z. B. einer hydrophobierenden Beschichtung, ab.

Fazit

ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 erfüllt auch bei direkter Bewitterung, d. h. ohne Oberflächenschutz, die Anforderungen der Expositionsklassen XF1 und XF3. ILC600 nach Tabelle 3-2 hingegen sollte nicht unter direkter Bewitterung eingesetzt, sondern mit einem entsprechenden Oberflächenschutz versehen werden.

Wie auch die Versuche zur Schlagregenbeanspruchung in Kapitel 6.3.6 zeigen, ist eine hydrophobierende Beschichtung für ILC-Außenbauteile aller ILC-Klassen prinzipiell sinnvoll. In diesem Fall ist von einer deutlich geringeren Frost-Tau-Schädigung auszugehen. Dies sollte experimentell untermauert werden.

6.3.3 Wasseraufnahme und Wassereindringtiefe

Anforderungen

Ein Werkstoff kann hinsichtlich des Eintritts von Wasser unter anderem über zwei Kennwerte beurteilt werden: den Wasseraufnahmekoeffizienten, der die kapillare Saugfähigkeit bei z. B. anhaltender Beregnung oder Schlagregen beschreibt, und die Wassereindringtiefe, die das Eindringen unter Druck berücksichtigt.

Konkrete Anforderungen in Normen und Regelwerken zur Einordnung der Wassereindringtiefe liegen nicht vor. Für wasserundurchlässige (WU-) Betone finden sich Beispiele für Grenzwerte von 50 mm (vgl. z. B. [35]). Dieses Kriterium sollte für ILC jedoch nicht herangezogen werden, da eine mit der Zeit fortschreitende Wassereindringtiefe nicht ausgeschlossen werden kann.

Prüfung Wasseraufnahme und Wassereindringtiefe

Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde für ILC800 und ILC600 gemäß den Zusammensetzungen aus Tabelle 3-2 in

Eigenschaft	ILC600	ILC800	Porenbeton	Zementbeton	Kalksandstein
Wasseraufnahmekoeffizient W_w [kg/m ² h ^{0,5}]	0,3	0,7	2 bis 8	0,1 bis 1,0	2,5 bis 10

Tabelle 6-4 Wasseraufnahmekoeffizient W_w von ILC600 und ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 und anderer Baustoffe im Vergleich nach [37]

Anlehnung an DIN EN ISO 15148 [36] im Rahmen interner Forschungsarbeiten getestet.

Die Ergebnisse zeigten für beide Zusammensetzungen einen Koeffizienten $\leq 0,7$, dabei lag der Wert von ILC600 unter den Ergebnissen für ILC800. Dies könnte auf den unterschiedlichen Zementgehalt zurückzuführen sein. Jedoch ist anzumerken, dass eine frühere Messreihe Werte gleicher Größenordnung aufwies, jedoch dort ILC800 weniger Wasser aufnahm als ILC600 [32]. Die Gründe für die Differenzen der beiden Messreihen sind noch unklar. Weitere Versuche zur statistischen Untermauerung der oben aufgeführten Ergebnisse sind erforderlich. Des Weiteren sollte bedacht werden, dass die Wasseraufnahme nach den Erkenntnissen aus 6.3.2 bei ILC über einen längeren Zeitraum stattfindet. Da die Versuche zur Wasseraufnahme nach Norm DIN EN ISO 15148 [36] für eine kurze Zeitspanne ausgelegt sind (nur 24 Stunden), mag der geprüfte Wasseraufnahmekoeffizient für die langfristige Wasseraufnahme durch ILC nicht aussagekräftig sein.

Die Wassereindringtiefe unter Druck wurde ebenfalls für ILC600 und ILC800 im Rahmen interner Forschungsarbeiten [32] in Anlehnung an DIN EN 12390-8 [38] geprüft. Hierfür wird für 72 \pm 2 Stunden ein Wasserstrahl mit 5 bar auf die Oberfläche der zu prüfenden Probekörper aufgebracht. Diese werden anschließend gespalten, um die größte Wassereindringtiefe zu messen.

Die Versuchsreihen mit ILC800 konnten normgerecht durchgeführt werden und zeigten keinen Wasseraustritt an den Seitenflächen. Bei ILC600 konnte ein seitlicher Wasseraustritt nicht verhindert werden, der Druck wurde während der Prüfung jedoch trotzdem auf 5 bar gehalten. Die so erzielten Versuchsergebnisse wurden durch zusätzliche Prüfungen mit seitlich abgedichteten Probewürfeln bestätigt.

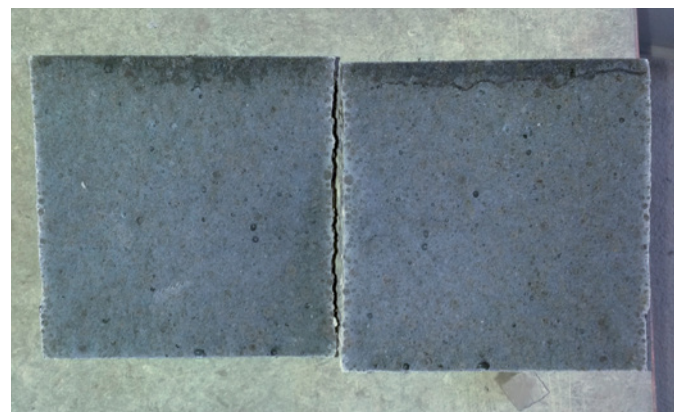


Bild 6-3 Probekörper zur Bestimmung der Wassereindringtiefe von ILC800 [32]

Eigenschaft	ILC600	ILC800
Wassereindringtiefe (kurzfristig) [mm]	66	12,5

Tabelle 6-5 Wassereindringtiefe (kurzfristig) von ILC600 und ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2, basierend auf [32]

Fazit

Die kurzfristige Wasseraufnahme und der kurzfristige Wassereindringwiderstand von Infralichtbeton gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die von Normalbeton. Mit einer längerfristigen und damit erhöhten Wasseraufnahme bzw. -eindringtiefe ist jedoch zu rechnen.

Trotz der an sich guten Eigenschaften von ILC hinsichtlich des Eindringens von Feuchtigkeit wird ein Oberflächenschutz (z. B. durch Hydrophobierung) empfohlen, um eine möglicherweise auftretende längerfristige Wasseraufnahme zu unterbinden.

	ILC600	ILC800	dampfgehär- ter Porenbeton	Beton (Dichte 2400 kg/m ³)	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge (ausschließ- lich Blähton)	Mauerwerk aus Kalksandstein (Dichte 1200 bis 2200 kg/m ³)
Wasserdampf-Diffusions- widerstandszahl μ	11 (trocken)	31 (trocken)	5/10	80/130	5/15	15/25

Tabelle 6-6 Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl von ILC600 und ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 [41, 42] und anderer Baustoffe im Vergleich [31]

	ILC800	dampfgehärteter Porenbeton	Beton mit Rohdichte 2200 kg/m ³	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge (ausschließ- lich Blähton)	Mauerwerk aus Kalksandstein
Spezifische Wärmespeicherkapazität c [J/kgK]	863	1 000	1 000	1 000	1 000

Tabelle 6-7 Spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 [43] und anderer Baustoffe im Vergleich [31]

6.3.4 Wasserdampfdiffusion

Anforderungen

Eine möglichst »diffusionsoffene« Bauweise bietet diverse Möglichkeiten im Hinblick auf das Feuchtemanagement in Bauteilen. Ein Kennwert zur Beschreibung der Diffusions-offenheit bzw. des Diffusionswiderstands ist die Wasser-dampf-Diffusionswiderstandszahl μ . Sie gibt an, um welchen Faktor der Wasserdampf-Diffusionswiderstand eines Materi- als größer als der einer gleich dicken, ruhenden Luftschicht gleicher Temperatur ist [39]. Je geringer also die Wasser- dampf-Diffusionswiderstandszahl, desto mehr tendiert ein Baustoff zu einem diffusionsoffenen Verhalten.

Prüfergebnis

Die Wasserdampfdiffusion wurde für ILC800 und ILC600 in Anlehnung an DIN EN ISO 12572 [40] getestet [41, 42]. Dabei wurden Probekörper auf Prüfgefäße gesetzt, die mit einem Trockenmittel gefüllt waren, und diese in einem defi- nierten Klima mit höherer Luftfeuchte aufgestellt. Infolge der unterschiedlichen Wasserdampfteildrücke auf den beiden Seiten der Probekörper fand eine Wasserdampfdiffusion

durch die Proben statt. Durch regelmäßiges Wiegen der Prüfanordnung konnte anschließend die Wasserdampf- Diffusionswiderstandszahl ermittelt werden.

Fazit

Der Wasserdampf-Diffusionswiderstand (trocken) von ILC600 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 liegt in der Größenordnung des Widerstands eines Porenbetons oder ei- nes haufwerksporigen Leichtbetons. Der Widerstand von ILC800 gemäß Tabelle 3-2 liegt deutlich darüber, jedoch auch deutlich unterhalb des Widerstands eines Normalbetons.

6.3.5 Spezifische Wärmespeicherkapazität

Anforderungen

Die spezifische Wärmespeicherkapazität gibt an, wie viel Wärme ein Stoff speichern kann. Praktische Relevanz besitzt sie im Zusammenhang mit der Rohdichte ρ vorrangig für den sommerlichen Wärmeschutz. Je höher das Produkt $c \times \rho$, desto mehr trägt der Baustoff dazu bei, auch bei hohen Temperaturen den Innenraum kühl zu halten.

Prüfergebnis Hot-Disk-Verfahren

Die spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 wurde mit dem Hot-Disk-Verfahren ermittelt [43]. Die spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC600 bis ILC750 wurde bislang nicht untersucht.

Fazit

Die spezifische Wärmespeicherkapazität von ILC800 gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 liegt etwas unterhalb der Wärmespeicherkapazitäten von z. B. Normalbeton oder Porenbeton. Aufgrund der ähnlichen Größenordnung ergibt sich eine Auswirkung auf den sommerlichen Wärmeschutz im Vergleich zum Normalbeton daher weniger aus der spezifischen Wärmekapazität als vielmehr aus der geringeren Rohdichte.

6.3.6 Verhalten bei Schlagregenbeanspruchung

Anforderungen

Die Aufnahme von Feuchtigkeit durch eine Außenhülle, insbesondere bei einem Schlagregenereignis, ist von besonderer Bedeutung für verschiedene Aspekte, z. B. die Dämmwirkung, die Dauerhaftigkeit, Rissbildung an der Oberfläche etc. Die Aufnahme von Feuchtigkeit durch ein Außenbauteil sollte daher begrenzt werden. Daraus ergeben sich Zwänge für eventuelle Oberflächenbehandlungen oder auch die Einbeziehung von Dachüberständen oder Abtropfkanten in das architektonische Gestaltungskonzept.

Prüfergebnis Schlagregenversuch

Um die Aufnahme von Feuchtigkeit einer unbehandelten Infralichtbetonoberfläche bei einem Regenereignis zu untersuchen, wurde mit dem Prototyp einer Fensteröffnung in einer 50 cm dicken Wand aus ILC600 ein Schlagregenversuch durchgeführt. Dafür wurde ein Schlagregenstand des Fachgebiets Bauphysik und Baukonstruktion der TU Berlin verwendet, der u. a. für die Zertifizierung von Unterspannbahnen gemäß prEN 15601 genutzt wird. Als Regenereignis

wurde ein für die Unterspannbahnen entwickeltes Ereignis mit einer Beregnungsdauer von drei Stunden gewählt.

Der Fassadenausschnitt inklusive des Fensterbretts aus Infralichtbeton wurde direkt mit dem Regenereignis beaufschlagt. Die Rückseite (= Innenseite der Außenwand) wurde nicht beregnet, war aber der erhöhten Luftfeuchtigkeit im Raum ausgesetzt. Die Aufnahme von Feuchtigkeit aus der Luft wurde mittels regelmäßig gewogener Testkörper aus ILC600, die auf der Rückseite des Versuchsaufbaus aufgestellt waren, überprüft.

Der Prototyp hing von der Decke herab, sodass mittels einer Kraftmessdose die Gewichtszunahme des Bauteils durch das Regenereignis simultan zum Versuchsablauf dokumentiert werden konnte. Des Weiteren kamen einbetonierte Messpunkte zum Einsatz, anhand derer in festgelegten Zeitintervallen die relative Feuchtigkeit im Inneren des Bauteils mittels Widerstandsmessung überprüft wurde.

Sowohl die Aufzeichnung des Gewichts als auch die Feuchtigkeitsmessung im Inneren zeigten annähernd keine Veränderung während des Versuchsablaufs; das Bauteil schien damit im Inneren weitestgehend trocken zu bleiben. Im Anschluss an das Regenereignis wurde die Wand mittels Hammer und Meißel aufgestemmt, um die reale Wassereindringtiefe in das Bauteil prüfen zu können. Die Ergebnisse bestätigten den trockenen Zustand im Inneren. Lediglich die Außenhaut des Bauteils war ca. 1 bis 2 cm tief regendurchfeuchtet.

Nach 24 Stunden war die Oberfläche fast vollständig abgetrocknet. Tiefergehendes Aufstemmen wie auch die elektrischen Widerstandsmessungen anhand der Messstäbe zeigten jedoch, dass die Feuchtigkeit ca. 15 bis 20 cm weit ins Innere des Wandquerschnitts durchgedrungen war.

Fazit

Der vorliegende Versuch zeigte, dass Feuchtigkeit während eines Regenereignisses zunächst nur oberflächlich in den ILC eindringt, jedoch mit der Zeit in das Innere des Bauteils fortschreitet. Dies bestätigen die Erkenntnisse aus den Versuchen zum Frost-Tau-Widerstand (► vgl. Kap. 6.3.2). ILC-Oberflächen sollten daher konsequent gegen Feuchtigkeitseintritt geschützt werden, z. B. durch Hydrophobierung (► vgl. Kap. 8.5).



Bild 6-4 Prototyp im Schlagregenstand, zu beregnende Front (links) und Eindringtiefe der Feuchtigkeit kurz nach der Beregnung (rechts) [27]

6.3.7 Brandschutz

Anforderungen

Die Anforderungen des Brandschutzes sind in Abhängigkeit der Gebäudeklasse und der Art des Bauteils definiert. Mehrgeschossige Wohnbauten aus Infraleichtbeton werden in der Regel in Gebäudeklasse 5 unterhalb der Hochhausgrenze einzuordnen sein. Dementsprechend sind tragende Außenwände feuerbeständig (Fb), d. h. gemäß Feuerwiderstandsklasse F90-AB bzw. REI90 auszuführen [31].

Brandverhalten von ILC

In der DIN 4102-4 [44] sind als nicht brennbar einzustufende Baustoffe (Baustoffklasse A1 nach DIN 4102-1 [45]) aufgelistet. Dazu gehören in erster Linie Betone nach EC2 [20]. Obwohl Infraleichtbeton aufgrund geringerer Trockenroh-dichte und Festigkeit hierin nicht erfasst wird, trifft für ILC die allgemeine Beschreibung »Baustoffe, die nicht mehr als 1 % (Massenanteil) homogen verteilte organische Bestandteile haben« [44] zu. ILC ist damit als nicht brennbar einzustufen.

EC2 sieht für das Tragverhalten im Brandfall drei Bemessungsverfahren vor:

- Tabellenverfahren (Nachweisstufe 1),
- vereinfachte Rechenverfahren (Nachweisstufe 2),
- allgemeine Rechenverfahren (Nachweisstufe 3).

Das Tabellenverfahren (Nachweisstufe 1) für Stahlbeton formuliert Anforderungen an Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabstände der Bewehrung vom Bauteilrand, die aufgrund von Normbrandversuchen bestimmt wurden [31]. Die Mindestquerschnittsabmessungen berücksichtigen in Kombination mit der Auslastung die Reduktion der Betonfestigkeit bei hohen Temperaturen; über die Mindestbetondeckung wird der Schutz der Bewehrung sichergestellt.

Für Wände aus Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge erlaubt DIN 4102-4 [44] eine Reduktion der Mindestabmessungen, die mit abnehmender Rohdichte steigt. Zum Beispiel dürfen für tragende Wände der Rohdichteklasse 1,0 die Mindestwanddicken ebenso wie der Achsabstand der Bewehrung vom Bauteilrand um 20 % reduziert werden, jedoch müssen Mindestmaße von 150 mm Wanddicke bzw. 30 mm Achsabstand eingehalten werden [44].

Infraleichtbetonwände werden in der Regel Dicken von 50 bis 60 cm aufweisen (► vgl. Kap. 6.1), weshalb die Einhaltung der o.g. Mindestquerschnittsabmessungen un-

	Beton	Leichtbeton	Betonstahl	GFK Bewehrung	ILC 800
α_T [mm/mK]	0,01	0,008	0,018 – 0,012	0,006 (axial) 0,022 (radial)	0,007 – 0,012 → $\alpha_T \approx 0,01$ mm/mK

Tabelle 6-8 Thermischer Längenausdehnungskoeffizient α_T von ILC800 im Vergleich [24, 31]

problematisch sein sollte. Da ILC bessere Wärmedämmeigenschaften als Normalbeton aufweist, ist zudem davon auszugehen, dass die Anforderungen an den Achsabstand der Bewehrung vom Bauteilrand im EC2 bzw. in DIN 4102-4 auf der sicheren Seite liegen.

Experimentelle Untersuchungen der TU Berlin mit Infraleichtbeton bei hohen Temperaturen zeigten ein betonübliches Verhalten in dem Sinne, dass die Abnahme der Druckfestigkeit bei hohen Temperaturen umso geringer war, je größer das Verhältnis von Zuschlag zu Zement ausfiel. Eine Reduktion der Festigkeit und Steifigkeit trat ab ca. 200 bis 400 °C auf [46].

Nicht explizit untersucht ist jedoch die Gefahr von Abplatzungen bei Infraleichtbeton. Gründe für Abplatzungen können Eigen- und Zwangsspannungen infolge ungleichmäßiger Erwärmung des Querschnitts, unterschiedlicher Dehnungen von Bewehrung und Beton sowie von leichter Gesteinskörnung und Zementstein sein. Eine weitere mögliche Ursache ist in Zugspannungen infolge hydrostatischer Wasserdampfdrücke und ausströmenden Wasserdampfes zu sehen [7].

Die thermische Dehnung von ILC wurde anhand eines ILC800 experimentell bestimmt und stellt sich im Vergleich wie folgt dar:

Die thermische Ausdehnung von Infraleichtbeton ist also nicht, wie sonst bei Leichtbeton üblich, etwas geringer als bei Normalbeton, sondern liegt in einem ähnlichen Bereich. Demnach ist, analog zu Normal-Stahlbeton, nicht mit signifikantem Temperaturzwang zwischen Bewehrung und Beton zu rechnen.

Fazit

Infraleichtbeton ist als nicht brennbar einzustufen. Experimentelle Untersuchungen zeigten ein betonübliches Verhalten

bei hohen Temperaturen in Bezug auf die Reduktion der Festigkeit und Steifigkeit. Das Verhalten im Brandfall ist insbesondere im Hinblick auf Abplatzungen noch nicht ausreichend untersucht, weshalb weitere Forschungsarbeit bzw. Prüfungen eventuell im Rahmen eines Verfahrens zur Zustimmung im Einzelfall erforderlich werden können.

Je nach Bewehrungsmaterial können spezielle Brandschutzanforderungen bestehen, wie z. B. bei GFK-Bewehrung (**► vgl. Kap. 7.7**). Entsprechende Vorgaben sind im Einzelfall zu prüfen.

6.3.8 Schallschutz

Anforderungen

Die Schallschutzqualität eines Außenbauteils kann durch das bewertete Schalldämm-Maß R_w angegeben werden. Konkrete Grenzwerte für diesen Kennwert existieren nicht, da die Schallschutzwirkung noch von diversen anderen Faktoren, wie z. B. Öffnungsanteil, flankierenden Bauteilen etc., abhängt und zudem die Anforderungen je nach Standort bzw. Umgebungsbedingungen unterschiedlich sind. Je höher das bewertete Schalldämm-Maß eines Bauteils, desto besser ist der hierdurch realisierbare Schallschutz.

Berechnungen

Das bewertete Schalldämm-Maß der Infraleichtbetonklassen wird im Folgenden exemplarisch für eine Wanddicke von 55 cm berechnet. Zugrunde gelegt wird dabei die DIN 4109-32 von 2016 [47]. Demnach ergibt sich die flächenbezogene Masse zu

$$m' = d \cdot \rho \quad [\text{kg/m}^2] \quad (3)$$

Für Leichtbeton ist als Rechenwert der Rohdichte gemäß DIN 4109-32 der Klassenmittelwert nach DIN EN 206 anzusetzen. Dieses Vorgehen wird für ILC übernommen, dement-

sprechend wird z. B. für ILC800 (Rohdichtebereich 751–800) der Mittelwert von 775 kg/m^3 gewählt.

In Abhängigkeit von der ermittelten flächenbezogenen Masse m' wird das bewertete Schalldämm-Maß R_w berechnet. Hierfür werden je nach Material in DIN 4109-32 verschiedene Massekurven angegeben, die aus Prüfstandmessungen im Rahmen von bauakustischen Prüfungen ermittelt wurden. Zur Verfügung stehen unter anderem Gleichungen für Beton, Leichtbeton (dessen Kurve bei gleicher flächenbezogener Masse um 2 dB günstiger liegt als Normalbeton) und Porenbeton. Für Infraleichtbeton wird die Massekurve für Leichtbeton herangezogen, da die flächenspezifische Masse m' von ILC in einem Bereich ($140\text{--}480\text{ kg/m}^2$) liegt, der durch die Formel abgedeckt wird. Die Massekurve für Porenbeton hingegen gilt nur für $m' \leq 300\text{ kg/m}^2$, was bei Infraleichtbetonwänden nur im Ausnahmefall (z. B. ILC600 mit einer Wanddicke von 45 cm) unterschritten würde. Eine Vergleichsrechnung ergab zudem, dass die Ergebnisse bei Anwendung der Porenbetonformel nur leicht unterhalb ($<1\text{ dB}$) der Ergebnisse mit der Leichtbetonformel lagen.

Die Berechnung des bewerteten Schalldämm-Maßes für ILC erfolgt deshalb nach der Leichtbetonformel:

$$R_w = 30,9 \cdot \lg(m'_{\text{ges}}/m'_0) - 20,2 \text{ [dB]}, \tag{4}$$

wobei $140\text{ kg/m}^2 < m'_{\text{ges}} < 480\text{ kg/m}^2$ und

Bezugsgröße $m'_0 = 1\text{ kg/m}^2$ [47]

Die Werte für die verschiedenen ILC-Klassen – exemplarisch für 55 cm Wanddicke – sind im Folgenden tabellarisch aufgeführt.

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
mittlere Rohdichte $[\text{kg/m}^3]$	575	625	675	725	775
Wanddicke $[\text{cm}]$	55	55	55	55	55
flächenbezogene Masse $m' [\text{kg/m}^2]$	316	344	371	399	426
bewertetes Schalldämm-Maß $R_w [\text{dB}]$	57	58	59	60	61

Tabelle 6-9 Exemplarische, bewertete Schalldämm-Maße R_w von Infraleichtbeton für Wanddicke 55 cm gemäß DIN 4109-32 (massive, einschalige Wände) [47]

Variiert man die Wanddicke zwischen 45 und 60 cm ergeben sich bewertete Schalldämm-Maße zwischen 54 und 62 dB.

Zur Einordnung der Werte wird in der nachfolgenden Übersicht ein Vergleich zu anderen Bauweisen angestellt. Dabei wird für Normalbeton und Kalksandstein nur die Trägerwand betrachtet, da zusätzliche Dämmschichten sowohl eine Verbesserung als auch eine Verschlechterung zur Folge haben können [48].

Bauteil	Bewertetes Schalldämm-Maß $R_w [\text{dB}]$
ILC600–800, 45–60 cm	54–62
Porenbeton, 350 kg/m^3 , 48 cm, 1 cm Putz beidseitig ($1\,000\text{ kg/m}^3$) gemäß DIN 4109-32 [47]	51
Kalksandstein, verputzt, je nach Dichte und Wanddicke [49]	50–65
Normalbeton, 20 cm, gemäß DIN 4109-32 [47]	61

Tabelle 6-10 Bewertete Schalldämm-Maße R_w von ILC und exemplarischen Wandkonstruktionen im Vergleich

Fazit

Wie Tabelle 6-10 zeigt, liegen die in Anlehnung an DIN 4109-32 bestimmten bewerteten Schalldämm-Maße von Infraleichtbeton im durchschnittlichen Bereich. Das Material ist besser einzustufen als Porenbeton und liegt leicht unterhalb der Schalldämm-Maße von schweren Baumaterialien wie Kalksandstein oder Normalbeton.

6.4 Dynamische simulationsbasierte Untersuchungen

Dynamische Simulationsuntersuchungen dienen dazu, das Verhalten von Bauteilen über einen längeren Zeitraum beurteilen zu können. Im Vergleich zu statischen Berechnungen bietet diese Art der Untersuchung den Vorteil, dass weitaus genauere Angaben bezüglich des Verhaltens von Bauteilen über einen definierten Zeitraum getroffen werden können. Statische Berechnungen betrachten hingegen lediglich einen definierten Zeitpunkt. Anhand der dynamischen Untersuchungen können Optimierungen bezüglich ILC-Bauteilen und deren materieller Eigenschaften identifiziert werden.

6.4.1 Thermische Simulation bezüglich des Nutzerkomforts (sommerlicher Wärmeschutz) und leistungstechnischer Aspekte

Anhand einer dynamisch-thermischen Simulation kann eine komfortorientierte sowie leistungsorientierte Beurteilung der monolithischen Bauweise mit Infraleichtbeton gegenüber herkömmlichen Bauweisen erfolgen. Betrachtet werden im Folgenden zwei Fälle: das Verhalten einer Wand aus ILC in den Sommermonaten (sommerlicher Wärmeschutz) sowie das Szenario des Einbaus einer aktiven Wärmedämmung (thermoaktive Bauteilsysteme).

Thermischer Komfort in den Sommermonaten

Der Infraleichtbeton weist zwei wichtige Eigenschaften auf, die den thermischen Komfort beeinflussen. Einerseits hat er

eine höhere thermische Masse als eine leichte Bauweise und reagiert somit träger auf Temperaturänderungen, was sich besonders im Sommer in einer langsameren Temperaturerhöhung des Innenraumes widerspiegelt. Andererseits ist der Infraleichtbeton nicht so träge wie eine schwere Bauweise, was theoretisch eine schnellere Auskühlung nach heißen Tagen ermöglicht. Um dieses Verhalten nachweisen zu können, wurden in einer thermischen Simulation die nachfolgenden Bauweisen anhand eines Referenzraums untersucht und verglichen.

Eine Untersuchung bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes verdeutlichte, dass für die ILC-Wand eine geringere Temperaturüberschreitung von 26 °C im Vergleich zu der leichten sowie schweren Bauweise erreicht werden kann. Dieses Verhalten basiert auf der Simulation eines Raummodells mit natürlicher Lüftung und einem Luftwechsel von 0,5 h⁻¹, ohne zusätzliche Lüftung während der Nachtstunden (häufig als Nachtlüftungspülung bezeichnet). Der angesetzte Luftwechsel erfüllt die hygienischen Anforderungen an den Wohnungsbau. Erfolgt zusätzlich eine Lüftung während den Nachtstunden (2,0 h⁻¹), so gleichen sich die Übertemperaturstunden für die schwere Bauweise an (Differenz von 9 Stunden).

Aktive Wärmedämmung/Thermoaktive Bauteilsysteme

Eine weitere Untersuchung zeigte, dass die Nutzung einer aktiven Wärmedämmung (kurz: Aktivierung) eine äußerst effektive Möglichkeit darstellt, den thermischen Komfort zu verbessern. Unter aktiver Dämmung wird der Einbau von Rohren (hier: Kapillarrohrmatten auf Polypropylen-Basis) in das Bauteil verstanden, die von Wasser durchströmt werden, das eine gewisse Vorlauftemperatur besitzt.

Nr.	Variante	Materialien	λ [W/(m·K)]	c [J/kgK]	ρ [kg/m³]
Außenwand (U-Wert: 0,31 W/(m²·K)):					
1	leichte Bauweise Holzständerbauweise	OSB	0,130	2 100	660
		Fichte	0,130	2 100	450
		Holzwohle	0,045	2 100	50
2	Infraleichtbeton ILC800; monolithisch 60 cm	ILC	0,193	870	800
3	schwere Bauweise Ziegel + WDVS	Beton	2,300	880	2 300
		Mineralwolle	0,035	830	20

Tabelle 6-11 Als Varianten verwendete Bauweisen, ausgelegt auf denselben U-Wert: 1. leichte Bauweise, 2. ILC800, 3. schwere Bauweise [27]

Wie die Simulationen zeigen, erscheint die Integration einer Aktivierung in einer ILC-Außenwand bezüglich der Einflussnahme auf Nutzerkomfort, Leistungen und Energiebedarfe als durchaus zielführend. Durch ein solches System kann das Verhalten eines Raumes bezüglich der Raumtemperatur signifikant verbessert werden. Bezüglich des sommerlichen Nutzerkomforts zeigt sich, dass der Einsatz einer Aktivierung mit Rohren, die in Bezug auf die Innenseite der Wand 11 cm tief eingebettet sind, äußerst effektiv ist. Die nachfolgende Häufigkeitsverteilung (Bild 6-5) verdeutlicht, inwieweit anhand einer Aktivierung mit einer Vorlauftemperatur von 15 °C und einem Wassermassenstrom von 10 kg/h·m² Fassadenfläche in der ILC-Wand die Raumtemperaturen im Sommer gegenüber den anderen Varianten positiv beeinflusst werden können.

Die Verteilung der Stunden, in denen Übertemperaturen auftreten, verdeutlicht, dass ILC im Vergleich zu den anderen Bauweisen zu weniger Stunden mit erhöhten Temperaturen führt. Die Variante mit zusätzlicher Aktivierung weist den Vorteil auf, dass keine Temperaturen über 28 °C auftreten.

Neben der Einflussnahme der Aktivierung in den Sommermonaten spielt auch das Verhalten bei kalten Außentemperaturen eine wesentliche Rolle. Bei den Simulationen bezüglich des Heizfalls erfolgt die Betrachtung bei einer Anbringung der Aktivierung in einer Bauteiltiefe von 5 cm von außen. Die Ergebnisse der Simulationen verdeutlichen, dass durch eine Aktivierung die Wanddicke gegenüber einer Variante ohne Aktivierung verringert werden kann. Bei gleichen Wandkonfigurationen kann hingegen der Heizenergiebedarf für den Innenraum minimiert werden. Diese Ergebnisse beziehen sich auf die Betrachtung einer repräsentativen Woche im Winter bei einer Vorlauftemperatur von 15 °C und einem mittleren Massenstrom von ca. 20 kg/h·m² Fassadenfläche. Diese Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz einer Aktivierung sowohl im Sommer- als auch im Winterfall in Abhängigkeit der Lage als positiv bewertet werden kann.

Der Einsatz einer Aktivierung hat allerdings zur Folge, dass Energie bereitgestellt werden muss, um die Aktivierung zu ermöglichen. Das System der ILC-Wand mit Aktivierung kann

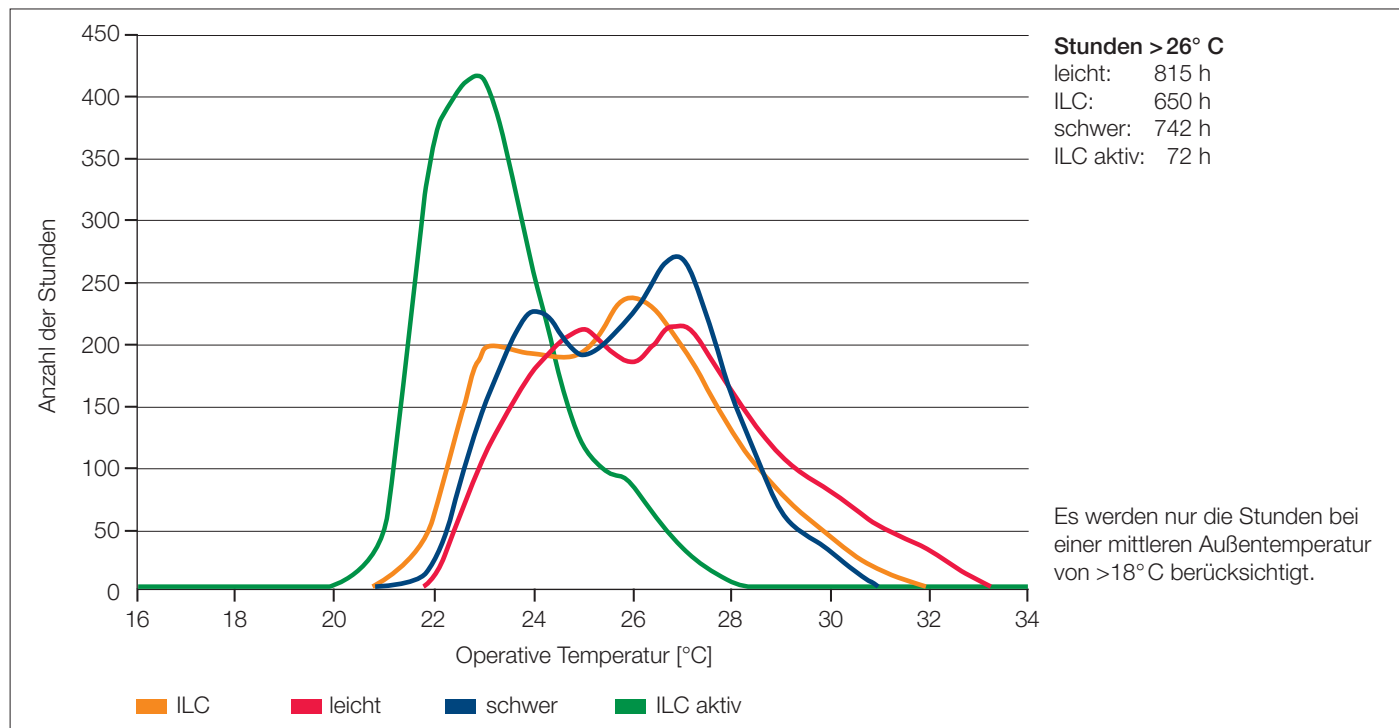


Bild 6-5 Häufigkeitsverteilung der operativen Temperatur im Sommer ohne Lüftung während der Nachtstunden (Tagesdurchschnitt der Außentemperatur >18 °C) [27]

demnach nur dann als effektiv angesehen werden, wenn der Energiebedarf, der in das System eingebracht wird, möglichst effektiv und kostengünstig gewonnen werden kann.

Als mögliche Energiequellen können Grauwasser (gering verschmutztes Abwasser) oder auch Grundwasser dienen. Diese Quellen bieten sich an, da sie unter gängigen Bedingungen kostengünstig zur Verfügung gestellt werden können. Weiterführende Untersuchungen legen nahe, dass eine Deckung des Energiebedarfs durch diese Quellen möglich ist. Verringert sich allerdings die Bauteildicke und erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit der Wand, so kann eine Deckung des Energiebedarfs über das Grauwasser nicht mehr gewährleistet werden. Diese Untersuchung verdeutlicht, dass der Energieträger Grauwasser in Abhängigkeit der materiellen Eigenschaften der Wand sowie deren Bauteildicke und der Energiemenge des Grauwassers infrage kommen kann, allerdings auch Grenzen aufweist.

Wie diese Aufführungen verdeutlichen, ist das Verhalten einer Aktivierung von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. Neben der Vorlauftemperatur spielt der Massenstrom eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus kann durch die Lage des Kapillarrohrsystems Einfluss auf das Verhalten der Aktivierung genommen werden. Des Weiteren spielt die Bauteildicke eine wesentliche Rolle. Um das System gesamtheitlich bewerten zu können, muss darüber hinaus der Energieträger für die Aktivierung sorgfältig gewählt werden. Aufgrund dieser Vielzahl an Aspekten werden weitere Untersuchungen angestrebt, um in einem detaillierteren Simulationsmodell die Untersuchungen zu verifizieren und eine Optimierung der Aktivierung durchzuführen und deren Vorteile sowie Nachteile detaillierter zu erarbeiten.

Fazit

In Bezug auf den sommerlichen Wärmeschutz kann eine ILC-Wand in einem Raummodell mit natürlicher Lüftung und ohne erhöhten Luftwechsel während der Nachtstunden den

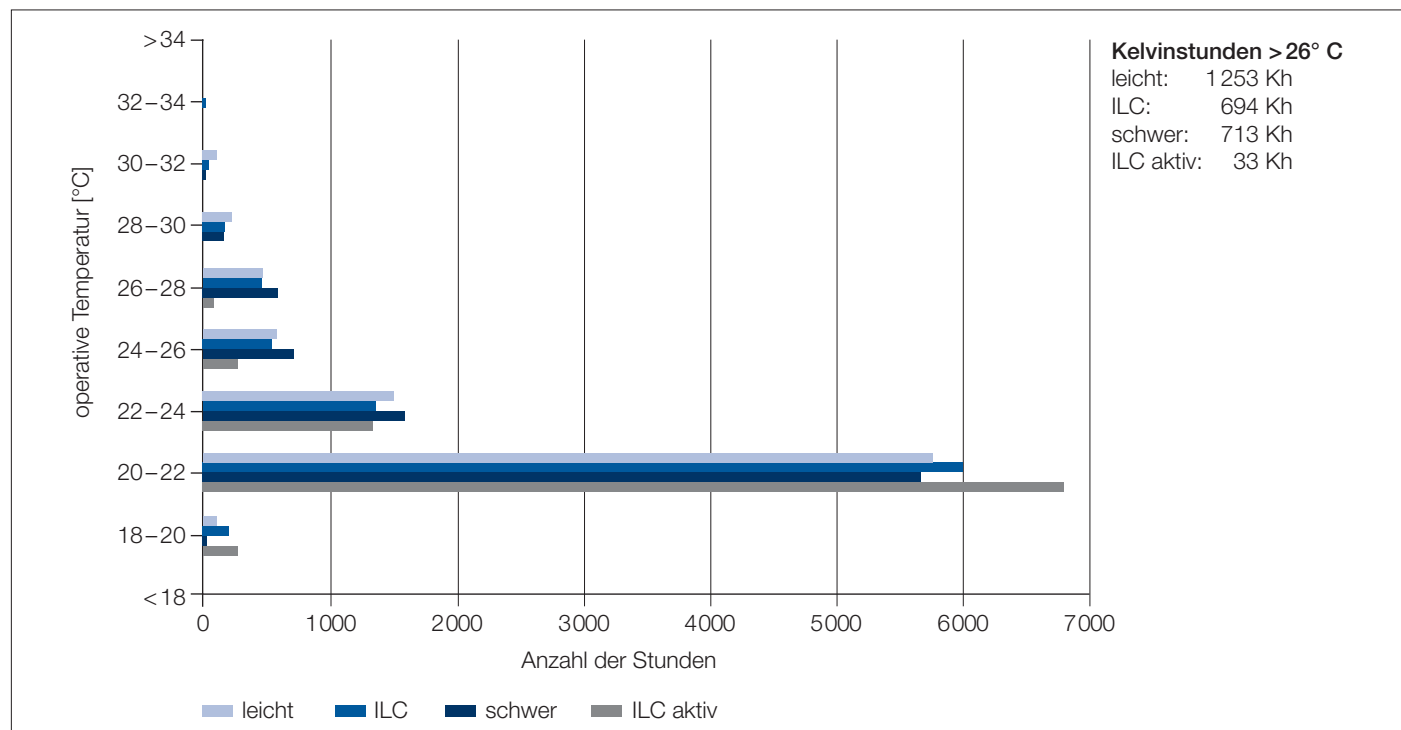


Bild 6-6 Auftretende Häufigkeiten der operativen Temperaturen im Sommer ohne Lüftung während der Nachtstunden (Tagesdurchschnitt der Außentemperatur >18°C) [27]

thermischen Komfort gegenüber der leichten sowie der schweren Bauweise verbessern. Erfolgt zusätzlich zur hygienischen Lüftung eine erhöhte Lüftung während der Nachstunden, zeigen ILC und die schwere Bauweise ein vergleichbares Verhalten.

Die Nutzung einer aktiven Wärmedämmung mit wasser-durchströmten Rohren im Bauteil stellt eine äußerst effektive Möglichkeit dar, um den thermischen Komfort sowohl im Sommer als auch im Winter zu verbessern. Das Verhalten der Aktivierung ist jedoch von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, weshalb weitere Untersuchungen angestrebt werden, um die Vor- und Nachteile detaillierter zu erarbeiten. Grundsätzlich bietet die Nutzung einer aktiven Wärmedämmung die Möglichkeit, die Wandquerschnitte von Infralichtbetonwänden bei gleichem U-Wert zu verringern.

6.4.2 Hygrische Simulation (Raumfeuchte)

Neben den Temperaturen beeinflusst unter anderem die Raumfeuchte den Nutzerkomfort eines Innenraums. Eine Untersuchung bezüglich der Beeinflussung der Raumfeuchte durch eine ILC-Wand erfolgte anhand einer hygrisch-dynamischen Simulation. Die Untersuchung des hygrischen Verhaltens der ILC-Wand wurde wie bereits beim thermischen Komfort im Vergleich zu anderen Wandaufbauten durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass Infralichtbeton als Außenwandmaterial einen positiven Einfluss auf das hygrische Raumklima hat. Dies zeigen die Vergleiche zwischen einer Wand aus ILC, einer Wand aus ILC mit diffusionsdichter Dampfsperre auf der Innenseite und einer Wand aus ILC mit einem zusätzlichen Lehmputz auf der Innenseite. Dabei repräsentiert die Variante mit Dampfsperre den Fall, in dem von keiner Feuchtespeicherung der Wand ausgegangen wird, und die Variante mit Lehmputz die Variante mit einem guten Feuchtespeicherverhalten.

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass die ILC-Wand sich bezüglich des hygrischen Verhaltens ähnlich verhält wie die ILC-Wand mit einer 2 cm dicken Lehmputzschicht auf der Innenseite. Beide Materialien sind in der Lage, Feuchte einzuspeichern und diese auch wieder an den Innenraum abzugeben. Dieses Verhalten ist bei der Variante mit Lehm noch geringfügig besser ausgeprägt als bei der Variante mit

der reinen ILC-Wand. Nachfolgende Darstellung (Bild 6-7) verdeutlicht dies anhand der Stunden außerhalb des angestrebten Bereichs von 30 bis 60 % relativer Feuchte.

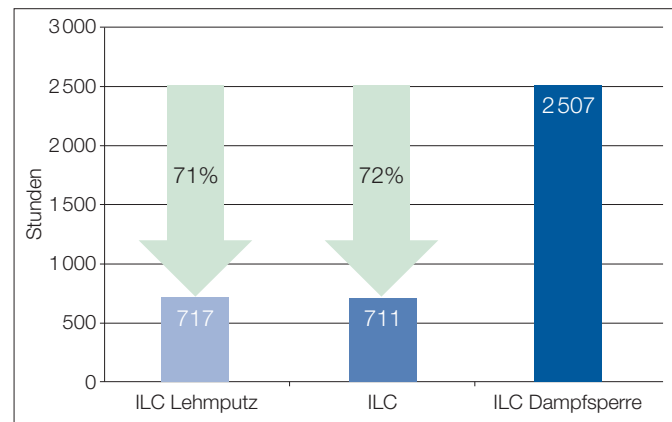


Bild 6-7 Häufigkeit der Raumluftfeuchte außerhalb 30 bis 60 % relativer Feuchte für verschiedene Wandaufbauten [27]

In einem weiteren Vergleich zwischen einer Normalbetonaußenwand und einer ILC-Außenwand unterschied sich das hygrische Verhalten in geringerem Maße. Dies ist dadurch zu begründen, dass die beiden Materialien sich sehr ähneln. Dennoch kann bei der Betrachtung der Stunden außerhalb des gewünschten Bereichs von 30 bis 60 % relativer Raumfeuchte festgestellt werden, dass die Stunden außerhalb des gewünschten Bereiches durch die ILC-Wand optimiert werden können. Demnach kann für den ILC festgehalten werden, dass seine hygrischen Auswirkungen auf einen Raum moderat sind. Gegenüber einem Standardbeton können die Stunden im angestrebten Bereich geringfügig gesteigert werden.

An dieser Stelle muss festgehalten werden, dass ein entscheidender Wert für die hygrische Simulation die Sorptionsisothermensteigung ist. Diese ist im Simulationsprogramm für die Standardmaterialien hinterlegt. Die hinterlegten Werte basieren auf Messungen. Für den ILC existieren diese Werte allerdings noch nicht. Daher sind diese Werte in Absprache mit dem Fraunhofer Institut für Bauphysik für den ILC als Mittelwert aus den Angaben für Beton und Porenbeton ermittelt. Es wird demnach davon ausgegangen, dass die Werte für den ILC zwischen beiden Materialien liegen. Für eine detailliertere Bestimmung müssen die entsprechenden

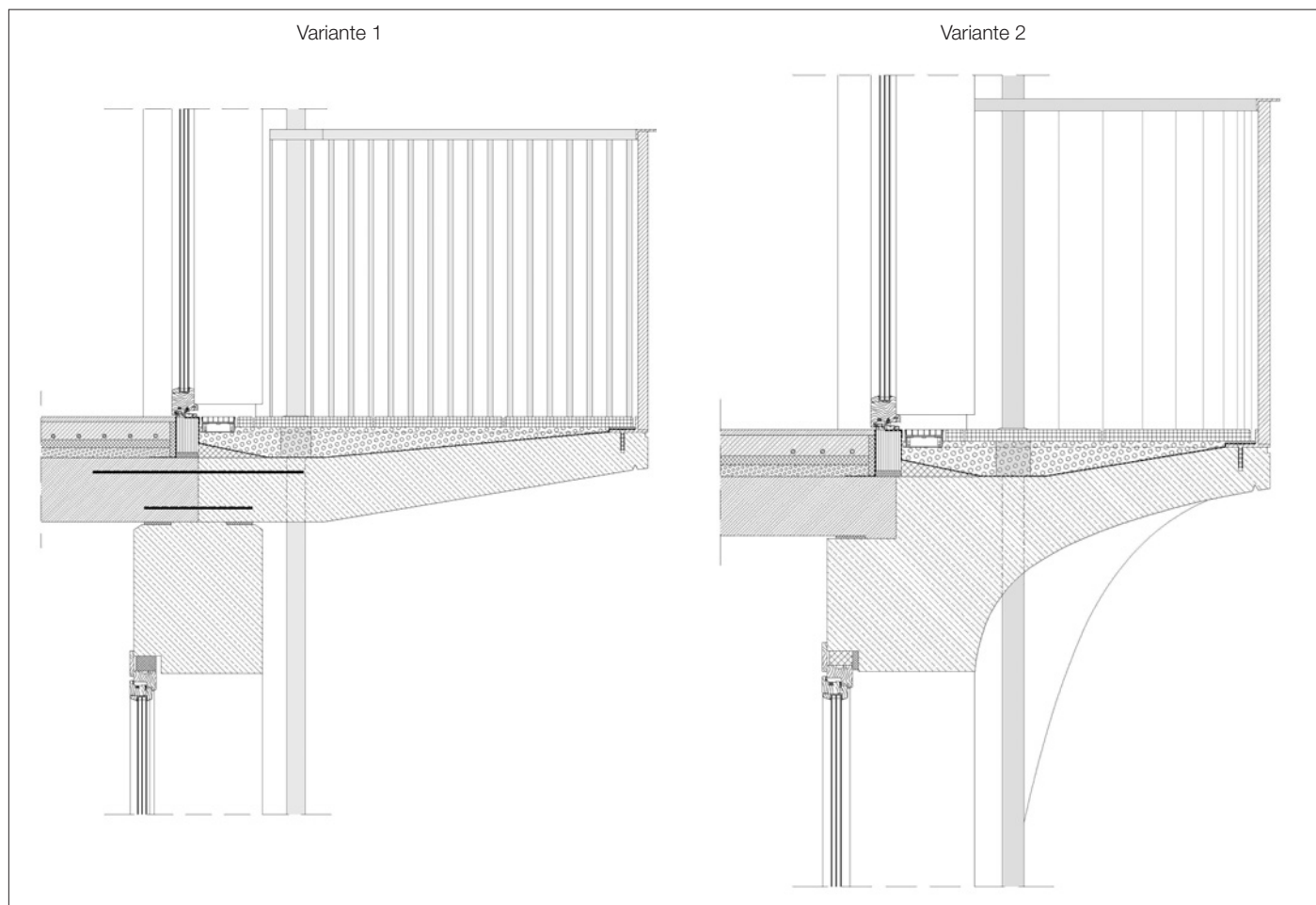


Bild 6-8 Analysierte Wärmebrückendetails eines Balkonanschlusses [27]

Werte messtechnisch ermittelt werden. Entsprechende Untersuchungen werden aktuell an der TU Berlin durchgeführt.

Fazit

ILC weist ein moderates Verhalten bezüglich seiner Auswirkungen auf die Raumfeuchte auf. Verglichen mit einem Normalbeton wirkt sich ILC geringfügig positiver aus. Die Untersuchungen beruhen jedoch auf Annahmen bezüglich der Sorptionsisothermensteigung von ILC, da dieser Wert bislang nicht vorliegt. Dieser sollte messtechnisch ermittelt werden, um die Untersuchungsergebnisse zu verifizieren.

6.4.3 Wärmebrückensimulation

Neben der Betrachtung der thermischen und hygrischen Einflüsse des ILC auf den Raum und dem damit verbundenen Nutzerkomfort sowie dem energetischen Bedarf des Raums spielt das thermische Verhalten im Bauteil eine ebenso wichtige Rolle. Die Betrachtung der Temperaturverläufe im Bauteil und die damit verbundene Ermittlung von Schwachstellen werden als Wärmebrückenbetrachtung be-

zeichnet. Im Gebäude erfolgt durch Wärmebrücken eine schnellere Wärmeübertragung vom Innenraum an die äußere Umgebung als durch »normale«, ungestörte Bauteile. Dieser Verlust wird durch den Wärmebrückenverlustkoeffizienten (Ψ -Wert) beschrieben.

Im Folgenden soll die Betrachtung eines Balkonanschlussdetails exemplarisch verdeutlichen, inwieweit dieses durch die Nutzung von ILC umgesetzt werden kann.

In der Wärmebrückenbetrachtung werden zwei Details eines Balkonanschlusses (Bild 6-8) mit darüber- und darunterliegendem Fassadenanschluss verglichen. Die beiden Details unterscheiden sich dabei zum einen durch den Balkonanschluss, der bei Variante 2 als Rundbogen ausgebildet ist, zum anderen in den Wanddicken.

Die Betrachtung der beiden Varianten verdeutlichte, dass mit einer Unterschreitung der 12,6°C-Isothermen nur im Fensteranschluss gerechnet werden muss. Damit besteht an dieser Stelle das Risiko eines Tauwasserausfalls sowie der Schimmelpilzbildung. Da dieser Bereich in der vorliegenden

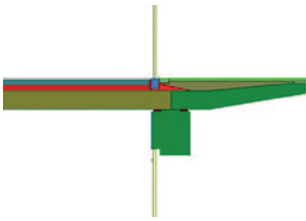
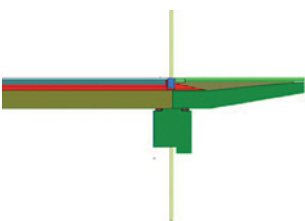
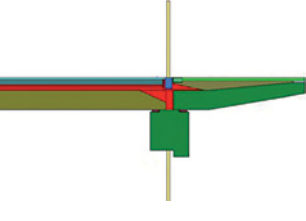

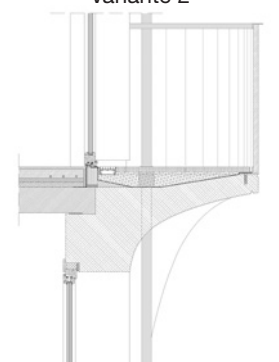
			
Variante 1 	Variante 1.1 (Basis) Ψ -Wert = 0,463 W/(m·K)	Variante 1.2 (Fenster mittig) Ψ -Wert = 0,320 W/(m·K)	Variante 1.3 (Dämmung Geschossdecken- kopf, Dämmkeil) Ψ -Wert = 0,191 W/(m·K)
Variante 2 	Variante 2.1 (Basis) Ψ -Wert = 0,436 W/(m·K)	–	Variante 2.3 (Dämmung Geschossdecken- kopf, Dämmkeil) Ψ -Wert = 0,192 W/(m·K)

Tabelle 6-12 Variantenvergleich Ψ -Werte (Quelle: Max Bauer, basierend auf [27])

Untersuchung allerdings nicht explizit untersucht und optimiert wurde, kann festgehalten werden, dass dieser in einer separaten Untersuchung detaillierter betrachtet werden sollte. Im rechnerisch untersuchten Ausschnitt des Balkonanschlusses kann hingegen festgehalten werden, dass mit keinem Tauwasserausfall und keiner Schimmelpilzbildung gerechnet werden muss. Dies kann ebenfalls anhand der Ergebnisse der Wärmebrückensimulation über die 12,6°C-Isotherme festgehalten werden.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass ein Geschossdeckenanschluss immer den Wärmebrückenverlustkoeffizienten des Bauteils verschlechtert. Dadurch ist der Energieverlust an dieser Stelle des Bauteils erhöht. Das Ziel der Untersuchung ist es, die Verluste so gering wie möglich zu halten. Neben der Variation der Fensterposition können Maßnahmen wie z. B. die zusätzliche Optimierung des Ge-

schossdeckenkopfes sowie dessen Abschrägung mit zusätzlicher Anbringung eines Dämmkeils erfolgen.

Alle Untersuchungen zeigten, dass Variante 2 mit Rundbogen gegenüber Variante 1 besser abschneidet. Dies ist mit der dickeren Überdeckung durch den Rundbogen zu begründen. Darüber hinaus zeigte die Untersuchung, dass über die Positionierung der Fenster der Wärmebrückenverlustkoeffizient entscheidend beeinflusst werden kann. Bei einer Anordnung der Fenster in der Bauteilmitte kann der geringste Ψ -Wert erzielt werden. Variante 1.2 mit mittiger Fensterposition verdeutlichte dieses Verhalten. Gegenüber der Basisvariante kann der Ψ -Wert für Variante 1 um 0,143 W/(m·K) reduziert werden. Des Weiteren zeigte sich, dass beispielsweise über die zusätzliche Dämmung des Geschossdeckenkopfes sowie dem Einsatz eines Dämmkeils noch günstigere Ψ -Werte erzielt werden können. So kann für Variante 1.3 gegenüber der Basis eine Minimierung um

0,272 W/(m·K) und für Variante 2.3 um 0,244 W/(m·K) erreicht werden. In Tabelle 6-12 sind die Ψ -Werte der Varianten aufgeführt.

Bei dieser Wärmebrückenbetrachtung muss berücksichtigt werden, dass mehrere Wärmebrücken den Ψ -Wert beeinflussen. Neben der Auskragung des Balkons beeinflussen die Geschossdecke sowie der untere und obere Fensteranschluss den Ψ -Wert. Eine Einordnung nach den gültigen Normen ist aufgrund dessen nicht möglich. Werden die Varianten des unteren und oberen Fensteranschlusses separat gerechnet, so zeigen die Ergebnisse, dass die zu erzielenden Werte besser sind als die Vorgaben aus DIN 4108 Beiblatt 2 [50] für einen Fensteranschluss an einem monolithischen Mauerwerk. Des Weiteren definiert die Norm, dass für die Varianten mit gedämmtem Geschossdeckenkopf kein Nachweis erforderlich ist, da es sich um eine thermisch getrennte Konstruktion handelt.

Fazit

Die Wärmebrückenuntersuchungen verdeutlichen, dass ILC-Bauteilanschlüsse auch ohne zusätzliche Dämmelemente zur thermischen Trennung so ausgebildet werden können, dass es nicht zu bauphysikalischen Problemen kommt (Überschreitung des Mindestwärmeschutzes, Tauwasserbildung oder Schimmelpilzbildung). Gleichwohl erfüllen die Anschlusssituationen nicht die Anforderungen der in der Novellierung des Beiblatts 2 der DIN 4108-Teil 2 [50] geforderten Werte. Bei der Projektbearbeitung gemäß EnEV [26]/GEG [28] sollte folglich entweder der relativ hohe Wärmebrückenkorrekturfaktor von 0,1 W/(m²·K) angesetzt oder eine detaillierte Wärmebrückenberechnung durchgeführt werden.

6.5 Ökobilanz

Zur Ökobilanz von Infraleichtbetonbauweisen liegen erste Erkenntnisse aus theoretischen Untersuchungen vor, bei denen Infraleichtbeton einer Wärmedämmverbundsystem (WDVS)-Bauweise gegenübergestellt wurde, sowohl als jeweilige Ort beton- [51] als auch Fertigteil ausführung [52].

Als Grundlage der Vergleiche wurde der bereits vorgestellte Typenentwurf des freistehenden Wohngebäudes aus Kap. 4.1 gewählt. Die Außenwände der jeweiligen Bauwei-

sen wurden so konzipiert, dass gleiche Wärmedurchgangskoeffizienten entstanden, um im Hinblick auf den Wärmeschutz und damit Energieverbrauch funktional äquivalente Gebäude vergleichen zu können. Der U-Wert wurde dabei auf 0,35 W/(m²·K) festgelegt, um vertretbare Wandstärken der ILC-Außenwände zu erhalten und gleichzeitig die Anforderungen der EnEV an das Gesamtgebäude einzuhalten. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse kurz zusammengefasst.

Ökobilanzierung der Infraleichtbetonzusammensetzung

Eine wesentliche Aufgabe war die möglichst realitätsnahe Bilanzierung des Infraleichtbetons. Die Nutzung eines bereits existierenden Datensatzes der ÖKOBAUDAT [53] war nicht möglich, da die vorhandenen Daten das Material nicht korrekt widerspiegeln. Der Datensatz für Leichtbeton zum Beispiel beruht auf einer Zusammensetzung, die u. a. Bims als leichte Gesteinskörnung berücksichtigt. Dies wäre eine positive Verfälschung der Bilanz, da es sich um einen natürlich vorkommenden Rohstoff handelt, für den nur Abbau und Transport anfallen. Leichtbetone mit industriell hergestellten Gesteinskörnungen wie Blähton oder Blähglas können hierdurch nicht realitätsnah bilanziert werden. Daher wurde für Infraleichtbeton ein eigener Datensatz mittels der Software GaBi (kurz für »Ganzheitliche Bilanzierung«) [54] erstellt. Dazu wurde soweit möglich auf konkrete Angaben der Hersteller und existierende Datensätze für einzelne Bestandteile aus GaBi zurückgegriffen. Wo keine expliziten Daten vorlagen, mussten Annahmen getroffen werden.

Die Ergebnisse zeigten, dass die aktuelle Zusammensetzung von ILC aus ökologischer Sicht noch Optimierungsbedarf aufweist. Maßgebende Einflussgrößen sind dabei die Bestandteile Silikastaub, Blähton und Zement (► vgl. Bild 6-9).

Die Bilanzierung von Silikastaub ist jedoch strittig, da es als Nebenprodukt bei der Herstellung von metallurgischem Silicium anfällt. Daher bestehen zwei Optionen: zum einen der ausschließliche Ansatz von Verpackung und Transport (dies entspricht den Angaben des Herstellers), zum anderen ein Ansatz im Mengenverhältnis Nebenprodukt/Hauptprodukt (Allokation).

Eine Anfrage beim Hersteller bezüglich der anteiligen Menge Silikastaub bei der Produktion des Hauptprodukts blieb

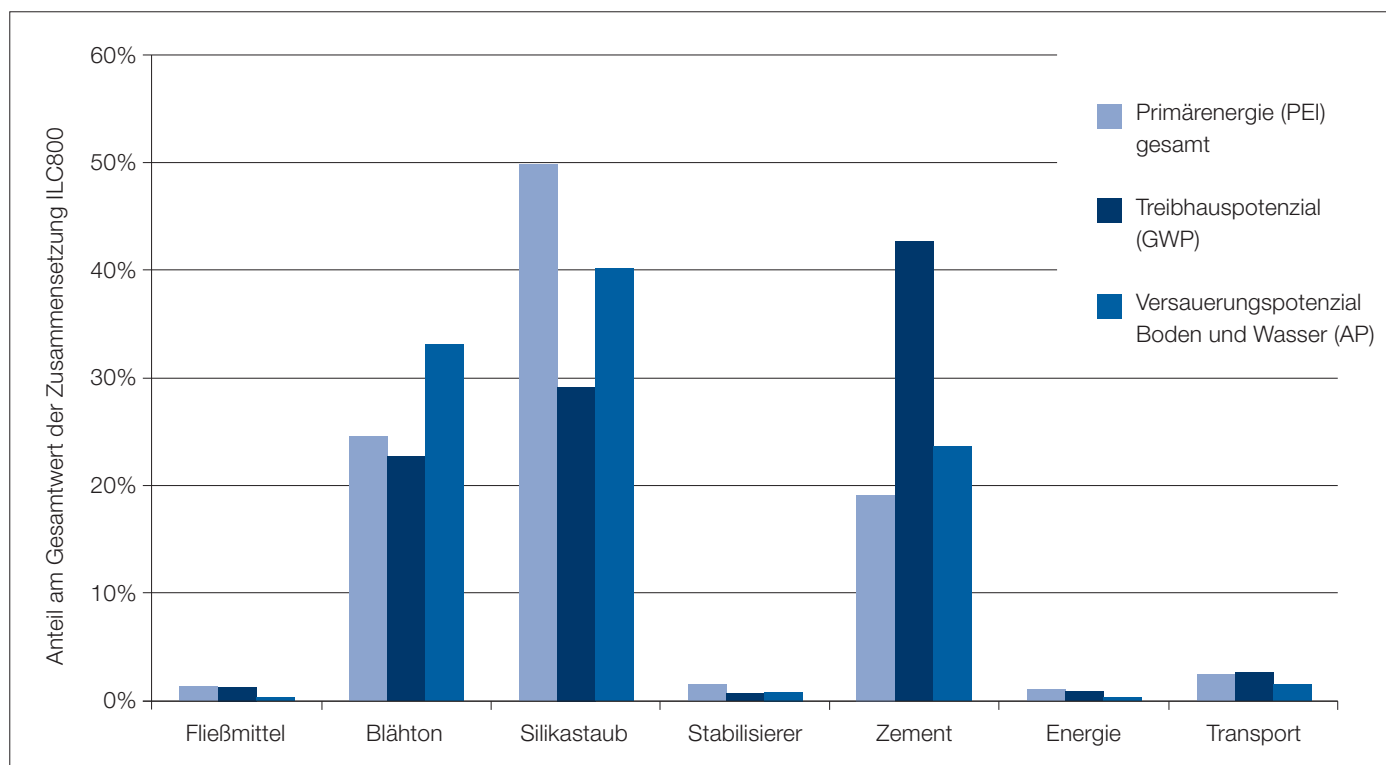


Bild 6-9 Anteile der Stoffe der Zusammensetzung ILC800 nach Tabelle 3-2 an den Wirkungsindikatoren PEI, GWP und AP bei Bilanzierung des Silikastaubs über Allokation gemäß [51]

ohne Erfolg. Unter Ansatz von ca. 40 % gemäß [55] bewirkt der Silikastaub ca. 50 % des Primärenergiebedarfs (PEI) und ca. 30 % des Treibhauspotenzials (global warming potential – GWP) der Infraleichtbetonzusammensetzung. Die Anteile der verschiedenen Stoffe der Zusammensetzung sind in der folgenden Grafik dargestellt.

Unabhängig von der strittigen Allokation für Silikastaub bewirken Blähton und Zement signifikante Anteile, die Verbesserungspotenzial bieten. Bislang wurde Infraleichtbeton hauptsächlich im Hinblick auf Trockenrohdichte und Festigkeit entwickelt. Erste Ansätze für eine ökologische Optimierung wurden bereits initiiert, z. B. die Verwendung ökologisch besser aufgestellter Leichtzuschläge wie Blähglas oder Blähgranulate aus recyceltem Mauerwerksbruch [51, 56].

Vergleich auf Bauteil- und Gebäudeebene

Ein Vergleich auf Bauteilebene je Quadratmeter Außenwandfläche spiegelte die Erkenntnisse aus der Bilanzierung der ILC-Zusammensetzung wider, d. h. hier überwiegen in der Herstellungsphase die hohen Indikatorwerte von ILC im Vergleich zu WDV. Der Vergleich auf Gebäudeebene über den Lebenszyklus hinweg (cradle to grave) zeigte für das gewählte Referenzgebäude einen relativ geringen Einfluss der Außenwand auf das Gesamtergebnis, u. a. da der Betrieb gegenüber den anderen Phasen wie Herstellung, Transport, Einbau und Entsorgung für das gewählte Gebäude dominierte. Dementsprechend lagen die Ergebnisse summiert über den gesamten Lebenszyklus für die verschiedenen Bauweisen relativ nah beieinander. Hier sind weitere Untersuchungen anzustellen, wie sich die Situation für andere Gebäude, die mit insgesamt weniger Betriebsaufwendungen einhergehen, als Vergleichsgrundlage verhält.

Zudem ist anzumerken, dass die anzusetzenden Nutzungsdauern einen entscheidenden Diskussionspunkt darstellen, der großen Einfluss hat. Da Infraleichtbeton ein neues Material ist, liegen keine Erfahrungswerte zur Nutzungsdauer vor. Für eine mehrschichtige Außenwand mit Normalbeton kann gemäß den Nutzungsdauerangaben des BBSR [57] von einer Nutzungsdauer von 100 Jahren ausgegangen werden, Leichtbeton wird mit 80 Jahren angesetzt. Porenbeton werden gemäß BBSR [57] 60 Jahre zugesprochen. Nach einer Umweltproduktdeklaration [58] kann bei bestimmungsgemäßer Anwendung eine unbegrenzte Nutzungsdauer erreicht werden. Da die Witterungsbeständigkeit von ILC (► *vgl. Kap. 6.3.2*) zusätzlich durch die empfohlene Hydrophobierung unterstützt wird und zudem nach aktuellem Stand mit einer korrosionsbeständigen Bewehrung kombiniert wird, erscheint ein Ansatz von 100 Jahren Nutzungsdauer realistisch. Da jedoch Erfahrungswerte fehlen, wurden auf der sicheren Seite in den Betrachtungen zur Ökobilanz nur 70 Jahre angesetzt.

Des Weiteren zeigten die Untersuchungen, dass die aktuell anzuwendenden Bilanzierungsregeln teilweise wenig geeignet für die ökobilanzielle Abbildung einer Bauweise mit langen Nutzungsdauern und geringem Wartungs- und Instandhaltungsaufwand sind. Zu nennen sei hier beispielsweise der empfohlene Betrachtungszeitraum gemäß dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) von 50 Jahren [59]. Hier sollten Anpassungen in Betracht gezogen werden, um eine sinnvolle Bilanzierung zu ermöglichen. Zudem sollten auch Effekte wie z. B. die negativen Auswirkungen von Auswaschungen von Bioziden aus WDVS-Anstrichen bzw. von Hydrophobierungen bei ILC-Wänden auf umliegende Böden und Gewässer berücksichtigt werden, um eine möglichst realitätsnahe Einschätzung zu erzielen. Ein weiterer Aspekt ist z. B. die schnelle Carbonatisierung von ILC (► *vgl. Kap. 7.2.1*). Diese führt dazu, dass ein Bauteil während der Lebensdauer vollständig carbonatisiert und dabei etwa $55 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ (Beispielrechnung an einem Beton mit einem Zementgehalt von $360 \text{ kg}/\text{m}^3$ [60]) der Umwelt entzieht.

Fazit

Die Zusammensetzungen gemäß Tabelle 3-2 wurden nicht aus ökobilanzieller Sicht entwickelt, dienen aber gut als Optimierungsgrundlage. Für zukünftige Anwendungen können diese Zusammensetzungen in Bezug auf ökobilanzielle Ge-

sichtspunkte je nach Projektanforderungen weiterentwickelt werden. Entscheidend sind hierfür die Bestandteile Silikastaub, Blähton und Zement, die das größte Verbesserungspotenzial bieten.

Infraleichtbeton ist eine langlebige Bauweise mit Nutzungsdauern von voraussichtlich mindestens 70, wahrscheinlich eher 100 Jahren und aufgrund der Kombination mit korrosionsbeständiger Bewehrung ggf. auch darüber hinaus. Für zukünftige Untersuchungen gilt es, die aktuellen Bilanzierungsregeln im Hinblick auf langlebige Bauweisen wie die des Infraleichtbetons kritisch zu hinterfragen und ggf. Anpassungen vorzunehmen, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung und entsprechende Vergleiche zu anderen Bauweisen erzielen zu können.

6.6 Kosten

Herstellkosten

Infraleichtbeton besteht aus Bestandteilen, die zwar durchaus handelsüblich sind, jedoch nicht immer durch die Betonwerke vorgehalten werden. Daher sind der Aufwand und damit auch der Preis für die Herstellung von ILC enorm davon abhängig, welche Bestandteile (z. B. Zementart oder Korngruppe der leichten Gesteinskörnung) ein jeweiliges Werk vorrätig hat, oder ob ggf. eine separate Vorhaltung erfolgen muss. Diesem Umstand ist es geschuldet, dass in der Vergangenheit sehr unterschiedliche Preisangaben verschiedener Werke vorlagen, die einen Bereich des Zwei- bis Vierfachen von Normalbeton umfassten. Eine verlässliche Preisangabe im Rahmen dieses Handbuchs ist daher nicht möglich, hier können zum jetzigen Zeitpunkt (2017) nur Näherungswerte genannt werden. Bei der Planung eines Projekts ist es ratsam, frühzeitig mit infrage kommenden Betonwerken Kontakt aufzunehmen, um die Materialkosten möglichst gut eingrenzen zu können.

Angemerkt sei noch, dass auch bei der Wahl der korrosionsbeständigen Bewehrung auf die Kosten geachtet werden muss, da hier erhebliche Preisunterschiede zwischen verzinkter Stahlbewehrung, rostfreiem Betonstahl und GFK-Bewehrung bestehen. Des Weiteren sollten Kosten für die erforderliche Zustimmung im Einzelfall eingeplant werden (► *vgl. Kap. 6.7*). Kostenvorteile bei der Herstellung bietet

die ILC-Bauweise aufgrund ihres monolithischen Aufbaus, da im Vergleich zu mehrschichtigen Systemen weniger Arbeitsschritte erforderlich sind.

Nach bisherigen Erfahrungen lag der Preis für einen Kubikmeter Infraleichtbeton (ohne Bewehrung) bei ca. 350 €/m³. Rechnet man die Kosten für die korrosionsbeständige Bewehrung (hier verzinkte Stahlbewehrung), die beidseitigen Sichtbetonschalungen sowie den Einbau über Kübel (Infraleichtbeton ist nicht pumpbar) hinzu, so kommt man bei kleinen Projekten (ein- bis zweigeschossige Gebäude) auf Kosten von ca. 500 bis 600 €/m² Außenwandfläche. Diese Kosten sinken mit steigenden Projektgrößen, sollten aber bereits zu Beginn eines Projektes Gegenstand der Abstimmung zwischen Planern und Bauherren sein.

Lebenszykluskosten

Neben den Herstellkosten fallen über den Lebenszyklus weitere Kosten an, wie z. B. für Betrieb, Inspektion und Wartung, Ersatzinvestitionen und jährliche Instandsetzung, Rückbau und Entsorgung.

Ein wichtiger Einflussfaktor für die Lebenszykluskosten ist die Lebens- bzw. Nutzungsdauer eines Materials. Infraleichtbeton ist ein neues Material, für das keine Erfahrungen im Hinblick auf die Lebensdauer vorliegen. Bisherige Kenntnisse lassen darauf schließen, dass ILC eine langlebige Bauweise ist (voraussichtlich mind. 70 bis 100 Jahre), was durch den Einsatz von korrosionsbeständiger Bewehrung noch zusätzlich unterstützt wird. Während der Lebensdauer ist nicht mit Ersatzinvestitionen für den ILC zu rechnen. Die Wartung und Instandhaltung bzw. Instandsetzung werden voraussichtlich aus der regelmäßigen Erneuerung einer Hydrophobierung und/oder Graffitienschutzbeschichtung bestehen. Bei Rückbau und Entsorgung ist aufgrund der monolithischen Bauweise von weniger Aufwand als bei komplexen, mehrschichtigen Systemen auszugehen.

Es wurden bereits erste Berechnungen zur Lebenszykluskostenanalyse angestellt. Aufgrund der eingangs geschilderten Problematik des stark schwankenden Materialpreises von ILC wird hier jedoch auf die Darstellung von Ergebnissen verzichtet, da diese nur für den jeweils eingesetzten Materialpreis Gültigkeit besitzen und damit nicht allgemein aussagekräftig sind. Zudem besteht auch hier Anpassungsbe-

darf der aktuell gültigen Bilanzierungsempfehlungen, da diese teilweise Vereinfachungen vorsehen, wie z. B. den pauschalen Ansatz für Wartung und Instandhaltungskosten als prozentualen Anteil der Herstellungskosten [61], die eine instandhaltungs- und wartungsarme Bauweise wie Infraleichtbeton nur ungenügend repräsentieren.

Fazit

Die Herstellkosten von Infraleichtbetonbauteilen hängen maßgeblich vom Materialpreis des Betons und der korrosionsbeständigen Bewehrung ab. Nach bisherigen Erfahrungen schwanken der individuelle Aufwand und damit auch der Materialpreis von ILC sehr stark in Abhängigkeit der jeweiligen Situation des anbietenden Werks. In der Vergangenheit ergaben sich Preisspannen des Zwei- bis Vierfachen von Normalbeton. Bei der Planung eines Projektes ist daher eine frühzeitige Kontaktaufnahme zu potenziellen Werken empfehlenswert.

Über den Lebenszyklus betrachtet bietet die ILC-Bauweise Vorteile, z. B. aufgrund von voraussichtlich langen Nutzungsdauern und einhergehenden geringen Ersatzinvestitionen oder bei Rückbau und Entsorgung durch die monolithische Bauweise. Die Quantifizierung dieser möglichen Einspar-effekte hängt vom jeweiligen Materialpreis ab.

6.7 Rechtliche Grundlagen

Die Festigkeit von Infraleichtbeton liegt unterhalb der Klasse LC12/13, weshalb ILC nicht in den Geltungsbereich des EC2-1-1 fällt. Ebenso liegt ILC aufgrund seiner geringen Trockenrohdichte nicht im Anwendungsbereich der DIN EN 206. Da ILC ein geschlossenes Gefüge aufweist, besitzen auch die Normen für haufwerksporige Leichtbetone und Porenbetone keinen bindenden Charakter.

ILC ist somit ein neues Bauprodukt, das nicht in der Bauregelliste A Teil 1 [108] enthalten ist und bislang nicht durch die dort genannten technischen Regeln bzw. durch Technische Baubestimmungen [109] verbindlich erfasst wird. Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung bzw. ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis liegt für ILC bislang ebenfalls nicht vor.

Ein solches, nicht geregeltes Bauprodukt darf gemäß Musterbauordnung (MBO) [110] trotzdem verwendet werden, wenn die oberste Bauaufsichtsbehörde eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erteilt. Voraussetzung ist der Nachweis der Verwendbarkeit im Sinne von § 3 Abs. 2 der MBO. Die oberste Bauaufsichtsbehörde kann auch erklären, dass ihre Zustimmung nicht erforderlich ist, falls keine Gefahren zu erwarten sind.

Das Antragsverfahren zur Erlangung einer ZiE wird vom jeweiligen Bundesland geregelt. Hinweise zum Ablauf sind für die meisten Bundesländer in entsprechenden Merkblättern zu finden. Je nach Antragsgegenstand sind verschiedene Unterlagen erforderlich, z. B. bautechnische Nachweise, Prüfberichte von experimentellen Untersuchungen, gutachterliche Stellungnahmen und bereits erteilte Zustimmungen im Einzelfall.

Grundsätzlich empfiehlt es sich, bereits in einem frühen Planungsstadium Kontakt zur Behörde aufzunehmen, um die einzureichenden Unterlagen abzustimmen und deren Erarbeitung frühzeitig zu veranlassen. Die Beauftragung und damit auch die Kosten für experimentelle Prüfungen und Gutachten liegen bei einem am Bau Beteiligten, in der Regel dem Antragsteller. Die Verwaltungsgebühren, die bei der Behörde anfallen, sind ebenfalls landesspezifisch. Berlin nennt beispielsweise einen Gebührenrahmen zwischen 500 und 15 000 € [111].

Für Infraleichtbeton wurden in der Vergangenheit bereits zwei Zustimmungen im Einzelfall erteilt, die ggf. bei der Erwirkung zukünftiger Zustimmungen im Einzelfall von Nutzen sein können:

- Zustimmung im Einzelfall für Außenbauteile aus Infraleichtbeton, erteilt durch Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin, 27.02.2017
Bauvorhaben: Jugend-Freizeiteinrichtung Betonoase, Berlin-Friedrichsfelde
Bauherr: Bezirksamt Lichtenberg von Berlin
Baubeginn: 2017
- Zustimmung im Einzelfall für Infraleichtbeton
Bauvorhaben: zweigeschossiges Einfamilienhaus, Aiterbach
Bauherr/Architekt: Michael Thalmaier
Baujahr: 2015

Die Bauvorhaben werden in Kapitel 9 beschrieben.



7 Bemessungsansätze zur Tragwerksplanung

- 7.1 Grundlagen der Bemessung
- 7.2 Dauerhaftigkeit
- 7.3 Duktilies Bauteilverhalten
- 7.4 Ausgangswerte für die Bemessung
- 7.5 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit
- 7.6 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
- 7.7 Besonderheiten bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung
- 7.8 Konstruktionsgrundlagen

Infraleichtbeton liegt mit einer Trockenrohdichte von weniger als 800 kg/m^3 sowie einer Festigkeitsklasse derzeit geringer LC12/13 unterhalb der normativen Grenzen (► *vgl. Kap. 7.1.1*). Seine speziellen Eigenschaften erfordern in Teilen eine Anpassung der Ansätze der Normen für die Bemessung.

Die Erläuterungen in den folgenden Abschnitten stützen sich auf die Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte. Speziell die Angaben zu Materialkennwerten, zur Spannungs-Dehnungs-Linie, zur Biegebemessung sowie zu Riss-, Verformungs- und Verbundverhalten basieren auf den Ergebnissen eines DFG-Forschungsprojekts (SCHL 1901/7-1), die detailliert im Rahmen der Dissertation von Hückler [21] veröffentlicht wurden.

Die Erkenntnisse zeigen, dass ILC weitestgehend ein für Leichtbetone übliches Verhalten aufweist [21]. Daher wird vorgeschlagen, in den Bereichen, in denen keine Forschungsergebnisse zum Infraleichtbeton vorliegen (z. B. Querkrafttragverhalten), auf die Ansätze des EC2 [20] bzw. im Fall von GFK-Bewehrung auf die entsprechenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) zum Einsatz in Normalbeton zurückzugreifen. Statistisch relevante Untersuchungen, ob diese Ansätze bei ILC anwendbar sind, stehen noch aus. Im konkreten Anwendungsfall ist die Verwendung solcher Ansätze im Rahmen des Verfahrens zur Zustimmung im Einzelfall (► *vgl. Kap. 9*) abzustimmen.

Beispielhafte Berechnungen zur Bemessung eines ILC Wandbauteils und eines biegebeanspruchten ILC-Balkens unter Verwendung der im Folgenden geschilderten Ansätze finden sich im Anhang.

7.1 Grundlagen der Bemessung

7.1.1 Geltungsbereich einschlägiger Normen

- Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [20] 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/m^3) geregelt.
- DIN EN 206 *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität* gilt für Beton, der für Ort betonbauwerke, vorgefertigte Betonbauwerke sowie für Fertigteile für Gebäude und Ingenieurbauwerke verwendet wird. Der Geltungsbereich schließt jedoch nur Leichtbetone mit Rohdichteklassen D 1,0 bis 2,0 (800 bis 2000 kg/m^3) ein [5].
- Neben den beiden o. g. Normen existieren noch weitere Regelwerke, die sich auf haufwerksporigen Leichtbeton oder Porenbeton beziehen:
 - DIN 4213 [62, 63], DIN EN 1520 [64] für haufwerksporigen Leichtbeton oder Porenbeton (z. B. vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton),
 - DIN EN 771-3 [65], DIN V 18151-100 [66], DIN V 18152-100 [67], DIN V 20000-403 [68] für Mauersteine aus haufwerksporigem Leichtbeton,
 - DIN 4166 [69] für Porenbeton-Bauplatten und -Planbauplatten,
 - DIN EN 771-4 [70], DIN 20000-404 [71] für Porenbetonsteine,
 - DIN EN 12602:2016-12 [72], DIN 4223-100 [73] bis -103 [74] für vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton.

Die Festigkeit von Infraleichtbeton liegt unterhalb der Klasse LC12/13 und D 1,0, weshalb ILC nicht in den Geltungsbereich des EC2 [20] fällt. Da ILC ein geschlossenes Gefüge aufweist, besitzen auch die Normen für haufwerksporige Leichtbetone und Porenbetone keinen bindenden Charakter.

ILC ist also durch keine geltende Norm erfasst. Aufgrund seiner Eigenschaften und seines betonüblichen Verhaltens wird jedoch insbesondere der EC2 [20] als Grundlage für die

nachfolgend beschriebenen Bemessungsansätze herangezogen.

(Im Folgenden wird bei Verweisen auf die o. g. Normen auf das Referenzieren zur Literaturliste verzichtet.)

7.1.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Ermittlung des Bemessungswerts der Beanspruchungen erfolgt analog zu EC2. Der Bemessungswert der charakteristischen Druckfestigkeit (Zylinderdruckfestigkeit) ergibt sich nach EC2 durch die Berücksichtigung eines Dauerstandbeiwerts α_{ilcc} und eines Materialsicherheitsbeiwerts γ_c . Übertragen auf ILC ergibt sich:

$$f_{ilcd} = \alpha_{ilcc} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} \quad (5)$$

mit

f_{ilcd} : Bemessungswert Druckfestigkeit ILC

f_{ilck} : charakteristische Druckfestigkeit ILC

α_{ilcc} : Dauerstandbeiwert ILC

γ_{ilc} : Materialsicherheitsbeiwert ILC

Der Materialsicherheitsbeiwert γ_c , dessen Bestandteil Variationskoeffizienten aus Modellunsicherheiten, Geometrie und Materialfestigkeit sind, ist für Normalbeton und Leichtbeton identisch. Für ILC sind keine wesentlich höheren Variationskoeffizienten für Materialfestigkeit zu erwarten, weshalb vorgeschlagen wird, den Materialsicherheitsbeiwert von $\gamma_{ilc} = 1,5$ auch für ILC zu übernehmen.

Leichtbeton besitzt eine geringere Dauerstandfestigkeit als Normalbeton. Dies wird im EC2 [20] durch einen Abminderungsfaktor von 0,75 bzw. 0,80 anstatt 0,85 für Normalbeton berücksichtigt [4].

Die Dauerstandfestigkeit von ILC wurde bislang nicht explizit untersucht. Für ILC wird daher vorgeschlagen, den Beiwert mit 0,75 anzusetzen. Der Bemessungswert der Druckfestigkeit ergibt sich somit zu

$$f_{ilcd} = \alpha_{ilcc} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} = 0,75 \cdot \frac{f_{ilck}}{1,5} = 0,5 \cdot f_{ilck} \quad (6)$$

Beim Nachweis von unbewehrten Bauteilen oder gering bewehrten Bauteilen (mit Bewehrungsgraden unterhalb der Mindestbewehrungsgrade) wird gemäß EC2 [20] der Dauerstandbeiwert $\alpha_{cc,pl}$ verwendet, um die geringere Duktilität zu berücksichtigen. Dieser ergibt sich für Normalbeton aus der Multiplikation des Dauerstandbeiwerts für bewehrte Bauteile $\alpha_{cc} = 0,85$ mit einem Duktilitätsbeiwert zu $\alpha_{cc,pl} = 0,70$.

Da bislang keine Erkenntnisse zur Dauerstandfestigkeit von bewehrtem und unbewehrtem Infralichtbeton vorliegen, wird vorgeschlagen, das Verfahren aus dem EC2 zur Bestimmung des Dauerstandbeiwerts unbewehrter ILC-Bauteile durch Multiplikation mit dem Faktor 0,7/0,85 zu übernehmen. Es ergibt sich

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

$$f_{ilcd,pl} = \alpha_{ilcc,pl} \cdot \frac{f_{ilck}}{\gamma_{ilc}} = 0,62 \cdot \frac{f_{ilck}}{1,5} = 0,41 \cdot f_{ilck} \quad (8)$$

Die charakteristische Druckfestigkeit f_{ilck} muss im konkreten Anwendungsfall für die gewählte Zusammensetzung im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) ermittelt werden. Für die Zusammensetzungen in Tabelle 3-2 beispielsweise wurden die charakteristischen Festigkeiten in Abhängigkeit der auftretenden Streuungen über den 5 %-Quantil-Wert ermittelt.

7.1.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

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

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

7.2 Dauerhaftigkeit

7.2.1 Korrosionsverhalten und Bewehrungsart

Korrosionsverhalten

Beton schützt im Allgemeinen durch seine hohe Alkalität (pH-Wert: 12,5 bis 13,5) bzw. durch die sogenannte Passivierung die Bewehrung vor Korrosion (Bild 7-1). Hierfür genügen i. d. R. schon wenige Zentimeter Betondeckung, um einen dauerhaften Schutz vor angreifenden Medien zu gewährleisten. Wasser und Kohlenstoffdioxid bewirken im Beton eine Carbonatisierung, die die Alkalität herabsetzt und je nach Betonart unterschiedlich schnell fortschreitet. Infraleichtbeton besitzt eine hohe Porosität, die das Eindringen von Wasser und Kohlenstoffdioxid nicht im gleichen Maße wie Normalbeton verhindert und somit deutlich schneller carbonatisiert.

Aufgrund dieses Sachverhalts wurde eine ILC-Wand [2] aus dem Jahr 2012 auf ihre Carbonatisierungstiefe hin untersucht [75]. Hierfür wurden aus der überwiegend trocken gelagerten Wand drei Bohrkern entnommen, gespalten und zur Prüfung der Carbonatisierungstiefe mit einer Phenolphthaleinlösung besprüht. Diese bewirkt eine Einfärbung des noch alkalischen Bereichs (Bild 7-2). Es ergab sich ein Mittelwert der Carbonatisierungstiefe von $y = 45$ mm nach einer Zeit von $t = 2,75$ Jahren [a] und ein Carbonatisierungskoeffizient von $k = 27,14 \text{ mm/a}^{0,5}$ (zum Vergleich: $k_{\text{Normalbeton}} = 3,54 \text{ mm/a}^{0,5}$) [76]. Ein Normalbeton erreicht mit einer Betondeckung von 35 mm ein theoretisches Alter von ca. 100 Jahren, bevor die Bewehrung auf Korrosion untersucht werden muss. Bei Infraleichtbeton wäre dies schon nach

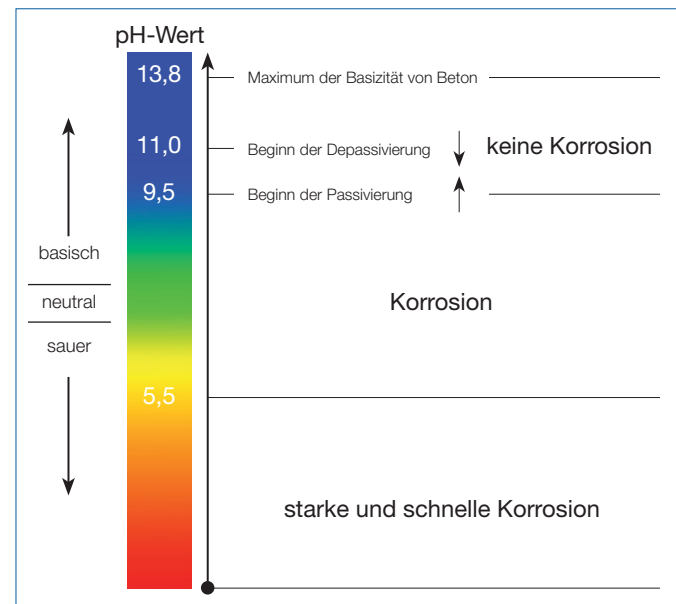


Bild 7-1 Korrosionspotenzial in Abhängigkeit des pH-Werts [75]

1,7 Jahren der Fall, dies entspricht einem um Faktor 60 (!) beschleunigten Carbonatisierungsprozess [76]. Zur Verifikation dieses Ergebnisses wurde in einem weiteren Versuch ein Bohrkern aus einem Balken aus dem Jahr 2006 geprüft. Es ergab sich ein Carbonatisierungsfaktor von $k = 30 \text{ mm/a}^{0,5}$, was die Größenordnung der zuvor ermittelten Ergebnisse bestätigte.

Des Weiteren wurden experimentelle Untersuchungen zum Einfluss einer silanbasierten Hydrophobierung auf die Carbonatisierung durchgeführt [77]. Hierzu wurden nicht-hydrophobierte und hydrophobierte Flächen aus ILC800 über einen Zeitraum von fünf Monaten täglich mit Wasser besprüht und anschließend die Carbonatisierungstiefe ermittelt. Daraus ergab sich ein Carbonatisierungsfaktor k der hydrophobierten Fläche von »nur« ca. 15 bis 20 $\text{mm/a}^{0,5}$, die nicht-hydrophobierten Bereiche bestätigten die bisherigen Werte. Eine Bewehrungskorrosion kann im Lebenszeitraum eines Bauwerks durch eine Hydrophobierung damit nicht ausgeschlossen werden, die Hydrophobierung wirkt jedoch dem Carbonatisierungsprozess entgegen.

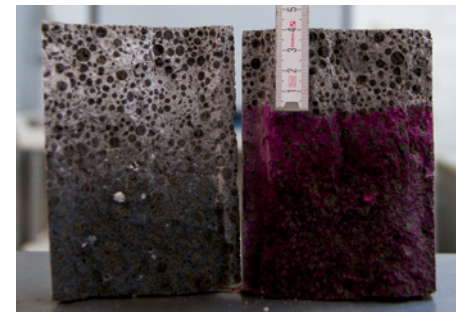
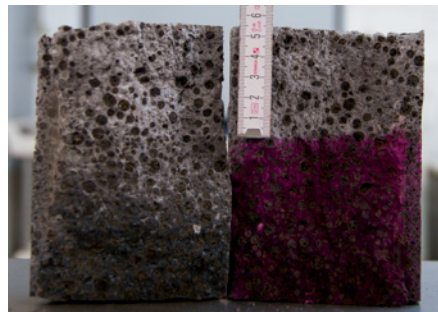
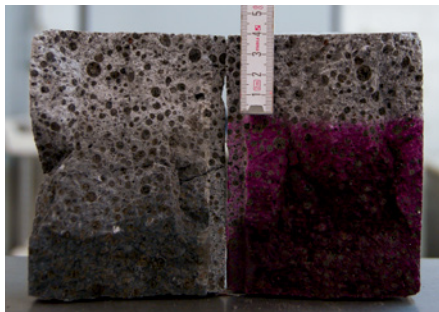


Bild 7-2 Messung der Carbonatisierungstiefe mit Phenolphthaleinlösung (Foto: Philipp Reiter)

Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Carbonatisierung bei Infra-leichtbeton sehr schnell voranschreitet. Auf Basis des aktuel-len Kenntnisstands wird daher der Einsatz von korrosionsbe-ständiger Bewehrung empfohlen. Auch eine Hydrophobierung kann der Bewehrungskorrosion entgegenwirken, indem das Eindringen von Wasser behindert wird.

7.2.2 Wahl der Bewehrung

Auch wenn die Bewehrung in ILC-Wänden meist nur zur Ver-meidung großer Schwindrisse eingesetzt werden muss, darf nicht vergessen werden, dass die Wände fast immer auch Diskontinuitätsbereiche (D-Bereiche; vgl. [78]) aufweisen. In Lasteinleitungsbereichen, im Bereich geometrischer Diskontinuitäten wie Aussparungen und natürlich bei Fensterstürzen und Balkonanschlüssen wird mehr als eine »Verträglichkeitsbewehrung« nötig. Deshalb ist eine korro-sionsbeständige Bewehrung sehr wichtig.

Es kommen verschiedene Materialien infrage. Dazu zählen nach derzeitigem Kenntnisstand z. B.

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

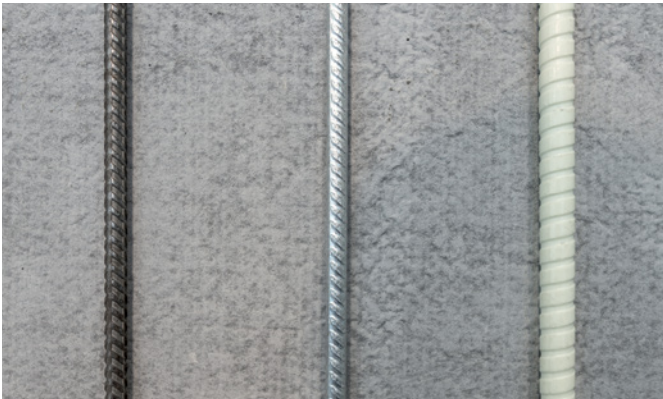


Bild 7-3 Unterschiedliche Bewehrungsarten (v. l.: Betonstahl, verzinkter Betonstahl, GFK-Bewehrung)

	verzinkte Stahlbewehrung	nichtrostender Betonstahl	GFK-Bewehrung
E-Modul (MPa)	200 000	~ 160 000	60 000 (Zug)
Bemessungswert Streckgrenze f_{yd} [N/mm ²]	435	435	445
Gewicht [g/cm ³]	7,85	~ 7,7 bis 7,85	2,2
Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	60	15	0,7 (axial)/ 0,5 (radial)
thermische Dehnung [1/K]	0,8 bis $1,2 \cdot 10^{-5}$	~ 1,0 bis $1,6 \cdot 10^{-5}$	$0,6 \cdot 10^{-5}$ (axial) $2,2 \cdot 10^{-5}$ (radial)
nachträgliches Biegen beim Einbau zulässig	zulässig; Beschädigungen der Verzinkung sind jedoch auszubessern	ja	nein
ungefähre Kostenspannen für d = 8 mm und 12 mm je laufendem Meter [€/lfm]	d = 8: 0,70 bis 1,20 €/lfm d = 12: 1,50 bis 2,50 €/lfm	d = 8: 1,50 bis 3,50 €/lfm d = 12: 3,50 bis 8,00 €/lfm	d = 8: 2,45 €/lfm d = 12: 4,70 €/lfm
(Angaben können je nach Preisentwick-lung, Produkt und Menge stark variieren)	(Annahme: Preis inkl. Verzinkung zwischen ca. 1,80 bis 3,00 €/kg)	(abhängig von Legierungs-gehalten; beispielhaft für [81, 82])	(beispielhaft für [83])
Brandschutz – erforderliche Betondeckung für REI90 bzw. R90	DIN EN 1992-1-2 [84], tragende Normalbetonwände: 20 bis 25 mm (Achsabstand Bewehrung, REI90)		C = 65 mm [24] (Normalbeton, R90; ggf. sind auch geringere Betondeckungen möglich ► vgl. auch Kap. 7.7)

Tabelle 7-1 Vergleich korrosionsbeständiger Bewehrungsarten basierend auf [24, 25]

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 (► *vgl. Tabelle 7-1*). 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 [79]. Für GFK-Bewehrung [80] bestehen spezielle Regelungen für Transport und Lagerung, um Schädigungen zu vermeiden [80].

7.2.3 Betondeckung

Gemäß EC2 muss die Betondeckung bei Leichtbeton gegenüber Normalbeton um 5 mm erhöht werden. Damit gilt für das Nennmaß der Betondeckung:

$$c_{\text{nom}} \geq d_{\text{Größtkorn}} + 5 \text{ mm} \quad (9)$$

Dies ergibt sich für die ILC-Zusammensetzungen gemäß Tabelle 3-2 mit einem Durchmesser des Größtkorns $d_{\text{Größtkorn}}$ von 6 mm zu $c_{\text{nom}} \geq 6 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 11 \text{ mm}$ (bei einer Variation der Zusammensetzungen ist dieser Wert ggf. anzupassen).

Wie im Abschnitt zuvor geschildert ist der Einsatz von korrosionsbeständiger Bewehrung zu empfehlen. Dann ist nur das Mindestmaß der Betondeckung c_{min} zur Sicherung des Verbundes maßgebend:

$$c_{\text{min}} \geq d_s \text{ und Vorhaltemaß } \Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm [31].}$$

Damit ergibt sich

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} = c_{\text{min}} + 10 \text{ mm} \geq d_{\text{Größtkorn}} + 5 \text{ mm}$$

mit

$$c_{\text{min}} \geq d_s$$

$d_{\text{Größtkorn}}$ (Durchmesser des Größtkorns) = 6 mm für ILC-Zusammensetzungen gemäß Tabelle 3-2

Für GFK-Bewehrung sind weitere Regelungen entsprechend der bauaufsichtlichen Zulassung und den Technischen Informationen [24, 80] zu beachten.

Darüber hinaus können aus Gründen des Brandschutzes weitere Anforderungen an die Größe der Betondeckung bestehen, die zu beachten sind (► *vgl. hierzu auch Kap. 6.3.7 bzw. Kap. 7.7*).

7.3 Duktiles Bauteilverhalten

Die Duktilität beschreibt das Verformungspotenzial von Bauteilen vor dem Bruch. Ein duktiles Bauteilverhalten muss nach EC2 sichergestellt sein, um ein Versagen ohne Vorankündigung zu vermeiden. Dies wird erreicht durch

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

Für Infraleichtbeton werden die Forderungen für Mindest- und Höchstbewehrung des EC2 übernommen (► *zur Mindestbewehrung siehe auch Kap. 7.8.2*). Für die Druckzonenhöhe wird, analog zu anderen Leichtbetonen, eine Begrenzung auf

$$\xi_{\text{lim}} = x/d \leq 0,35 \quad (10)$$

mit

ξ_{lim} : Grenzwert der bezogenen Druckzonenhöhe

x : Druckzonenhöhe

d : statische Nutzhöhe

empfohlen. Wird diese überschritten, kann eine Umschnürring der Biegedruckzone in Betracht gezogen werden [85]. Diese Begrenzung der Druckzonenhöhe gilt für Stahlbewehrung (► *zur Duktilität mit GFK-Bewehrung vgl. Kap. 7.7*).

7.4 Ausgangswerte für die Bemessung

7.4.1 Spannungs-Dehnungs-Linien

Infrleichtbeton besitzt kein plastisches Verformungspotenzial, er weist ein ähnlich sprödes Materialverhalten auf wie z. B. UHPC (Ultra High Performance Concrete). Die Spannungs-Dehnungs-Linie von ILC verläuft demnach linear bis zum Versagen bei der mittleren Druckfestigkeit f_{ilcm} und der Bruchdehnung ε_{ilc1} .

7.4.2 Mechanische Eigenschaften und elastische Verformungseigenschaften

Um aus der experimentell ermittelten mittleren Druckfestigkeit f_{ilcm} eine charakteristische Festigkeit f_{ilck} ableiten zu können, schlägt Hückler [21] vor, den 5%-Quantilwert basierend auf einer Normalverteilung heranzuziehen. Der Bemessungswert der Druckfestigkeit f_{ilcd} ergibt sich anschließend gemäß den Angaben aus Kap. 7.1.2.

Im Folgenden sind die wesentlichen Materialkennwerte der verschiedenen ILC-Zusammensetzungen ILC600 bis ILC800 zusammengefasst, die sich auf die Ausgangsstoffe gemäß Tabelle 3-2 beziehen.

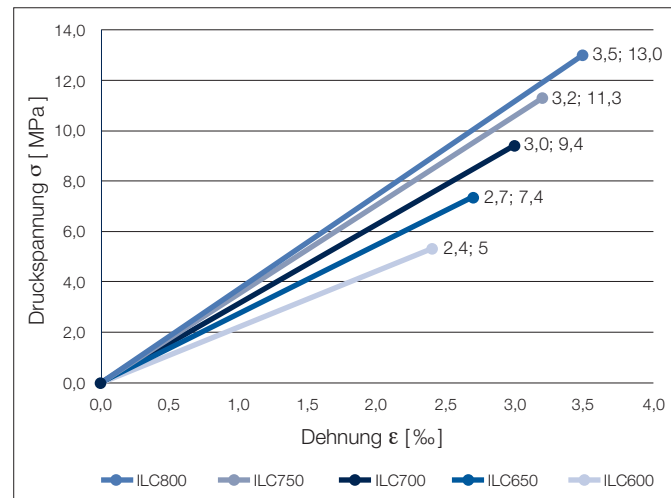


Bild 7-4 Idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linien für die Zusammensetzungen ILC600 bis ILC800 aus experimentell ermittelten mittleren Druckfestigkeiten und Bruchdehnungen (basierend auf [21])

7.4.3 Ideelle Querschnittswerte

Im Stahlbetonbau unterscheidet man drei Arten von Querschnittswerten: den Bruttoquerschnitt, den Nettoquerschnitt und den ideellen Querschnitt. Der Bruttoquerschnitt bezeichnet einen homogenen Betonquerschnitt mit den realen äußeren Querschnittsabmessungen, der Einfluss der Be-

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Experimentell ermittelte Eigenschaften (gewichtete Mittelwerte; detaillierte statistische Auswertung, Prüfkörperabmessungen und -durchführung in Hückler [21] dokumentiert)					
mittlere Zylinderdruckfestigkeit $f_{ilcm,cyl}$ [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 ε_{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 $12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)				
* Die Querkontraktionszahl wurde für ILC800 bestimmt. Da die Querdehnung offenbar nur von der Zusammensetzung der Matrix abhängt und die ILC-Klassen ähnliche Matriceigenschaften aufweisen, kann von einer Übertragbarkeit auf ILC600 bis ILC750 ausgegangen werden [86].					
** Auch die Wärmedehnung wurde für ILC800 ermittelt; von der Übertragbarkeit auf die anderen ILC-Klassen wird zunächst ausgegangen, dies ist noch experimentell zu bestätigen.					

Tabelle 7-2 Zusammenfassung der Eigenschaften von ILC gemäß den Zusammensetzungen nach Tabelle 3-2, basierend auf [21]

wehrung wird vernachlässigt. Der Nettoquerschnitt ergibt sich aus dem Bruttoquerschnitt abzüglich der Bewehrung und stellt damit den reinen Betonquerschnitt dar. Ideelle Querschnittswerte wiederum berücksichtigen den Einfluss der Bewehrung und bilden den Verbundquerschnitt korrekt ab.

Bei Stahlbetonquerschnitten mit Normalbeton verzichtet man häufig auf die Verwendung ideeller Querschnitte und rechnet bevorzugt mit Bruttoquerschnitten, da der Einfluss der Bewehrung gering ist.

Bei Betonen wie dem Infralichtbeton hingegen, bei dem die Steifigkeit der Bewehrung deutlich höher ist als die des Betons, ist die Berücksichtigung von ideellen Querschnittswerten für z. B. Schwerpunkt, Flächenträgheits- und statisches Moment bei der Berechnung von Bedeutung. Die wichtigsten sind im Folgenden aufgeführt:

A_C : Bruttoquerschnittsfläche

A_S : Querschnittsfläche Stahlbewehrung

$$A_n = A_C - A_S; \text{ Nettoquerschnittsfläche} \quad (11)$$

$$A_i = A_C + (\alpha_s - 1) \cdot A_S; \text{ ideelle Querschnittsfläche} \quad (12)$$

$$A_{i,eff} = A_{C,eff} + (\alpha_s - 1) \cdot A_S; \text{ ideeller Wirkungsbereich der Bewehrung} \quad (13)$$

$$A_{i,ct} = A_{Ct} + (\alpha_s - 1) \cdot A_S; \quad (14)$$

ideeller Betonquerschnitt in der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung (bezogen auf eine Bauteilseite; in der Regel mit $A_{Ct} = 0,5 \cdot b \cdot h$)

$$\alpha_s = E_s / E_{ilc} \quad (15)$$

$$\Delta z_i = ((\alpha_s - 1) \cdot \sum_j A_s^j \cdot z_{cs}^j) / A_i; \quad (16)$$

Abstand zwischen Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts und Schwerpunkt des ideellen Querschnitts

$z_{c,s}$: Abstand zwischen Bewehrungsschwerpunkt und Schwerpunkt des Bruttoquerschnitts

$$I_{i,y} = I_{c,y} + A_C \Delta z_i^2 + (\alpha_s - 1) \cdot \sum_j A_s^j \cdot (z_{is}^j)^2; \quad (17)$$

Flächenträgheitsmoment des ideellen Querschnitts

$z_{i,s}$: Abstand zwischen Bewehrungsschwerpunkt und ideellem Schwerpunkt

$z_{i,max,s}$: maximaler Abstand des Betonzugrandes vom ideellen Schwerpunkt (beim Rechteckquerschnitt mit Höhe h , z. B. $z_{i,max,s} = h/2 - \Delta z_i$)

Auch das Rissmoment, das bei Normalbetonen in der Regel näherungsweise am unbewehrten Querschnitt ermittelt wird, sollte für ILC am ideellen Querschnitt berechnet werden. Gleiches gilt für die Bestimmung der Mindestbewehrung und die Berechnung von Rissbreiten. Zur Ermittlung von ideellen Querschnittswerten siehe auch Zilch/Zehetmaier [87].

7.4.4 Kriechen und Schwinden

Dem zeitabhängigen Betonverhalten in Form von Kriechen und Schwinden kommt bei Infralichtbeton 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. 7.6.4 geschildert.

Kriechzahl

Die Ermittlung der Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ erfolgt für Normalbeton in EC2 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. 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 aufgebraachte Dauerlasten in der gleichen Größenordnung liegt wie die von Normalbetonen gleicher Festigkeit. Daher darf gemäß EC2 die Kriechzahl mit η_E abgemindert werden. Der Erhöhungsfaktor η_2 berücksichtigt hingegen für Leichtbetone niedriger Festigkeitsklassen die geringere Kriechbehinderung durch die leichten Gesteinskörnungen [88].

$$\eta_E = (\rho / 2200)^2 \quad (18)$$

mit ρ : Trockenrohdichte [kg/m³]

$$\eta_2 = 1,2 \text{ für } f_{lck} \leq LC16/18 \quad (19)$$

Zum Kriechverhalten von Infraleichtbeton wurden erste Tastversuche durchgeführt und die Ergebnisse für Biegebauteile mit Berechnungen nach EC2 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 Vergleiche mit den aktuellen, experimentellen Ergebnissen deuten darauf hin, dass die Berechnung, die im Folgenden geschildert wird, für ILC konservative Werte liefert.

Im konkreten Anwendungsfall sollte dieses Vorgehen abgestimmt und je nach Erfordernis durch weitere Versuche im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) verifiziert werden.

Ermittlung der Kriechzahl [20, 31]

Kriechzahl zum Zeitpunkt t :

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \cdot \beta_C(t, t_0) \quad (20)$$

Grundkriechzahl:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \cdot \beta(f_{cm}) \cdot \beta(t_0) \quad (21)$$

Endkriechzahl für $t \rightarrow \infty$:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 \quad (22)$$

mit

$$\beta_C(t, t_0) = [(t - t_0) / (\beta_H + (t - t_0))]^{0,3} ; \quad (23)$$

Funktion des zeitlichen Verlaufs

$$\varphi_{RH} = [1 + ((1 - RH/RH_0) / 0,1 \cdot \sqrt[3]{h_0})] \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \quad (24)$$

$$\beta(f_{cm}) = 16,8 / f_{cm}^{0,5} \quad (25)$$

$$\beta(t_0) = 1 / (0,1 + t_{0,eff}^{0,2}) \quad (26)$$

$$\beta_H = 1,5 \cdot [1 + (0,012 \cdot RH)^{18}] \cdot h_0 + 250 \cdot \alpha_3 \leq 1500 \cdot \alpha_3 \quad (27)$$

$$t_{0,eff} = t_0 \cdot [9 / (2 + t_0^{1,2}) + 1]^\alpha \geq 0,5^* ; \quad (28)$$

wirksames Betonalter bei Belastungsbeginn (in Tagen)

*) Die Auswirkungen von erhöhten oder verminderten Temperaturen in einem Bereich von 0 bis 80 °C auf den Aushärtungsgrad des Betons dürfen durch die Anpassung des Betonalters $t_{0,eff}$ über $t_{0,T}$ erfolgen (vgl. EC2 Anhang B [20]).

RH: relative Feuchte der Umgebung in %

$RH_0 = 100$ % (Bezugsgröße)

$h_0 = 2 \cdot A_C / u$; wirksame Bauteildicke in mm (A_C : Querschnittsfläche; u : dem Trocknen ausgesetzter Querschnittsumfang)

f_{cm} : mittlere Betondruckfestigkeit in N/mm²

t : Betonalter in Tagen zum betrachteten Zeitpunkt

t_0 : tatsächliches Betonalter bei Belastungsbeginn (in Tagen)

$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1,0$ für $f_{cm} \leq 35$ N/mm²

$\alpha = -1$ für Zement S (slow): CEM 32,5 N

$= 0$ für Zement N (normal): CEM 32,5 R; CEM 42,5 N

$= 1$ für Zement R (rapid): CEM 42,5 R; CEM 52,5 N; CEM 52,5 R

Verbundkriechen

Zilch/Zehetmaier [87] definieren das Verbundkriechen als Kriechverformungen in der Verbundzone sowie auch in geringem Maße im zugbeanspruchten Beton aufgrund von langanhaltenden Zugbeanspruchungen. Dadurch wird die Mitwirkung des Betons auf Zug bzw. die Zugversteifung reduziert. Die zeitabhängigen Auswirkungen können vereinfacht

chend durch einen um $1/3$ verringerten Völligkeitsbeiwert β_t erfasst werden. Hieraus ergeben sich 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 von Versuchsergebnissen [89] mit Berechnungen nach ModelCode 2010 [90] zeigte ein ähnliches Verhalten von ILC.

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 [21] bestimmt (*► vgl. die Kapitel zur Verformungsberechnung 7.6.3 und Rissbreitenbestimmung 7.6.2*).

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 [20], CEB-FIP [90, 91] oder RILEM B3 (1995) [92, 93].

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 und ca. $1,5 \text{ mm/m}$ bei ILC800 lieferten. Dabei waren nach zwei Wochen bereits ca. 80 % des Schwindmaßes nach einhundert Tagen erreicht. Die Ergebnisse wurden mit Berechnungen nach verschiedenen Modellen abgeglichen. Dabei zeigte sich, dass das Modell nach EC2 die Schwindmaße der Infraleichtbetonzusammensetzungen nach Tabelle

3-2 unterschätzt. Die bislang besten Übereinstimmungen ergaben sich bei den Ansätzen des RILEM B3-Modells, jedoch unterschätzt auch dieses immer noch die experimentell ermittelten Schwindmaße.

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.

7.5 Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Infraleichtbeton ist als tragende Wärmedämmung vorrangig zum Einsatz als Gebäudehülle und damit als Wandbauteil bestimmt. Neben dem hauptsächlich vertikalen Lastabtrag kann der ILC auch Biegebeanspruchungen ausgesetzt sein, z. B. als Fenstersturz oder Balkonplatte. In diesem Abschnitt werden daher nach einer Schilderung des anzusetzenden Eigengewichts zunächst Bemessungsansätze für vertikal abtragende Wandbauteile vorgestellt, bevor Ansätze zur Biegebemessung und abschließend für Querkraft formuliert werden.

7.5.1 Lastannahmen – Eigengewicht ILC

Das anzusetzende Eigenwicht für Infraleichtbeton ergibt sich aus der Trockenrohdichte 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 [30] für Leichtbeton mit Blähton mit

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Trockenrohdichte ρ_{tr} [kg/m^3]	≤ 600	≤ 650	≤ 700	≤ 750	≤ 800
Zuschlag für Bemessungsdichte [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 stahlbewehrt [kN/m^3]	7,5	8	8,5	9	9,5

Tabelle 7-3 Eigengewicht der ILC-Klassen

$u = 0,03 \text{ kg/kg}$ anzusetzen. Dies wurde durch experimentelle Untersuchungen für ILC800 bestätigt. Bei einer Trockenrohdichte von 800 kg/m^3 würde ein Zuschlag von 24 kg/m^3 resultieren. EC2 wiederum gibt für Leichtbeton eine Bemessungsdichte vor, die um 50 kg/m^3 höher liegt als die Trockenrohdichte [20]. 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 angesetzt. Die Werte sind in Tabelle 7-3 zusammengefasst.

Beim Einsatz von GFK-Bewehrung kann z. B. entweder auf der sicheren Seite der Zuschlag für Stahlbewehrung übernommen werden oder näherungsweise eine Abminderung des Zuschlags von 1 kN/m^3 im Verhältnis der Dichten (Stahl: $7,85 \text{ g/cm}^3$; GFK: $2,2 \text{ g/cm}^3$) angesetzt werden, in der Annahme, dass gleiche Bewehrungsgehalte erforderlich werden. Letzteres ist im Einzelfall zu prüfen, da die beiden Bewehrungsarten zwar ähnliche Festigkeiten besitzen, jedoch unterschiedliche Steifigkeiten (► *vgl. Kap. 7.2.2*). Am genauesten ist natürlich eine Berechnung des Gewichts der tatsächlich eingelegten Bewehrungsmenge unter Berücksichtigung der jeweiligen Dichte.

7.5.2 Längsdruckkraft mit kleiner Ausmitte

Wandbauteile aus ILC dienen vorrangig dem vertikalen Lastabtrag. Je nach Lagerung und Lasteinleitung liegen dabei unterschiedliche Kraftflüsse und Bemessungssituationen vor.

Sind die Wände gleichmäßig vollflächig gelagert und ebenso belastet, liegt ein gleichmäßiger Kraftfluss vor (B-Bereiche). Die Bemessung kann dann für zentrische Druckkraft erfolgen.

Liegt jedoch eine ungleichmäßige Lasteinleitung vor, was in der Praxis z. B. durch außermittig aufliegende Geschossdecken oder Fensterstürze zu erwarten ist, oder verläuft die Lagerung nicht gleichmäßig, entstehen Bereiche mit konzentrierten Belastungen, die nach der Theorie der Stabwerkmodelle als statische Diskontinuitäten bezeichnet werden. Fensteraussparungen, Ecken etc. bilden wiederum geometrische Diskontinuitäten. Diese Diskontinuitätsbereiche

(D-Bereiche) müssen entsprechend bemessen und konstruktiv ausgebildet werden.

Infraleichtbetonbauwerke werden in der Regel so ausgelegt, dass die Ableitung der Vertikallasten rein über den Beton erfolgen kann und keine Druckbewehrung erforderlich wird. Daher bietet sich eine Bemessung in Anlehnung an das Vorgehen im EC2 für unbewehrte Betonwände mit Lastausmitte an [20]. Eine konstruktive Oberflächenbewehrung ist jedoch immer vorzusehen und hinsichtlich der erforderlichen Rissbreitenbegrenzung auszulegen. Ebenso sind D-Bereiche durch entsprechende Bewehrungsführung auszubilden.

Sollte der Nachweis für unbewehrte Bauteile keine ausreichende Tragfähigkeit ergeben, kann eine Bemessung in Anlehnung an die Nachweisführung für bewehrte Bauteile erfolgen. Dies kann aufgrund von außermittiger Lasteinleitung einen Nachweis für Interaktion von Normalkraft und Biegung erfordern.

Im Folgenden wird zunächst die Bemessung für unbewehrte Betonwände erläutert sowie auf die Bemessung von D-Bereichen, die Teilflächenpressung und abschließend die Interaktion von Normalkraft und Biegung kurz eingegangen.

Unbewehrte Wände unter Druckbeanspruchung

Unbewehrte Druckglieder sind nach EC2 [20] immer als schlanke Bauteile zu betrachten, wobei ein Verzicht auf eine Untersuchung am verformten System jedoch bei $\lambda \leq 8,6$ gestattet ist. Die größte zulässige Schlankheit beträgt $\lambda \leq 86$. [31]

Nach dem vereinfachten Bemessungsverfahren ergibt sich die aufnehmbare Längskraft zu:

$$N_{Rd, \lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{ilcd, pl} \cdot \phi \quad (29)$$

mit

b/h_w : Breite/ Gesamtdicke des Querschnitts

$$f_{ilcd, pl} = \alpha_{ilc, pl} \cdot f_{ilck} / \gamma_c$$

$\alpha_{ilc, pl} = 0,62$; Dauerstandbeiwert für unbewehrte Querschnitte (► *vgl. Kap. 7.1.2*)

$$\phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{\text{tot}}/h_w) - 0,02 \cdot l_0/h_w \quad (30)$$

$$e_{\text{tot}} = e_0 + e_i + e_2; e_{\text{tot}}/h \leq 0,4$$

(Die Kriechausmitte e_2 darf gemäß EC2 [20] im Allgemeinen vernachlässigt werden. Da das Kriechen bei ILC jedoch von Bedeutung ist, wird vorgeschlagen, e_2 zu berücksichtigen. Gemäß der Berechnung nach EC2 [20] wird jedoch erst ab einer Schlankheit von $\lambda \geq 25$ die Kriechausmitte $e_2 \geq 0$.)

Diskontinuitätsbereiche (D-Bereiche)

D-Bereiche können wie oben erwähnt durch Aussparungen oder konzentrierte Lasteinleitungen entstehen. Insbesondere die häufig anzutreffende konzentrierte Lasteinleitung durch außermittig aufliegende Geschossdecken ist zu berücksichtigen. Solche Diskontinuitätsbereiche können anhand der Theorie der Stabwerkmodelle (siehe Schlaich/Schäfer [78]) bemessen und konstruktiv durchgebildet werden.

Stabwerkmodelle bestehen aus Betondruckstreben und Zugstreben (Bewehrung), die in Knoten zusammengeführt werden. Zug-, Druckstreben und Knoten sind separat im Grenzzustand der Tragfähigkeit nachzuweisen. Die Anwendung von Stabwerkmodellen für Leichtbetone ist im EC2 verankert [20]. Jedoch wird eine Modifikation vorgesehen, da Leichtbetone prinzipiell stärker zur Spaltrissbildung neigen als Normalbetone [7]. Dementsprechend wird der Bemessungswert der Druckstrebenfestigkeit über den Faktor $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \rho / 2200$ (mit ρ : Trockenrohdichte) reduziert, analog zum Vorgehen bei der Querkraftbemessung (► *vgl. Kap. 7.5.4*), um den größeren Einfluss der Querkzugspannungen aufgrund der vergleichsweise geringeren Zugfestigkeit des Leichtbetons zu berücksichtigen. Gleiches gilt auch für die Druckspannungen in den Knoten, wobei neben der höheren Spaltrissgefahr auch die geringere aufnehmbare Teilflächenpressung (s. u.) durch die Abminderung berücksichtigt wird [7].

Grundsätzlich ist eine Abbildung von D-Bereichen nach der Methode der Stabwerkmodelle auch bei ILC-Wandbauteilen möglich. Dies zeigten auch erste theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Anwendung von Stabwerkmodellen bei wandartigen Trägern aus ILC [94]. Welche Bemessungsdruckfestigkeiten für Druckstreben und Knoten bei

Infraleichtbeton anzusetzen sind wird noch untersucht. Es kann aber festgehalten werden, dass Diskontinuitätsbereiche bei ILC-Bauteilen, insbesondere im Hinblick auf Knotenpunkte und die Aufnahme von Querkzugspannungen durch Bewehrung, entsprechend konstruktiv durchgebildet werden müssen. Die Theorie der Stabwerkmodelle ist hierfür ein sehr anschauliches Hilfsmittel.

Teilflächenpressung

Wird ein Betonkörper nur auf einer Teilfläche belastet, erfährt der Beton unterhalb der Belastung eine Stauchung in Belastungsrichtung sowie Querdehnungen. Letztere werden jedoch durch den umgebenden Beton behindert (Umschnürung), wodurch sich ein dreiachsiger Spannungszustand einstellt, der die aufnehmbare Teilflächenpressung im Vergleich zur einachsigen Druckfestigkeit steigert. Wesentliche Einflussfaktoren für diesen Effekt sind der Wirksamkeitsfaktor k der Umschnürung sowie die Betonzugfestigkeit.

Für die Ermittlung der aufnehmbaren Teilflächenlast sieht der EC2 für Leichtbetone eine Abminderung gegenüber Normalbeton vor, die die Trockenrohdichte einbezieht [20]. Dies dient der Berücksichtigung der geringeren Zugfestigkeit sowie der geringeren Umschnürungswirkung, die wiederum von der Steifigkeit der leichten Gesteinskörnung und damit von der Trockenrohdichte abhängt [7].

Im Hinblick auf die hohe Porosität und die geringe Festigkeit von Infraleichtbeton wird unterstellt, dass eine Erhöhung der aufnehmbaren Teilflächenlast bei ILC nur in geringem Maße stattfindet. Die rechnerische Abminderung gemäß EC2 wäre aufgrund der geringen Rohdichte erheblich. Die Umschnürungswirkung kann aufgrund der geringen Steifigkeit der durchgängig leichten Gesteinskörnung (Leichtsand statt Natursand) als sehr gering angenommen werden [7].

Da bislang noch keine experimentellen Ergebnisse zur Teilflächenpressung von ILC vorliegen, wird vorgeschlagen, für ILC auf eine Erhöhung der aufnehmbaren Teilflächenlast gegenüber der einachsialen Druckfestigkeit zu verzichten.

Überwiegend auf Normalkraft beanspruchte, bewehrte Biegebauteile

Sollte der Tragfähigkeitsnachweis für unbewehrte Bauteile ergeben, dass eine Bewehrung erforderlich wird, kann eine Bemessung analog zur Nachweisführung für bewehrte Bauteile erfolgen. Aufgrund von außermittig aufliegenden Geschossdecken wird häufig neben der vorrangigen Normalkraftbelastung auch Biegung erzeugt, sodass ein Interaktionsnachweis gefordert ist. Eine Knickgefahr wird in der Regel aufgrund der Wanddicken von ≥ 50 cm und der einhergehenden geringen Schlankheit nicht gegeben sein, dies ist jeweils im Einzelfall zu überprüfen.

Zur Bemessung von überwiegend auf Normalkraft beanspruchten, bewehrten Biegebauteilen ohne Knickgefahr werden meistens Interaktionsdiagramme verwendet. Diese sind abhängig vom Randabstand der Bewehrung, aber auch von materialspezifischen Eigenschaften wie der Spannungs-Dehnungs-Linie bzw. der Bruchdehnung.

Für Infraleichtbeton liegen keine Diagramme oder experimentelle Erkenntnisse zur Interaktion vor. Faust [7] stellt Interaktionsdiagramme für Leichtbetone zur Verfügung, für die er eine bilineare Spannungs-Dehnungs-Linie verwendet und die je nach Trockenrohdichte und Randabständen variieren. Da Infraleichtbeton eine lineare Spannungs-Dehnungs-Linie besitzt und die Diagramme nach Faust nicht für Trockenrohdichten $< 800 \text{ kg/m}^3$ vorliegen, sind die Interaktionsdiagramme von Faust für ILC nicht aussagekräftig und können, wenn überhaupt, nur als grobe Näherung verwendet werden. Für ein im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) vorzulegendes Bemessungskonzept können die den Diagrammen zugrunde liegenden Gleichungen (siehe z. B. Zilch/Zehetmaier [87]) für ILC angepasst werden. Dies sollte durch experimentelle Untersuchungen bestätigt werden.

Gleiches gilt auch bei schlanken Bauteilen mit Knickgefahr. Hier kann für Leichtbetone gemäß Faust [7] das Modellstützenverfahren herangezogen werden. Für Infraleichtbeton liegen keine diesbezüglichen Kenntnisse vor. Schlanke, auf Normalkraft beanspruchte Bauteile aus ILC würden jedoch ohnehin nicht einer werkstoffgerechten Verwendung entsprechen und sollten vermieden werden.

7.5.3 Überwiegende Biegung mit Normalkraft

Durch die Untersuchungen zum Biegetragverhalten von ILC-Bauteilen durch Hückler [21] konnten in Hinblick auf eine Biegebemessung Aussagen über die Tragfähigkeit, Verformung und Duktilität getroffen werden.

Eine Bemessung nach EC2 im Grenzzustand der Tragfähigkeit von Biegebalken erfolgt lediglich durch eine Begrenzung der Dehnungsverteilung, also Stauchungsgrenze des Betons und Dehnungsgrenze der Bewehrung. Als Bemessungshilfe existiert beispielsweise das allgemeine Bemessungsdiagramm bzw. in numerischer Form dimensionslose Bemessungstabellen (ω -Tabellen). Für die Bemessungshilfen gelten für Normalbeton und Leichtbeton die gleichen Voraussetzungen und Annahmen:

- Es liegt ein linearer Dehnungsverlauf über den Querschnitt vor (Bernoulli-Hypothese),
- die Bemessung erfolgt im Riss, sodass die Betonzugfestigkeit unberücksichtigt bleibt und auftretende Zugkräfte von der Bewehrung aufgenommen werden,
- zwischen Bewehrung und Beton herrscht ein starrer Verbund, sodass Betonschlupf ausgeschlossen werden kann,
- die Stoffgesetze der Materialien werden durch idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linien beschrieben,
- es herrscht stets Kräftegleichgewicht.

Diese Nachweisform ist grundsätzlich auch für ILC anwendbar. Folgende Anpassungen sind aber nötig:

- Durch das linearelastische und spröde Materialverhalten bei Druckbeanspruchung wird in der Biegedruckzone eines ILC-Balkens anstelle einer Parabel-Rechteck-Verteilung der Druckspannungen eine Dreiecksverteilung angenommen. Somit ergibt sich der Völligkeitsbeiwert zu $\alpha_R = 0,5 \cdot \epsilon_c / \epsilon_{ilc1}$, der Höhenbeiwert zu $k_a = 1/3$, wodurch sich die Lage der Betondruckkraft bei $a = 1/3 \cdot x$ befindet.
- Die Ausnutzung der Grenzzustände der Randdehnungen erfolgt für eine Stahlbewehrung mit $\epsilon_{s1} = 25$ ‰, für GFK-Bewehrung mit $\epsilon_{fud} = 7,4$ ‰ und für ILC mit $\epsilon_{c2} = \epsilon_{ilc1}$ in Abhängigkeit der ILC-Zusammensetzung nach Tabelle 7-2.

Daraus ergibt sich das folgende Bemessungsdiagramm für Stahl- und GFK-Bewehrung, aus dem für das bezogene Moment

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{M_{\text{Eds}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{ilcd}}} = \alpha_R \cdot \xi \cdot (1 - k_a \cdot \xi) \quad (31)$$

der bezogene innere Hebelarm $\xi = z/d$ abgelesen werden kann. Hieraus errechnet sich der erforderliche Bewehrungsquerschnitt zu

$$A_{\text{s1},f1} = \frac{1}{\sigma_{\text{s1},f1}} \cdot \left(\frac{M_{\text{Eds}}}{z = \xi \cdot d} \right) \quad (32)$$

Zur einfacheren Handhabung wurden ω -Tabellen erstellt, die im Anhang zu finden sind. Hieraus ergibt sich die erforderliche Bewehrung zu

$$A_{\text{s1},f1} = \frac{1}{\sigma_{\text{s1},f1}} (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{\text{ilcd}}) \quad (33)$$

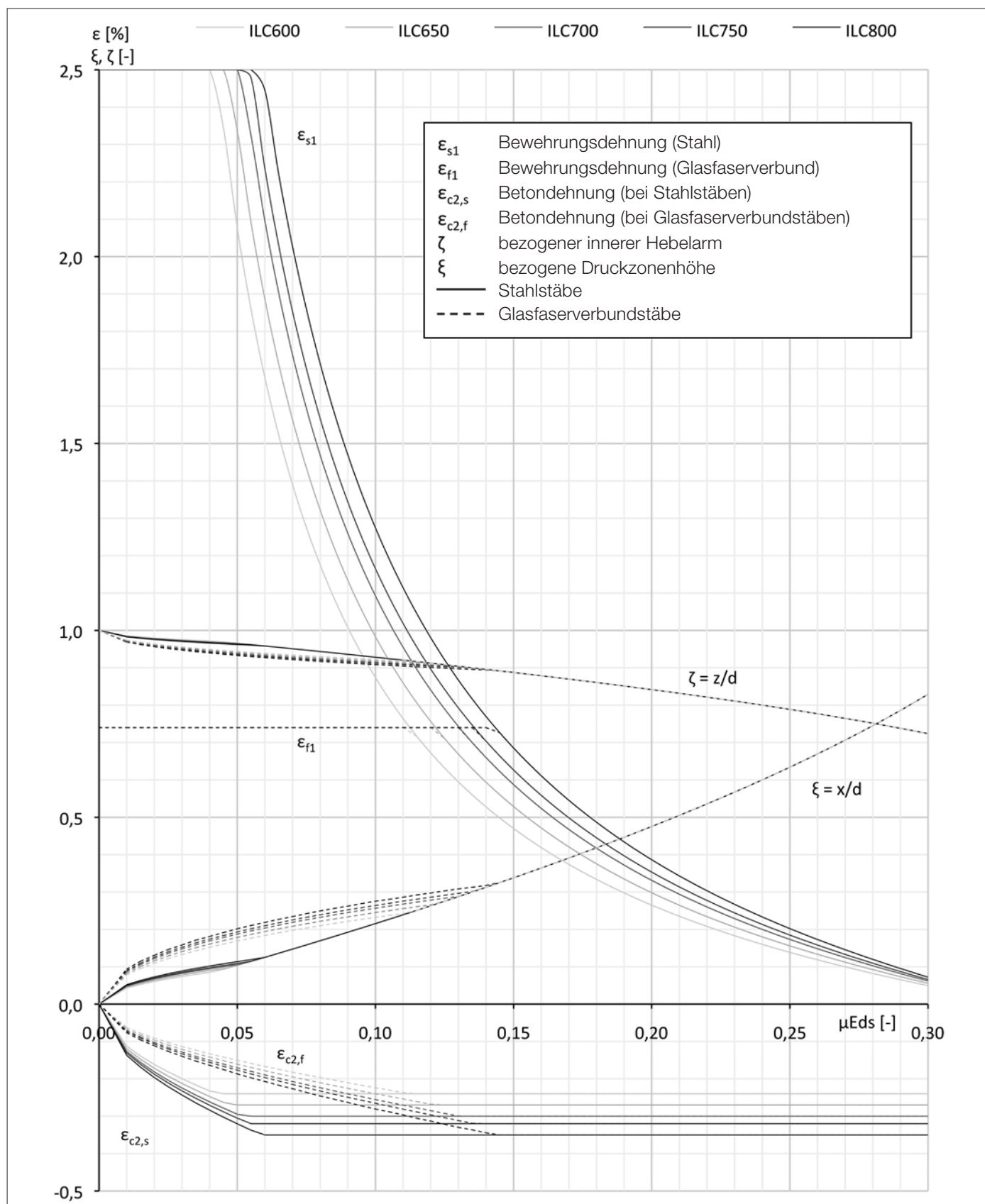


Bild 7-5 Allgemeines Bemessungsdiagramm für ILC-Balken (Quelle: Hückler [22])

7.5.4 Querkraft und Torsion

Das Verhalten von ILC bei Querkraft und Torsion ist noch nicht explizit untersucht. Solange keine Erkenntnisse vorliegen, wird vorgeschlagen auf Faust [7] bzw. die geltenden Regelungen des EC2 zurückzugreifen.

Querkraft

Stahlbewehrung

Bei der Querkraftbemessung wird gemäß Faust [7] der Faktor $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \rho / 2200$ (mit ρ : Trockenrohdichte) zur Berücksichtigung der verringerten Zugfestigkeit des Leichtbetons genutzt [7]. Dies entspricht dem Vorgehen der DIN 1045-1 (2008) sowie des EC2, wie z. B. in der Formel für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung zu sehen:

Querkraftwiderstand $V_{IRd,c}$ für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung (Stahl-Bewehrung; vgl. [20]):

$$V_{IRd,c} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \cdot \eta_1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ilck})^{\frac{1}{3}} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \geq (\eta_1 \cdot v_{l,min} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b_w \cdot d \quad (34)$$

Sowohl für Bauteile ohne als auch mit Querkraftbewehrung können daher die Regelungen des EC2 für Leichtbeton gemäß Kapitel 11 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang [85] einen Ansatz für die Querkraftbemessung von ILC bilden. Dies bestätigten auch Versuche, die an ILC-Biegebalen im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall für das Projekt »Betonoase« (► vgl. Kap. 9.2) an der TU Berlin durchgeführt wurden.

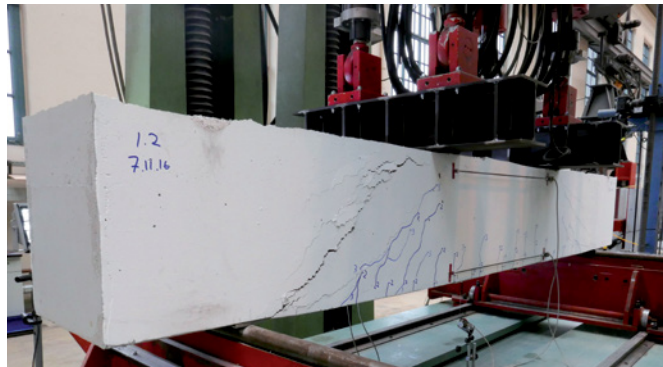


Bild 7-6 Balkenversuch für Zustimmung im Einzelfall (ZiE) »Betonoase« (Foto: Alexander Hückler)

GFK-Bewehrung (glasfaserverstärkter Kunststoff)

Bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung sind die Regelungen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen zu beachten. Im Rahmen eines Tastversuches an einem Balkenelement aus Infraleichtbeton für das Projekt INBIG [27] wurde der Querkraftwiderstand $V_{IRd,c}$ für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung gemäß einer Produktzulassung [80] bestimmt. Zusätzlich wurde die Formel in Anlehnung an Faust noch mit dem Faktor $\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \rho / 2200$ zur Berücksichtigung der verringerten Zugfestigkeit des Leichtbetons multipliziert.

Querkraftwiderstand $V_{IRd,c}$ für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung (GFK-Bewehrung; vgl. [80]):

$$V_{IRd,ct} = \frac{0,138}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot E_f / E_s \cdot f_{ilck})^{\frac{1}{3}} \cdot b_w \cdot d \cdot \eta_1 \quad (35)$$

Die experimentellen Ergebnisse des Tastversuchs deuten darauf hin, dass dieser angepasste Berechnungsansatz realitätsnahe Werte liefert [27].

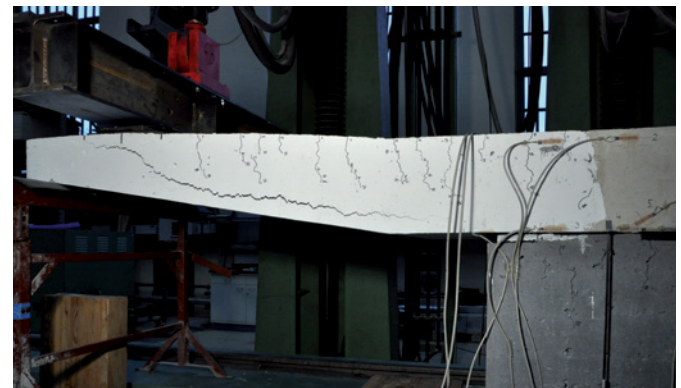


Bild 7-7 Tastversuch an ILC-Balkonplatte mit GFK-Bewehrung

Torsion

Faust schildert für die Torsionsbemessung das Vorgehen der DIN 1045-1 für Leichtbeton, die eine Abminderung der Druckstrebenfestigkeit in Abhängigkeit der Rohdichte über den Faktor η_1 vorsieht [7]. Analog hierzu können die aktuellen Regelungen des EC2 (Abschnitte 11.6.3 in Verbindung mit 6.3), die ebenfalls über η_1 die verminderten Festigkeiten berücksichtigen, eine erste Orientierung für ILC bilden.

7.6 Bemessung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

7.6.1 Begrenzung der Spannungen

Die Betondruckspannungen werden gemäß EC2 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 [11] 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

$$\sigma_c \leq 0,45 \cdot f_{ilck} \quad (36)$$

gemäß EC2 für ILC zu übernehmen.

7.6.2 Rissbreitenbegrenzung und Mindestbewehrung

Anforderung

Die Begrenzung der Rissbreite dient dazu, die Einhaltung der Anforderungen an eine ordnungsgemäße Nutzung des Tragwerks, das Erscheinungsbild und die Dauerhaftigkeit sicherzustellen. Der EC2 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 Beregung 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 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 [21] durchgeführten Stabzug- und Balkenversuche mit Infraleichtbeton zeigten ein günstiges Rissverhalten, gekennzeichnet durch gleichmäßige Rissverteilung mit geringen Rissabständen und -breiten. Die Berechnungsmethoden gemäß EC2 zur Bestimmung der Rissbreite liefern realitätsnahe, leicht konservative Ergebnisse und können somit angewendet werden. Die Berechnung der Rissbreite w_k erfolgt allgemein für alle Rissbildungsstadien gemäß folgender Gleichung:

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) \quad (37)$$

mit

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \rho_{i,eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}} \quad (38)$$

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{\sigma_s}{E_s} - \beta_t \cdot \frac{f_{ct,eff}}{E_s \cdot \rho_{i,eff}} \cdot (1 + \alpha_s \cdot \rho_s) \geq \frac{0,6 \cdot \sigma_s}{E_s} \quad (39)$$

für Stahlbewehrung; für GFK-Bewehrung siehe [80].

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 ideelle Querschnittswerte zu berücksichtigen (►vgl. Kap. 7.4.3).

$$\text{Mit } \rho_{i,\text{eff}} = \frac{A_s}{A_{i,\text{eff}}} ; \quad (40)$$

Bewehrungsgrad bezogen auf den ideellen Wirkungsbereich der Bewehrung.

Der Faktor β_t wurde durch Hückler [21] für kurzfristige Lasteinwirkung zu $0,8 > \beta_t > 0$ (Stahl) bzw. 0,8 (GFK) bestimmt:

Kurzfristige Belastungen:

$$\text{Stahlbewehrung: } \beta_t = 0,8 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s - \sigma_{sr;0,95}}{f_y - \sigma_{sr;0,95}} \right) \quad (41)$$

GFK-Bewehrung: $\beta_t = 0,8$ (konstant)

Für langandauernde und wiederholte Belastungen wird vorgeschlagen, die Reduktion des Völligkeitsbeiwerts um ein Drittel zu übernehmen (► *vgl. Kap. 7.4.4*). Zudem wird die Gleichung für Stahlbewehrung konservativ mit $0 \leq \beta_t \leq 0,5$ erweitert, sodass der Bereich zwischen Erstrissbildung und abgeschlossenem Rissbild ($\sigma_{sr} \leq \sigma_s \leq \sigma_{sr;0,95}$) mit konstant $\beta_t = 0,5$ abgedeckt wird.

Langandauernde/Wiederholte Belastungen:

$$\text{Stahlbewehrung: } \beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s - \sigma_{sr;0,95}}{f_y - \sigma_{sr;0,95}} \right); \quad 0 \leq \beta_t \leq 0,5 \quad (42)$$

mit

$$\sigma_{sr;0,95} = f_{ilct;0,95} \cdot A_{i,\text{eff}} / A_s = 1,3 \cdot f_{ilctm} \cdot A_{i,\text{eff}} / A_s$$

$$A_{i,\text{eff}} = A_{c,\text{eff}} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s; \text{ ideeller Wirkungsbereich der Bewehrung}$$

A_s : Querschnittsfläche Stahlbewehrung

GFK-Bewehrung: $\beta_t = 0,5$ (konstant)

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 [31].

Für Infrleichtbetonbauteile liegen bislang noch wenig praktische Erfahrungen im Hinblick auf Rissbildung aus Zwangseinwirkungen wie z. B. Schwinden vor. Beim Einfamilienhaus in Berlin aus dem Jahr 2007 (► *vgl. Kap. 9.1*) 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 [1].

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, wenn auch unwirtschaftlichen Seite wird daher vorgeschlagen, für ILC die Risschnittgröße als Grundlage der Bestimmung der Mindestbewehrung unter Berücksichtigung der Rissbreitenbegrenzung anzusetzen.

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 [95] beschäftigt sich mit dieser Thematik für Normalbetonwände. Der Aufbau der Zwangskraft ist demnach deutlich vom Verhältnis Wandlänge l zu Wandhöhe h abhängig [95]. 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 [95] zu identifizieren, bei denen eine Reduzierung der Mindestbewehrung möglich ist. Dies sollte durch experimentelle Untersuchungen verifiziert werden.

Da Infrleichtbetonwände mit relativ großen Wanddicken einhergehen, empfiehlt es sich, bei zentrischem Zwang die Mindestbewehrung unter Berücksichtigung einer effektiven Randzone zu ermitteln.

Zentrischer Zwang bei dickeren Bauteilen (vgl. EC2 Nationaler Anhang [85])

$$A_{s,min} = f_{ct,eff} \cdot A_{i,eff} / \sigma_s \geq k \cdot f_{ct,eff} \cdot A_{i,ct} / f_{yk} \quad (43)$$

mit

$A_{i,eff} = A_{c,eff} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s$; ideeller Wirkungsbereich der Bewehrung

$A_{c,eff} = h_{eff} \cdot b$; Wirkungsbereich der Bewehrung (vgl. [31])

$A_{i,ct}$: ideeller Betonquerschnitt in der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung (bezogen auf eine Bauteilseite; in der Regel mit $A_{ct} = 0,5 \cdot b \cdot h$)

k : Faktor zur Berücksichtigung einer nichtlinearen Spannungsverteilung; vgl. [31]

$f_{ct,eff}$: Zugfestigkeit des Betons beim Auftreten der Risse

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. Beim Nachweis der Mindestbewehrung für biegebeanspruchte ILC-Bauteile ist analog der ideelle Betonquerschnitt in der Zugzone unmittelbar vor Rissbildung ($A_{i,ct}$) zu berücksichtigen.

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 [31].

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 bzw. Kap. 8.4).

7.6.3 Begrenzung der Verformungen

Stauchung von vorwiegend druckbelasteten Bauteilen

Anforderung

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, dass »die Verformung eines Bauteils oder eines Tragwerks weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild des Bauteils beeinträchtigen dürfen« [20]. Grenzwerte sind in Abhängigkeit der Art des Tragwerks, des Ausbaus usw. festzulegen. Für vertikale Wandbauteile bietet EC2 keine Empfehlung für Grenzwerte an. ISO 4356, auf der die Angaben zur Durchbiegung des EC2 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 [96]. Werden zu große Verformungen erwartet, sind diese durch Überhöhungen zu kompensieren.

Berechnung

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:

$$\varepsilon_{ilc} = \varepsilon_s \quad (44)$$

Darauf basierend ergibt sich die Aufteilung der Last N auf Beton und Stahlbewehrung gemäß Zilch/Zehetmaier [87] zu

$$F_{ilc} = \varepsilon_{ilc} \cdot E_{ilc} \cdot A_n = N \cdot \frac{A_n}{A_i} \quad (45)$$

$$F_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_s = N \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_s}{A_i} \quad (46)$$

beziehungsweise die Stauchung des Betons zu

$$\varepsilon_{ilc} = \frac{N}{E_{ilc} A_i} \quad (47)$$

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 ► *vgl. Kap. 7.7*; insbesondere entfällt hier der Bewehrungsanteil, da GFK nicht als Druckbewehrung angesetzt werden darf).

Die Einflüsse von Kriechen und Schwinden sind zu beachten (► *vgl. Kap. 7.6.4*).

Durchbiegungen

Eine Begrenzung der Durchbiegung von Biegebauteilen kann gemäß EC2 über das vereinfachte Verfahren der Begrenzung der Biegeschlankheit oder über eine direkte Berechnung erfolgen. Faust schlägt eine Adaption des Verfahrens über Biegeschlankheit für Leichtbetone in Abhängigkeit der Verhältnisse der E-Moduln vor [7]. Um realitätsnähere Ergebnisse zu erzielen, empfiehlt sich für Infraleichtbeton

jedoch das genauere Verfahren mittels direkter Berechnung der Durchbiegung.

Zilch/Zehetmaier [87] nennt hierfür zwei Vorgehensweisen:

- die Berechnung der $M-\kappa_m$ -Linie (wirksame $M-\kappa$ -Linie), die die mittleren Krümmungen unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug (Zugversteifung) ermittelt,

$$\kappa_m^{\text{II}} = \frac{\varepsilon_{sm}^{\text{II}}}{d - x_m^{\text{II}}} = \frac{M}{EI_m^{\text{II}}} \quad (48)$$

und anschließende Integration zur Ermittlung der Durchbiegungen:

$$-w'' = \kappa_m^{\text{II}} \quad (49)$$

mit

κ_m^{II} : mittlere Krümmung im Zustand II inkl. Zugversteifung

$\varepsilon_{sm}^{\text{II}}$: mittlere Stahldehnung im Zustand II

d : statische Nutzhöhe

x_m^{II} : mittlere Druckzonenhöhe im Zustand II

EI_m^{II} : wirksame Biegesteifigkeit des gerissenen Querschnitts im Zustand II

$-w''$: zweifache Ableitung der Durchbiegung w

Bei bekannter $M-\kappa_m$ -Beziehung kann die punktuelle Verformungsberechnung mithilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte erfolgen, wobei sich zur numerischen Integration z. B. die Trapez- oder Simpsonregel eignet [87].

- die vereinfachte Berechnung, die sich auch im EC2 findet, bei dem zunächst die Grenzwerte der Krümmungen für den ungerissenen (κ_I) und gerissenen Zustand (κ_{II}) ermittelt werden, um anschließend die zu erwartenden mittleren Krümmungen κ_m über Verteilungsbeiwerte ζ zu interpolieren:

$$\kappa_m = \zeta \cdot \kappa_{II} + (1 - \zeta) \cdot \kappa_I \quad (50)$$

Für die Berechnung des Verteilungsbeiwerts liegen verschiedene Ansätze vor.

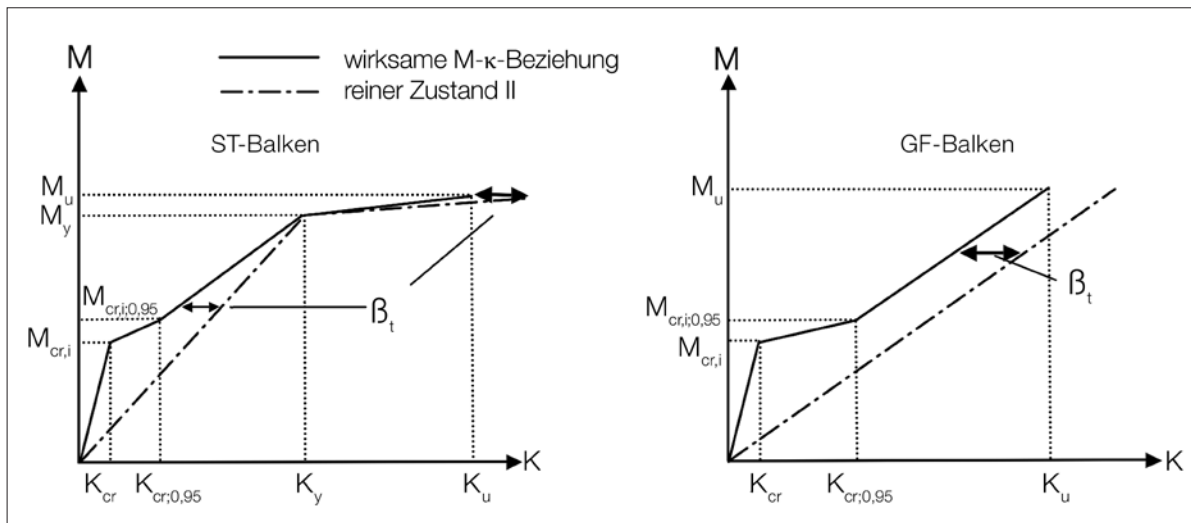


Bild 7-8 Wirksame M-κ-Linie für bewehrte, biegebeanspruchte ILC-Bauteile mit Stahlbewehrung (ST) und Glasfaserbewehrung (GF) [21]

Verformungsmodell (wirksame M-κ-Linie) Infraleichtbeton

In Hückler [21] wurde zur Ermittlung der Verformung von Infraleichtbeton-Biegebauteilen die M-κ_m-Linie direkt unter Berücksichtigung der Zugversteifung β_t bestimmt, da noch nicht erforscht ist, ob bzw. welche Verteilungsbeiwerte im Rahmen vereinfachter Verfahren für Infraleichtbeton anzusetzen wären. Die direkte Bestimmung der M-κ_m-Linie und anschließende Ermittlung der Durchbiegung über die Krümmung ist daher für ILC zu bevorzugen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die wirksamen M-κ-Linien von biegebeanspruchten ILC-Balken mit Stahlbewehrung (ST-Balken) und Glasfaserbewehrung (GF-Balken).

Die Parameter zur Beschreibung des in Bild 7-8 gezeigten Verformungsmodells können den folgenden Tabellen entnommen werden.

Stahlbewehrte Balken (ST-Balken)	
κ_s	M_s
$\kappa_0 = 0$	$M_0 = 0$
$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr,i}}{E I_{i,s}}$	$M_{cr,i} = f_{ctm} \cdot \frac{l_{i,s}}{z_{i,max,s}}$
$\kappa_{cr;0,95} = \frac{M_{cr,i;0,95}}{E I_{i,s}^{ }} - \beta_t \left(\frac{M_{cr,i}}{E I_{i,s}^{ }} - \kappa_{cr} \right)$	$M_{cr,i;0,95} = f_{ct;0,95} \frac{l_{i,s}}{z_{i,max,s}} = 1,3 \cdot M_{cr,i}$
$\kappa_y = \frac{M_y}{E I_{i,s}^{ }}$	$M_y = f_{yd} \cdot A_s \cdot z_s$
$\kappa_u = \frac{M_u}{E I_{i,s}^{ }} - \beta_t \left(\frac{M_{cr,i}}{E I_{i,s}^{ }} - \kappa_{cr} \right)$	$M_u = -\alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{ilcd} \cdot (d - k_a \cdot x)$

Tabelle 7-4 Parameter zur Beschreibung des Verformungsmodells (wirksame M- κ -Linie) für ILC-Balken mit Stahlbewehrung nach Hückler [21]

Glasfaserbewehrte Balken	
κ_f	M_f
$\kappa_0 = 0$	$M_0 = 0$
$\kappa_{cr} = \frac{M_{cr,i}}{E I_{i,f}}$	$M_{cr,i} = f_{ilctm} \cdot \frac{l_{i,f}}{z_{i,max,f}}$
$\kappa_{cr;0,95} = \frac{M_{cr,i;0,95}}{E I_{i,f}^{ }} - \beta_t \left(\frac{M_{cr,i}}{E I_{i,f}^{ }} - \kappa_{cr} \right)$	$M_{cr,i;0,95} = f_{ilct;0,95} \frac{l_{i,f}}{z_{i,max,f}} = 1,3 \cdot M_{cr,i}$
$\kappa_u = \frac{M_u}{E I_{i,f}^{ }} - \beta_t \left(\frac{M_{cr,i}}{E I_{i,f}^{ }} - \kappa_{cr} \right)$	$M_u = -\alpha_R \cdot x \cdot b \cdot f_{ilcd} \cdot (d - k_a \cdot x)$

Tabelle 7-5 Parameter zur Beschreibung des Verformungsmodells (wirksame M- κ -Linie) für ILC-Balken mit Glasfaserbewehrung nach Hückler [21]

Erläuterungen:

Indizes 0/cr/cr;0,95/y/u: unbelastet / bei Rissbildung / Ende der Rissbildungsphase (95 %-Quantil) / Fließgrenze Bewehrungsstahl / Bruchzustand

Indizes s/f: Stahlbewehrung/Glasfaserbewehrung

$M_{cr,i}$: Rissmoment des ideellen Querschnitts

f_{ilctm} : mittlere Betonzugfestigkeit

$I_{i,s}$ bzw. $I_{i,f}$: ideelles Flächenträgheitsmoment mit Stahlbewehrung bzw. Glasfaserbewehrung (► vgl. Kap. 7.4.3)

$z_{i,max,s}$ bzw. $z_{i,max,f}$: maximaler Abstand des Betonzugrandes vom ideellen Schwerpunkt (beim Rechteckquerschnitt mit Höhe h z. B. $z_{i,max,s} = h/2 - \Delta z_i$, ► vgl. Kap. 7.4.3)

$M_{cr,i;0,95}$: Moment am Ende der Rissbildungsphase (95 %-Quantil)

$f_{ilct;0,95}$: 95 %-Quantil der Betonzugfestigkeit ($f_{ilct;0,95} = 1,3 \cdot f_{ilctm}$ gemäß EC2)

$I_s^{||}$ bzw. $I_f^{||}$: Flächenträgheitsmoment des gerissenen Querschnitts; z. B. für einen einfach bewehrten, biegebeanspruchten Rechteckquerschnitt (Stahl)

$$I_s^{\parallel} = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot z_s \cdot (d - x) ; \quad (51)$$

Trägheitsmoment des gerissenen, einfach bewehrten Querschnitts [87]

β_t : Völligkeitsbeiwert

z_s : innerer Hebelarm

d : statische Nutzhöhe

x : Druckzonenhöhe

$\alpha_R = 0,5 \cdot \varepsilon_c / \varepsilon_{ilcu}$, Völligkeitsbeiwert (► *vgl. Kap. 7.5.3*)

$k_a = 1/3$; Höhenbeiwert

Mitwirkung des Betons aus Zug (Zugversteifung) über Völligkeitsbeiwert β_t

Dabei geht die Zugversteifung über den Völligkeitsbeiwert β_t ein (► *vgl. Bild 7-8*). Dieser kann aufgrund der experimentellen Ergebnisse aus Hückler [21] für kurzfristige Belastungen wie folgt angesetzt werden:

Kurzfristige Belastungen:

GFK-Bewehrung: $\beta_t = 0,8$ (konstant)

$$\text{Stahlbewehrung: } \beta_t = 0,8 \cdot \left(1 - \frac{M - 1,3 \cdot M_{cr,i}}{M_y - 1,3 \cdot M_{cr,i}} \right) \quad (52)$$

mit $M_{cr,i}$ und M_y Tabelle 7-4.

Für langandauernde und wiederholte Belastungen wird vorgeschlagen, die Reduktion des Völligkeitsbeiwerts um 1/3 zu übernehmen (► *vgl. Kap. 7.4.4*). Zudem wird die Gleichung für Stahlbewehrung konservativ mit $0 \leq \beta_t \leq 0,5$ erweitert, so dass der Bereich zwischen Erstrissbildung und abgeschlossenem Rissbild ($M_{cr,i} \leq M \leq M_{cr,i;0,95} = 1,3 \cdot M_{cr,i}$) mit konstant $\beta_t = 0,5$ abgedeckt wird.

Langandauernde/wiederholte Belastungen:

GFK-Bewehrung: $\beta_t = 0,5$ (konstant)

$$\text{Stahlbewehrung: } \beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{M - 1,3 \cdot M_{cr,i}}{M_y - 1,3 \cdot M_{cr,i}} \right); 0 \leq \beta_t \leq 0,5 \quad (53)$$

Nachdem die Krümmung über die wirksame M- κ -Linie bestimmt wurde, kann anschließend die Durchbiegung in Abhängigkeit vom statischen System über einen k-Wert [97] berechnet werden, beispielsweise für einen Träger auf zwei Stützen mit Gleichlast über $k = 5/48$ mit

$$w = k \cdot \left(\frac{M}{EI} - \beta_t \cdot \left(\frac{M_{cr,i}}{EI} - \frac{M_{cr,i}}{EI_i} \right) \right) \cdot l_{eff}^2 \quad (54)$$

Weitergehende Informationen zum Verformungsmodell sind in Hückler [21] zu finden.

Die Einflüsse von Kriechen und Schwinden auf die Durchbiegung sind für Infraleichtbeton wesentlich und daher zu berücksichtigen (► *vgl. Kap. 7.6.4*).

► *Zur Verformungsberechnung mit GFK-Bewehrung siehe auch Kapitel 7.7.*

7.6.4 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 [20] grundsätzlich durch eine Modifikation des E-Moduls E_{ilcm} über die Kriechzahl $\varphi(t, t_0)$ (► *vgl. Kap. 7.4.4*) erfasst. Der sogenannte effektive E-Modul $E_{eff,ilc}$ zum Zeitpunkt t ergibt sich zu:

$$E_{eff,ilc}(t, t_0) = \frac{E_{ilcm}}{1 + \varphi(t, t_0)} \quad (55)$$

Der effektive E-Modul 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 (gesamte spannungsinduzierte Dehnung als Summe aus elastischer Dehnung und Kriechdehnung zum Zeitpunkt t) kann der effektive E-Modul gemäß Zilch/Zehetmaier [87] wie folgt herangezogen werden:

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{N}{E_{ilc, eff} \cdot A_n + E_s \cdot A_s} = \frac{N}{E_{ilc, eff} \cdot A_{i, eff}} \quad (56)$$

mit

N : einwirkende Normalkraft

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

Die Angaben gelten analog für GFK-Bewehrung anstatt Stahlbewehrung (Indizes f statt s).

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 eines Bauteils unter Berücksichtigung des effektiven E-Moduls erfolgt gemäß Zilch/Zehetmaier [87] über:

$$\Delta \varepsilon_{s, s} = \frac{\Delta F_{s, s}}{E_s \cdot A_s} = \varepsilon_{ilcs} \cdot \frac{A_n}{A_{i, eff}} \quad (57)$$

mit

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

$A_n = A_c - A_s$ (Nettoquerschnittsfläche)

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

ε_{ilcs} : Schwindmaß

Zur Berechnung der Durchbiegung durch Schwinden kann die Ersatznormalkraft

$$N_{cs} = \varepsilon_{ilcs} \cdot E_s \cdot A_s \quad (58)$$

bzw. das entstehende Moment

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot z_{i, s} \quad (59)$$

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 vgl. Kapitel 7.6.2.*

7.7 Besonderheiten bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung

Für die Bemessung der GFK-Bewehrung stehen die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) [80] sowie das Bemessungskonzept [24] des verwendeten Produktes zur Verfügung. Letzteres ist jedoch nur gültig für Betone der Klasse C20/25 und höher. Im Folgenden werden einige Punkte kurz erläutert, die es im Zusammenhang mit Infraleichtbeton zu beachten gilt. Darüber hinaus gelten die o. g. Vorschriften.

Dauerzugfestigkeit und Grenzdehnung

Für Betone niedrigerer Festigkeitsklassen ($< C20/25$ und $\geq C12/15$) werden in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung verminderte Werte für Dauerzugfestigkeit und Grenzdehnung angegeben, um Schlupf bei schwächerem Verbund zu begrenzen. Bisherige Versuchsergebnisse zeigten für ILC jedoch deutlich niedrigere Schlupfwerte bei maximaler Verbundspannung als für Normalbeton [21]. Daher ist davon auszugehen, dass Schlupf bei ILC eine untergeordnete Rolle spielt und damit eine Abminderung der Dauerzugfestigkeit und Grenzdehnung aufgrund dieser Problematik nicht erforderlich ist. Dementsprechend wird vorgeschlagen, die Grenzdehnungen von $\varepsilon_{fud} = 7,4\%$ und den Bemessungswert der Dauerzugfestigkeit $f_{fd} = 445$ MPa (bzw. $6,1\%$ und 370 MPa bei statisch unbestimmten Tragwerken) aus der abZ des verwendeten Produkts für gerade Stäbe anzusetzen [21, 80].

Duktilität

Da GFK-Bewehrung aufgrund der geringeren Steifigkeit größere Verformungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit eingeht als Bewehrungsstahl, wird auch in Verbindung mit Infraleichtbeton von einer Vorankündigung des Versagens und somit einem duktilen Bauteilverhalten ausgegangen.

Verformungen

Bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung sind die Steifigkeiten bzw. das Verformungsverhalten zu beachten. Gemäß der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung dürfen GFK-

Bewehrungen des gewählten Produktherstellers nicht als Druckbewehrung angesetzt werden [80]. Dementsprechend sollte auch bei der Berechnung der Stauchung einer GFK-bewehrten ILC-Wand kein vertikaler Lastabtrag über die Bewehrung angesetzt werden.

Aufgrund der geringeren Steifigkeit ($E = 60\,000\text{ N/mm}^2$ für Zug) im Vergleich zu Betonstahl ergeben sich insbesondere in Kombination mit der geringen Steifigkeit und der erhöhten Kriech- und Schwindneigung des ILC vergleichsweise größere Durchbiegungen. Verfahren zur Berechnung der Durchbiegung unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden sind in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung der eingesetzten GFK-Bewehrung erläutert [80]. Speziell für ILC schlägt Hückler [21] ein Verformungsmodell über die direkte Berechnung der $M-\kappa_m$ -Linie vor (► *vgl. Kap. 7.6.3*). Gegebenenfalls können zu große Verformungen durch Maßnahmen wie beispielsweise überhöhtes Betonieren ausgeglichen werden.

Brandschutz

Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit ergibt sich für GFK-Bewehrung eine geringe erforderliche Betondeckung (► *vgl. Kap. 7.2.3*). Werden jedoch Brandschutzanforderungen gestellt, sind Besonderheiten zu beachten. Bei der Anforderung R90 ist gemäß der abZ der eingesetzten GFK-Bewehrung zum einen mit abgeminderter Verbundfestigkeit zu rechnen, zum anderen wird eine Betondeckung von $c_{min} = 65$ mm [80] gefordert. Dieser Wert wurde für Normalbetone festgelegt, um ein Mindestmaß der Verbundspannung zu gewährleisten. Für Infraleichtbeton kann $c_{min} = 65$ mm als konservativ betrachtet werden, da dieser eine geringere Wärmeleitfähigkeit besitzt und die Betondeckung daher vermutlich in Abhängigkeit der angestrebten Verbundspannung reduziert werden könnte. Dies könnte z. B. durch experimentelle Untersuchungen im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) verifiziert werden.

Die Anwendung der brandschutzspezifischen Anforderungen ist je nach Bauteil und Funktion der Bewehrung (statisch erforderlich bzw. konstruktiv, z. B. zur Rissbreitenbeschränkung aus Zwang) individuell zu prüfen.

7.8 Konstruktionsgrundlagen

Im Folgenden werden Angaben zum Verbundverhalten von Infralichtbeton sowie zur Betondeckung zusammengefasst. Weitere Hinweise zur Konstruktion, z. B. Besonderheiten der Bewehrungsführung bei Leichtbetonen in Form von erhöhten Biegerollendurchmessern und Übergreifungslängen, sind bei Faust [7] aufgeführt. In Bezug auf GFK-Bewehrung sind spezielle Regelungen gemäß den bauaufsichtlichen Zulassungen und technischen Regelungen [24, 80] zu beachten.

7.8.1 Verbundverhalten

Das Verbundverhalten wird durch die Verbundspannung-Schlupf-Beziehung beschrieben, die für ILC durch Ausziehversuche ermittelt wurde [21]. 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 [98] 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 für ILC konservative Werte liefert und damit angewendet werden kann [21]. 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 auf der sicheren Seite liegen [99].

Der Bemessungswert der Verbundspannung nach EC2 [20] berechnet sich wie folgt:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \frac{f_{lctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (60)$$

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 [21] 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.

Unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten mittleren Zugfestigkeit f_{ilctm} von ILC aus [21] und dem Ansatz gemäß EC2 von $f_{lctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ilctm}$ [20] ergibt sich die Formel zu

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \frac{f_{ilctm} \cdot 0,7}{\gamma_c} \quad (61)$$

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

	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

Tabelle 7-6 Bemessungswert der Verbundspannung für ILC

7.8.2 Mindestbewehrung

Mindestbewehrungen dienen in der Regel der Aufnahme unberücksichtigter Zwangsspannungen sowie der Sicherstellung der Versagensvorankündigung und werden in der Norm in Abhängigkeit der Bauteil- bzw. Belastungsart definiert.

Die Mindestbewehrung von Wänden und Stützen dient hauptsächlich der Aufnahme von unplanmäßigen Biegemomenten und der Minimierung zeitabhängiger Verformungen. Gemäß Faust sind die Angaben der Norm konstruktiver Natur und damit gleichermaßen auf Normal- und Leichtbetone übertragbar [7]. Daher wird vorgeschlagen, die Angaben auch für Infraleichtbeton zu übernehmen.

Eine Robustheitsbewehrung für Biegebauteile soll gewährleisten, dass das Rissmoment aufgenommen werden kann. Dies sollte für ILC-Bauteile ebenfalls vorgesehen werden, wobei die experimentell ermittelte mittlere Zugfestigkeit anzusetzen ist.

Über einen Mindestquerkraftbewehrungsgrad kann für Infraleichtbeton keine Aussage getroffen werden, da das Verhalten von ILC unter Querkraft noch nicht erforscht ist (► *vgl. Kap. 7.5.4*).

Die Mindestbewehrung zur Gewährleistung der Rissbreitenbegrenzung wurde in Kap. 7.6.2 beschrieben.



8 Baupraktische Aspekte

- 8.1 Geeignete Schalungen
- 8.2 Oberflächengestaltungen
- 8.3 Herstellung und Einbau
- 8.4 Ausschulfristen und Nachbehandlung
- 8.5 Oberflächenschutz – Hydrophobierung
- 8.6 Betonkosmetik und Nachbearbeitung

8.1 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 Infraleichtbeton zu identifizieren, wurden verschiedene Schalplatten getestet [100], die unterschiedliche Beschichtungen und Saugverhalten aufwiesen. Als Betontrennmittel wurde ein teilsynthetisches, nicht wassermischbares und lösemittelfreies Universaltrennmittel verwendet [101]. Die Ergebnisse entsprachen den Erwartungen: Zum Beispiel wurde mit einer Birkensperrholzplatte mit einer einseitigen, leicht saugenden Spezialfilmbeschichtung eine lunker- und porenarme, leicht raue Oberfläche erzielt. Eine nicht saugende Birkensperrholzplatte, die beidseitig mit Phenolharzfilm beschichtet war, ergab hingegen eine glatte Oberfläche mit verteiltem Porenbild (► *vgl. Bild 8-1*).



Fazit

Wenn eine porenarme Oberfläche eines Infraleichtbetonteils gewünscht ist, ist die Verwendung einer saugenden Schalplatte empfehlenswert (► *alternativ ist auch der Einsatz von Vlies möglich; vgl. Kap. 8.2*). Entsprechende Versuche mit ILC800 ergaben zufriedenstellende Ergebnisse.

8.2 Oberflächengestaltungen

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten der Oberflächengestaltungen von Infraleichtbeton in systematischer Weise aufgezeigt. Dabei geht es zunächst um die Verwendung von Schalungsmatrizen, den Einsatz strukturierter Schaloberflächen aus unterschiedlichen Baustoffen sowie den Zusatz von Pigmentstoffen. Möglichkeiten der Nachbearbeitung fertiger Oberflächen wie Schleifen, Ölen, Wachsen etc. werden im nachfolgenden Kapitel genauer behandelt.

Grundsätzliches zu Betonoberflächen aus Infraleichtbeton

Analog zu Normalbetonmischungen bildet sich auch bei Infraleichtbeton die äußere Sichtfläche aus der feinen Zementmatrix. Als Nebenprodukte mehrerer Forschungsprojekte sowie studentischer Arbeiten wurden die Oberflächenqualitäten beim Einsatz verschiedenster Schalungen getestet.



Bild 8-1 Exemplarische Oberflächen von ILC800 mit leicht saugender Spezialfilmbeschichtung (links) und nicht saugender Birkensperrholzplatte (rechts) [27]



Bild 8-2 Prototypen und Oberflächen aus Infrleichtbeton, links: ILC800, rechts: ILC600

Als ein Ergebnis dieser Untersuchungen ließ sich die Aussage ableiten, dass bei richtiger Anwendung der ILC-Rezepturen mit höheren Rohdichten annähernd gleiche Oberflächengestaltungen möglich sind wie bei Normalbeton. Die gängigen Mischungen von ca. 800 kg/m^3 bieten den größten Gestaltungsspielraum, da hier die Oberflächen in der Regel sehr einheitlich und porenärmer sind. Insbesondere die besonders leichten Betonmischungen unter ca. 700 kg/m^3 neigen durch die hohe Porosität zu unregelmäßigeren Oberflächenbildern, bei denen aufwendigere Nachbehandlungen nötig werden können. Die in Bild 8-2 gezeigten Prototypen eines Wandbauteils mit Fenster wurden mit unterschiedlichen Betonrezepturen hergestellt. Die Mischung mit 800 kg/m^3 ergibt eine durchgehende Sichtbetonoberfläche (Betonierhorizonte entstehen in diesem Fall durch die geringen Einbringmengen pro Betonmischung), während die Mischung mit 600 kg/m^3 trotz bereits für den Infrleichtbeton optimierter, d. h. in diesem Fall saugender Schalungen eine sehr unregelmäßige Oberfläche aufweist.

Diese Ergebnisse lassen sich direkt auf die Oberflächen von strukturierten Schalungsbildern übertragen, auch hier treten bei leichteren Betonmischungen ähnliche Effekte auf.

Einsatz nicht saugender Beton-Schalungsmatrizen aus Kunststoff

Ein sehr überzeugendes Resultat liefert im Hinblick auf die Oberflächenqualität der Einsatz von nicht saugenden Schalungsmatrizen aus Kunststoff. Diese wurden im Rahmen einer eigenen Studienreihe zum Thema der Oberflächenqualitäten von Infrleichtbeton an mehreren einheitlichen Probekörpern mit den Abmessungen $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ getestet.

Die Oberflächen von glatten Strukturen (Rippen, Wellen und Noppen) bleiben auch bei Infrleichtbeton annähernd fehlerfrei, glatt und geschlossen. Auch tief profilierte Schalungsmuster zeigen überzeugende Resultate, was unter anderem der selbstverdichtenden Eigenschaft des ILCs zuzuschreiben ist. Sehr anspruchsvolle Reliefs (Brettholzimitat oder auch Fotogravur) weisen kleinere Ansammlungen von Poren in strukturreichen Bereichen auf.

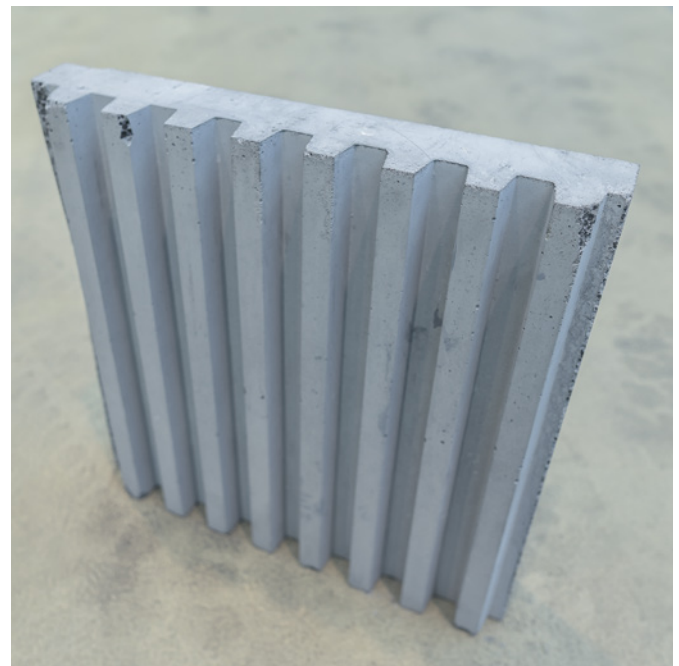


Bild 8-3 Oberfläche von ILC mit Rippenstruktur

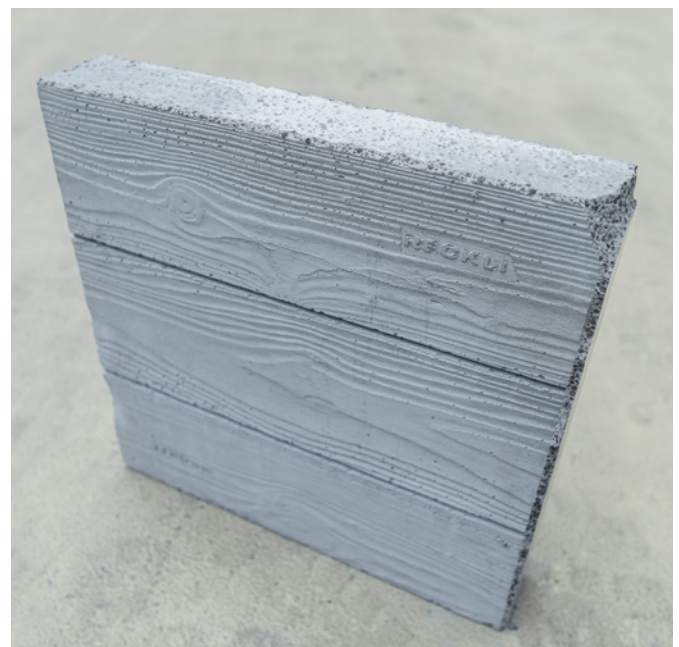


Bild 8-4 Oberfläche von ILC mit Holzstruktur mit Kunststoffmatrize

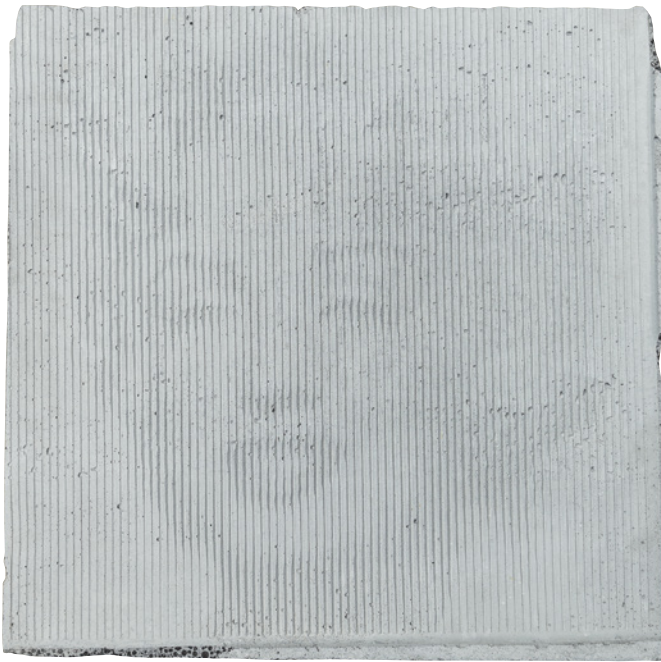
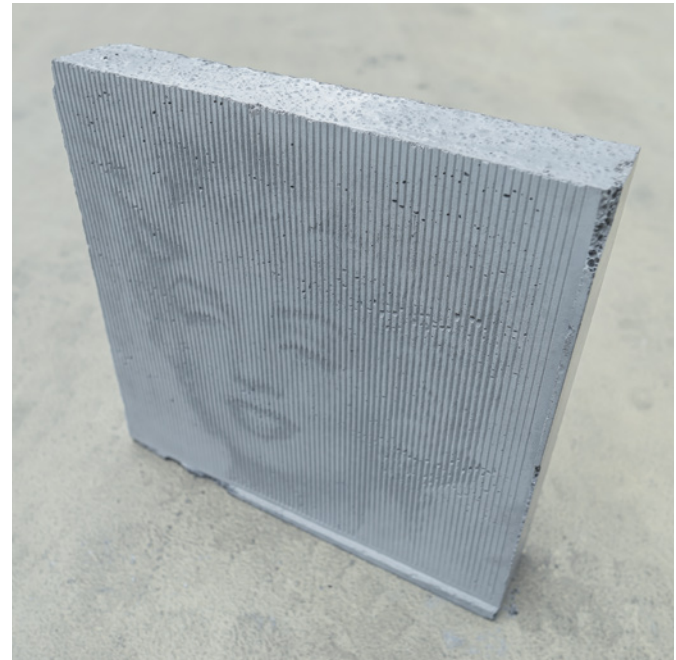


Bild 8-5 Oberfläche von ILC mit Fotomatrize



Infraleichtbeton besitzt eine geringere Festigkeit als übliche Normalbeton- oder Leichtbetonmischungen. Die verformbaren, flexiblen Schalungen kommen dem Material gerade bei komplexen Schalungsgeometrien entgegen, da das Risiko von Abbruch und Abplatzungen an den empfindlicheren Kanten verringert wird. Es lässt sich also festhalten, dass gerade spezielle Schalungsmatrizen aus flexiblen Materialien für Infraleichtbeton besonders geeignet sind.

Einsatz saugender Schalungen – Holz, Stoff und organische Materialien

Der Einsatz von natürlichen Schalungsmaterialien wie Brett Holz oder von Spanplatten und OSB (oriented strand board) verlangt einen genau auf die Materialien abgestimmten Einsatz von Schalöl und eine Beachtung des richtigen Zeitpunktes für das Ausschalen. Grundsätzlich führen auch hier, ähnlich wie bei marktüblichen Schalungsplatten, die saugenden Oberflächen zur Reduktion von Luftporen und zu samtigen, aber glatten Oberflächen (► *siehe hierzu auch Kapitel 8.1, Geeignete Schalungen*).

Bringt man zu wenig Schalöl auf die geometrisch nicht ebenen, saugenden Oberflächen auf, wird dem Beton im Abbindeprozess zu viel Wasser entzogen, die Oberfläche wird zu weich und Betonrückstände bleiben an der Schalung kleben. Bringt man hingegen zu viel Schalöl auf, verfärbt sich die Betonfläche unregelmäßig. Grundsätzlich sollte bei der Verwendung von natürlichem Holz die richtige Abstimmung von Oberfläche und Schalöl an Musterflächen und Prototypen getestet werden.

Bei Baustoffen mit sehr unregelmäßigen, verwinkelten Oberflächen wie OSB bleiben in der Regel Teile der Betonoberfläche an den Schalungsbrettern haften, insbesondere dort, wo der Beton das Schalmaterial hinterläuft.



Bild 8-6 Oberfläche von ILC mit Brett Holzschalung

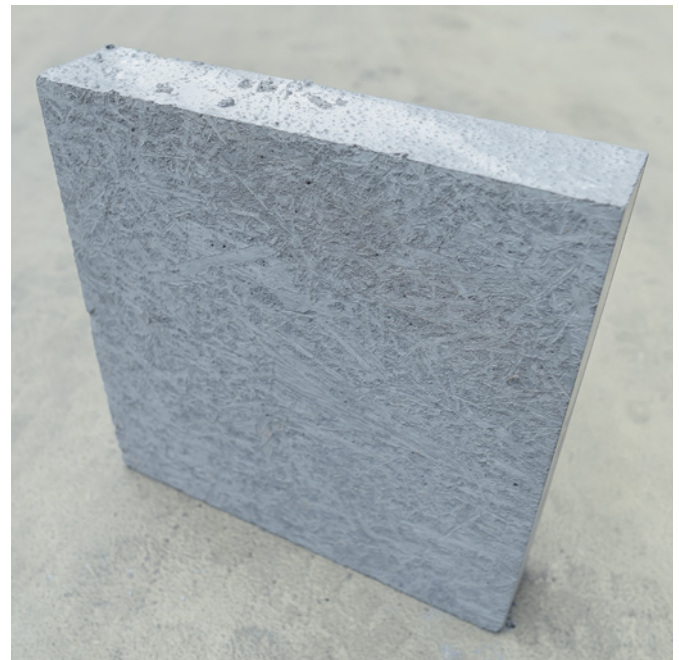


Bild 8-7 Oberfläche von ILC mit OSB-Schalung

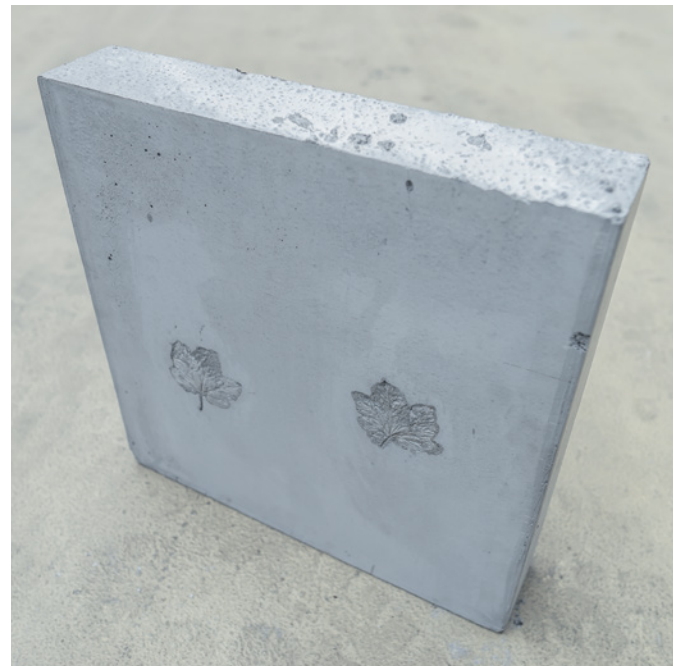


Bild 8-8 Oberfläche von ILC mit in die Schalung eingelegten natürlichen Blättern

Einbringung von Blättern, Ornamenten und Profilen

Infrleichtbeton eignet sich zur Einbringung von Fremdkörpern wie Ornamenten, Profilierungen oder betonfremden organischen Elementen, wie z. B. Blättern. Die feinen Blattstrukturen bilden sich klar in der Betonfläche ab, vereinzelt kommt es allerdings zum Verbleib von organischen Rückständen und auch zu Verfärbungen.

Schalungsvlies

Das Einlegen von speziellen Schalungsvliesen führt zu sehr überzeugenden Resultaten. Die Vliesstruktur kann nach dem Abbinden des Betons nahezu ohne Rückstände entfernt werden. Der Beton weist keine sichtbaren Lufteinschlüsse auf und zeigt eine durchgehende Oberflächenstruktur, in der das Muster der Vliesstruktur ablesbar ist. Die Oberfläche ist leicht aufgeraut und uneben, sie wirkt eher weich und textil.

Einsatz gefräster Schalungen

Der Einsatz von extrudiertem oder expandiertem Polystyrolhartschaum wurde im Rahmen des Baus einzelner Prototypen ebenfalls exemplarisch untersucht. Bei ersten Tests zeigte sich schnell, dass unbehandelte gefräste Oberflächen durch ihre aufgeraute und offenporige Oberflächenstruktur zu Problemen bei der Trennung von Betonfläche und Schalungskörper führen. Dies ließ sich auch durch das Auftragen beträchtlicher Mengen von Schalöl nicht verhindern. Der Einsatz von Schalungskörpern aus Polystyrol funktionierte nur dann richtig, wenn die Oberfläche vor dem Betonivorgang mit einer Lackierung aus Epoxidharz überzogen wurde. Um entsprechende Schichtstärken zu erreichen muss die Lackierung in mehreren Schichten aufgebracht und anschließend geschliffen werden.

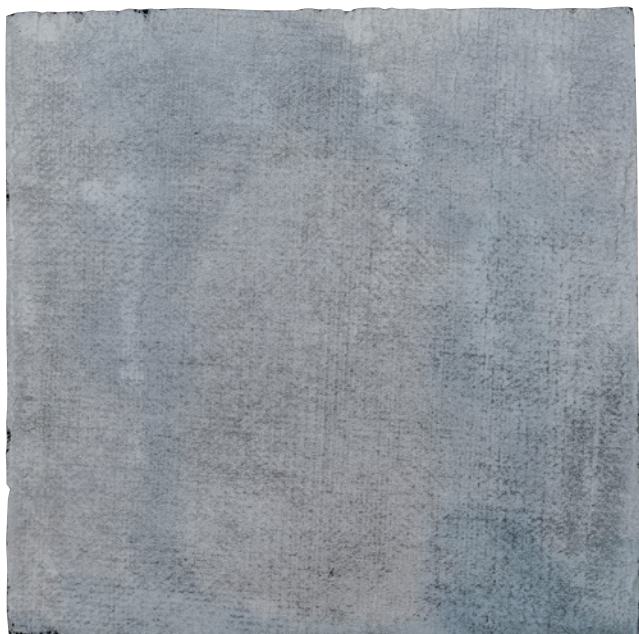


Bild 8-9 Oberfläche von ILC mit Schalungsvlies

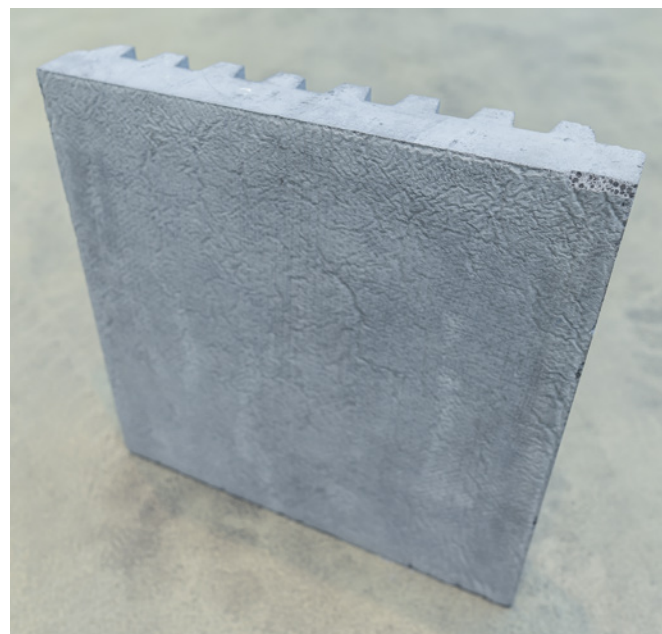


Bild 8-10 Prototyp hergestellt mit Polystyrol-Schalungskörper
(Foto: Lukas Specks)



Bild 8-11 Bearbeitung des Schalungskörpers aus Polystyrol
(Foto: Lukas Specks)

Diese »Sonderbehandlung« eignet sich unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten in der Regel nicht für eine Produktion, da sie entsprechend materialintensiv ist, die Schalkörper extrem empfindlich sind und der Zeitaufwand für das Schleifen, die Nachbehandlung und den Trocknungsprozess extrem langwierig ist.

Zudem muss man ernsthaft infrage stellen, ob man für die Erstellung eines ILC-Bauteils, das als Alternative zu polystyrolhaltigen Dämmstoffen gedacht ist, dieselben Baustoffe in großen Mengen als Abfallstoffe produzieren sollte.

Farbiger Infraleichtbeton – Pigmente, Durchfärbungen

Neben der geometrischen Gestaltung unterschiedlicher Oberflächen kann die Betonoberfläche auch durch das Durchfärben des Betons verändert werden. Zur Erprobung des Effektes wurden gängige Farbpigmente zur Betonfärbung zugefügt. Für die stufenweise Einfärbung der Infraleichtbetonproben (Platten 50 cm × 50 cm und Probekörper 10 cm × 10 cm × 10 cm) wurden marktübliche Farbpigmente in Rot, Schwarz und Grün verwendet. Für die Einfärbung des Betons in Rot- und Grüntönen genügt bei Infraleichtbeton eine Pigmentmenge von 5 bzw. 6 Masse-% des Zementgehalts zum Erhalt einer ästhetisch ausreichenden Farbsättigung.



Bild 8-12 Farbpigmente zur Herstellung von farbigem ILC
(Foto: Minh Duc Pahn)

Einzig der Schwarzton erreicht mit 5 Masse-% Pigmentanteil des Zementgehalts in der Betonmischung eine nicht ausreichende Farbsättigung. Um hier zufriedenstellende Ergebnisse zu erreichen, müsste der Pigmentanteil deutlich erhöht werden.

Die Beispiele zeigen, dass sich Infraleichtbeton trotz der enthaltenen Stoffe wie Silikastaub, Blähton und Blähtonsand gut zum Einfärben eignet und im Farbspektrum von rot bis grün überzeugende Resultate zeigt.

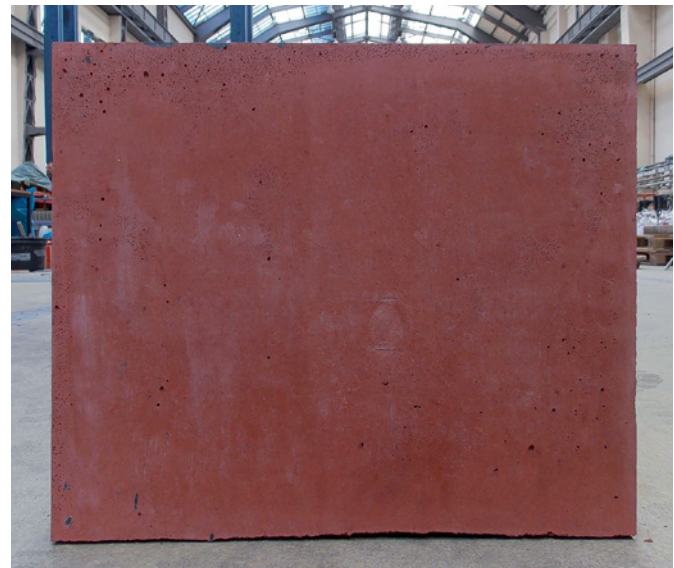


Bild 8-13 Prototyp ILC mit roter Färbung (Foto: Minh Duc Pahn)

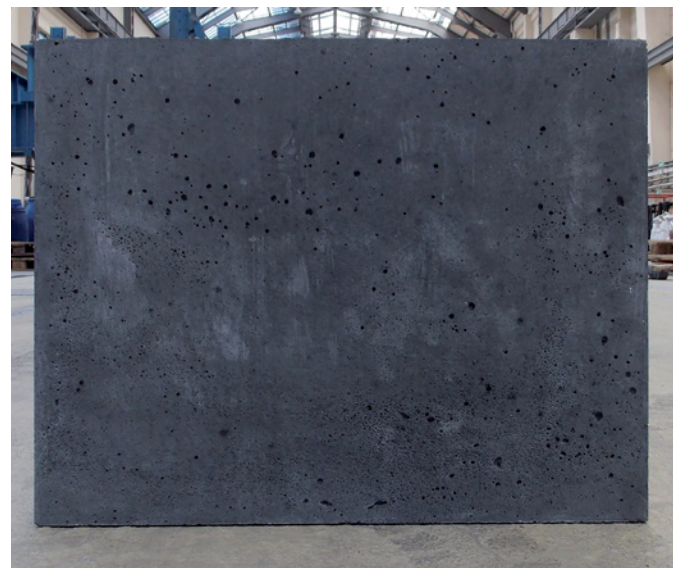


Bild 8-14 Prototyp ILC mit schwarzer Färbung (Foto: Minh Duc Pahn)

8.3 Herstellung und Einbau

Herstellung

Die Herstellung von Infraleichtbeton ist – wie gängiger 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 Probenmischungen seitens des Betonlieferanten im Labor erfolgen, um die Zusammensetzung zur Erzielung der in der Ausschreibung zu definierenden Frisch- und Festbetoneigenschaften festzulegen. Die festgelegten 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 Feuchtegehalt 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.

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

Einbau

Das Einbringen von Infraleichtbeton in die Schalung erfolgt mit Kübeln. Das Pumpen von ILC ist nicht zielführend, da einerseits das Wasser in die leichte Gesteinskörnung gepresst wird, 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.

Infraleichtbeton gemäß der Zusammensetzung nach Tabelle 3-2 ist nahezu selbstverdichtend. 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 darf auch nicht erfolgen, da sonst zu viel Luft aus dem Leim ausgetrieben wird, was eine zu hohe Rohdichte zur Folge hätte, bzw. eine Entmischung hervorrufen könnte. Gegebenenfalls können Verdichtungsmaßnahmen (z. B. Außenrüttler, Stochern) aus optischen Gründen hilfreich sein, um z. B. Betonierhorizonte an der Oberfläche zu vermeiden.

Fallhöhen

Um die Auswirkungen von unterschiedlichen Fallhöhen auf die Eigenschaften von Infraleichtbeton zu testen, wurden Betoniervorgänge anhand eines Kübels aus unterschiedlichen Höhen (ca. 60, 100 und 150 cm) durchgeführt [100]. 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 [102]).

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 soge-

nannte 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 [103].

Infraleichtbeton nach Tabelle 3-2 ist ein nahezu selbstverdichtender Beton, der jedoch nicht gepumpt, sondern 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 zu können, wurden verschiedene Maßnahmen mit ILC800 getestet. Neben manuellen Methoden wie Stochern oder punktuellern 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. Eine weitere Möglichkeit, Betonierhorizonte zu vermeiden, 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. Dabei können auch weitere Schritte, wie z. B. Betonage im Kontraktorverfahren, in Betracht gezogen werden.

8.4 Ausschallfristen und Nachbehandlung

Die optimale Ausschallfrist 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. Ort betonbauwerken länger gewählt werden. Eine längere Ausschallfrist stellt prinzipiell eine gute Möglichkeit der Nachbehandlung dar, vermindert das Risiko des Klebens von Zementleim an der Schalung 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 [104] und DIN 1045-3 [105] 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 sind ein frühzeitiges Austrocknen zu verhindern und der Beton 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.

Fazit

Ausschallfrist, Nachbehandlungsdauer und -methoden sollten individuell für jedes Bauprojekt abgestimmt und anhand einer Probewand getestet werden. 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.

8.5 Oberflächenschutz – Hydrophobierung

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln erwähnt, sollten bewitterte ILC-Oberflächen 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. 6.3.2*). 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. 7.2.1*).

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 [106] 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 Infralichtbeton wurde bereits beim Einfamilienhaus in Berlin angewendet und hat sich bewährt. Zudem wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt [77], bei denen nicht hydrophobierte und hydrophobierte Flächen aus ILC800 über einen Zeitraum von fünf Monaten täglich mit Wasser besprüht wurden. Die hydrophobierten Flächen zeigten deutlich weniger Oberflächenschwindrisse und auch einen positiven Einfluss der Hydrophobierung auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit (► *vgl. Kap. 7.2.1*).

Eine Alternative zur Oberflächenbehandlung stellt die Massenhydrophobierung dar. Dabei wird ein hydrophobierendes Zusatzmittel beim Mischprozess in den Beton eingemengt. Erfahrungen mit Infralichtbeton wurden hier z. B. beim Experimentalgebäude Small House I in Kaiserslautern gesammelt (► *vgl. Kap. 9.4 und [14]*). Jedoch werden bei den ILC-Wanddicken erhebliche Mengen des Zusatzmittels erforderlich, obwohl die hydrophobierende Wirkung nur im bewitterten Randbereich erforderlich ist.

Auch erdberührte ILC-Oberflächen müssen gegen das Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden. Hier empfiehlt sich eine Ausbildung als Schwarze Wanne (► *vgl. auch Kap. 5.5*).

8.6 Betonkosmetik und Nachbearbeitung

In diesem Kapitel werden verschiedene Vorgehensweisen zur Betonkosmetik, der nachträglichen Bearbeitung und Behandlung vorgestellt. Während sich die Betonkosmetik mit der Ausbesserung von Fehlstellen, dem Schließen von Ankerlöchern etc. beschäftigt, wird unter nachträglicher Bearbeitung eine strukturelle Veränderung der Oberfläche durch handwerkliche Techniken, z. B. Schleifen oder Polieren, verstanden. Die nachträgliche Behandlung dient dem Schutz der Oberfläche, z. B. durch Hydrophobierungen (► *vgl. Kap. 8.5*), Imprägnierungen oder Beschichtungen (hierzu zählen auch Ölen, Wachsen oder Lackieren), wobei die Diffusionsoffenheit des Betons gewahrt bleiben muss [106].

Im Folgenden werden einige Verfahren erläutert, die an Infralichtbetonoberflächen getestet wurden. In Abhängigkeit ihrer Zielsetzung wurden diese zwei Gruppen zugeordnet. Einerseits die »klassische« Betonkosmetik von Sichtbetonoberflächen mittels marktüblicher Spachtelmassen und Betonkonen zum Verschließen von Ankerlöchern sowie andererseits das gezielte ästhetische nachträgliche Bearbeiten und Behandeln von Betonflächen durch Techniken wie Anschleifen, Ölen, Wachsen, Lackieren etc.

Klassische Betonkosmetik, Ankerlöcher, Betonnester etc.

Analog zu Normalbetonflächen aus Sichtbeton muss die Oberfläche aus Infraleichtbeton teilweise betonkosmetisch nachbearbeitet werden. Neben eigentlich vermeidbaren Schädigungen der Oberfläche durch falsch eingebaute Abstandshalter oder Abbruch und Abplatzungen gibt es unvermeidbare »Störungen« der Oberfläche durch Ankerlöcher. Für dieses Problem gibt es zahlreiche marktübliche Lösungsansätze.

Klassischerweise gehört dazu das Einbringen von vorgefertigten Stopfen, auch Konen genannt, zur Kaschierung von Ankerlöchern. Neben der Verwendung der unterschiedlichen Arten von Konen können auch marktgängige Spachtelmassen zum Einsatz kommen.

Die gängigen Spachtelmassen für die Betonnachbearbeitung wurden hauptsächlich für Normalbetonmischungen entwickelt; daher sollten sie für den Infraleichtbeton angepasst und auf die jeweilige Betonfärbung abgestimmt werden. Da die Färbung des Infraleichtbetons nicht ganz der Farbe von klassischem Sichtbeton entspricht, kommt es bei der Betonkosmetik mit Spachtelmassen aus den Standardsortimenten der Hersteller in der Regel zu leichten Farbabweichungen, die ein unbefriedigendes Resultat ergeben. Die besten Ergebnisse beim Nachspachteln von Infraleichtbetonflächen erhält man durch Spachtelmassen, die in etwa die gleiche Materialzusammensetzung wie der Infraleichtbeton haben. Insbesondere sollte der für Infraleichtbeton verwendete Sand aus gemahlenden Blähtonkügelchen auf einen Korndurchmesser von 1 mm gesiebt verwendet werden. Der Zement kann wahlweise durch eine spezielle Spachtelmasse ersetzt werden, um

die Verarbeitungsqualität des Spachtelmaterials zu erhöhen. Eine solche Spachtelmasse sollte auch beim Verschließen von Ankerlöchern verwendet werden, allerdings ist die Verwendung von vorgefertigten Konen aus Beton oder Kunststoff unerlässlich, um Schwindrisse zu vermeiden.

Gezielte nachträgliche Bearbeitung und Behandlung der Oberfläche: Schleifen, Ölen und Wachsen

Neben der Korrektur von Schönheitsfehlern auf Sichtbetonflächen kann die Oberfläche der Wände aus Infraleichtbeton auch gezielt behandelt werden, um das Erscheinungsbild der Innenwände bewusst zu verändern.

Getestet wurden dabei folgende Bearbeitungsvorgänge:

- das Schleifen der Oberfläche, d. h. die Freilegung der inneren Struktur,
- das Lackieren der freigelegten Oberfläche mit transparentem Lack als nachträgliche Versiegelung,
- das Ölen der freigelegten Oberfläche mit Steinöl oder auch Leinöl,
- das Wachsen der freigelegten Oberfläche mit Hartwachs oder geschmolzenem Wachs.

Schleifen der Betonoberflächen

Will man die innere Struktur des Infraleichtbetons offenlegen, muss man die ca. 2 bis 3 mm starke, äußere Zementschicht entfernen. Das Schleifen ist schon mit relativ einfachem Werkzeug wie Schwingschleifern möglich. Es ist zu empfehlen, relativ grobe Körnungen von ca. P 40 (gemäß DIN ISO 6344 [107]) für den ersten Schliff zu verwenden. Für den Feinschliff empfiehlt sich eine 240er-Körnung, durch die die aufgeraute Oberfläche relativ eben und glatt wird. Angeschnittene Blähtonkugeln werden durch die Nachbearbeitung natürlich aufgeschnitten und die innere Struktur wird sichtbar.

Die Technik eignet sich daher in keinem Fall für das Freilegen von frei exponierten Außenflächen, da sich die Wasseraufnahmefähigkeit des Betons durch die Bearbeitung erhöht.

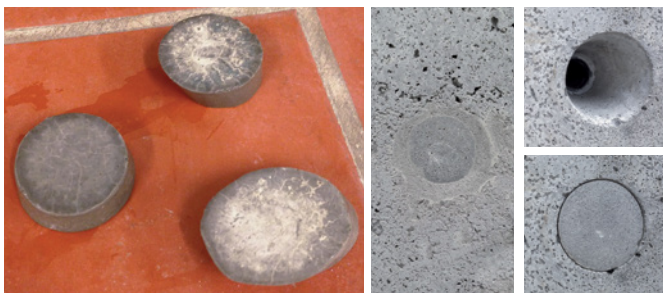


Bild 8-15 Vorgefertigte Betonkonen für Ankerlöcher
(Foto: Jenny Sarah Loebel)



Bild 8-16 Freilegen der inneren Struktur des ILC durch Schleifen

Schleifen und Lackieren

Will man die freigelegte Infralichtbetonfläche zusätzlich versiegeln, stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Zunächst wird empfohlen, die Oberfläche diffusionsoffen zu versiegeln. Ein wasserbasierter Parkettsiegel, der normalerweise für Bodenbeläge eingesetzt wird, kann hier z. B. zur Anwendung kommen. Dieser wurde zweimal dünnflächig mit einem Pinsel aufgetragen. Durch die Versiegelung bleibt die natürliche Wandstruktur erhalten. Die Oberfläche fühlt sich deutlich glatter an, da die offenen Poren teilweise verschlossen wurden. Die Oberfläche erhält zudem einen seidenmatten Glanz.

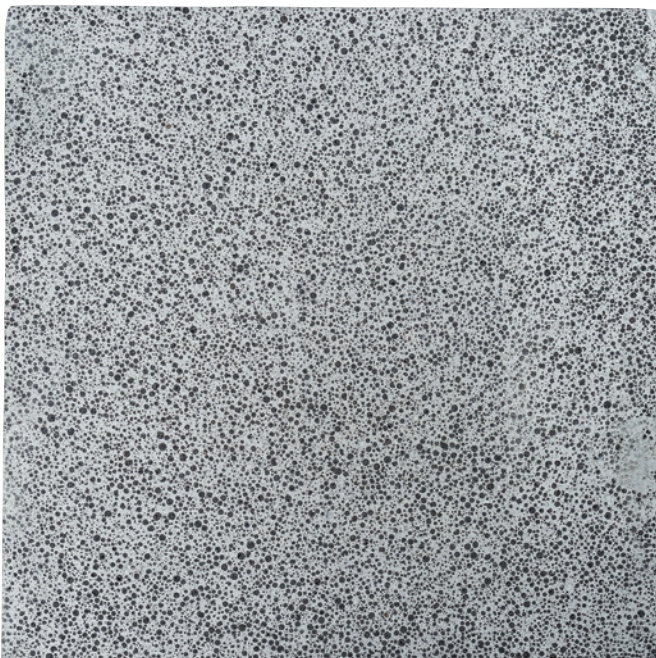
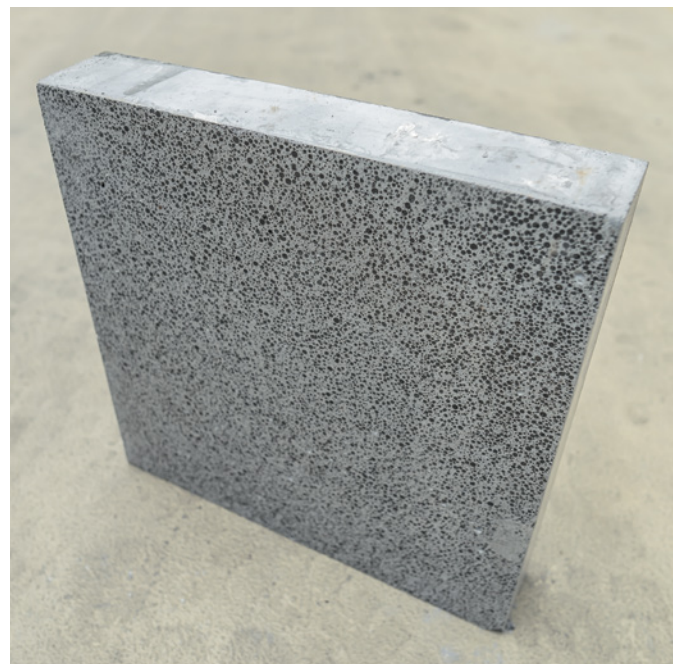


Bild 8-17 Versiegelung der freigelegten inneren Struktur durch Wasserlack



Schleifen und Ölen

Bei den Versuchen, die freigelegte Oberfläche mit unterschiedlichen Arten von Öl zu behandeln, zeigte sich ein anderer Effekt als beim Lackieren. Das Öl wurde zweimalig mit einem Pinsel aufgetragen. Offensichtlich lösen die Öle (hier Steinöl und Leinöl) Pigmentstoffe aus den Blähtonzuschlägen. Die Flächen werden tiefschwarz durchfärbt. Dieser Effekt tritt insbesondere bei Leinöl zutage. Die Flächen fühlen sich ansonsten samtig angenehm an.

Schleifen und Wachsen

Ähnlich wie bei der Nachbearbeitung mit Leinöl kann es bei der Verwendung von Wachsen teilweise zu Farbveränderungen kommen, insbesondere da sich die Infralichtbetonfläche schwarz verfärbt. Die verwendeten Hartwachse wurden in diesem Fall einmalig mit einem Tuch aufgetragen. Die Oberfläche wirkt annähernd wie nach dem Schleifen. Versuche zeigten allerdings, dass das Wachs teilweise in die Poren der Zuschlagstoffe eindringt und dort unansehnliche Nester bildet. Hier sind weitere Tests in jedem Fall angebracht.

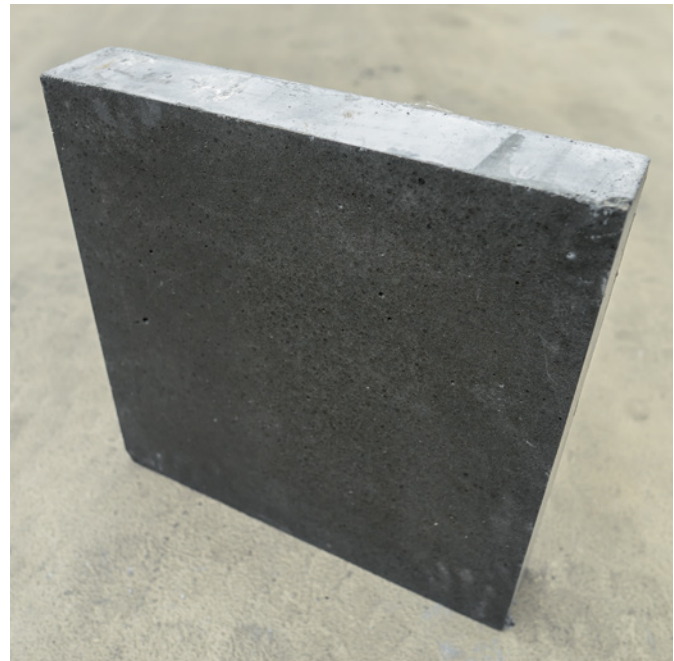


Bild 8-18 Versiegelung der freigelegten inneren Struktur durch Leinöl; prägnante Verfärbung des Materials



9 Ausgewählte Bauwerke

- 9.1 Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton, Berlin
- 9.2 Betonoase, Berlin
- 9.3 Einfamilienhaus, Aiterbach
- 9.4 Small House I, Technische Universität Kaiserslautern

9.1 Einfamilienhaus aus Infraleichtbeton, Berlin

Architektur: C. Bonnen, A. Schlaich, Berlin

Tragwerksplanung: M. Schlaich, L. Werner, Berlin



Bild 9-1 Einfamilienhaus in Berlin, Gartenfassade (Foto: ©wilfried-dechau.de)

Materialkennwerte zu den Außenwänden aus monolithischem Infraleichtbeton:

- Trockenrohdichte: 760 kg/m^3
- mittlere Druckfestigkeit: 7 MPa
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$: $0,18 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Außenwände: 50 cm
- Glasfaserbewehrung

Zum ersten Mal praktisch eingesetzt wurde der Baustoff Infraleichtbeton beim Bau eines privaten Einfamilienhauses 2007 in Berlin. Für das Projekt wurden erste Ausführungs-details, wie die Einbindung der Normalbetondecken in die Infraleichtbetonwände, entwickelt und im Hinblick auf die praktische Umsetzungsfähigkeit erprobt.

Zum Einsatz kam hier ein Beton mit einer Trockenrohdichte von weniger als 800 kg/m^3 bei einer Wanddicke von 50 cm .

Das Gebäude besteht aus zwei sich gegenüberstehenden tragenden Scheiben aus monolithischem Infraleichtbeton, auf denen die Deckenscheiben aus Normalbeton aufliegen. Außen- und Innenseiten der Wände sind als raumhohe Sichtbetonflächen präsent. Anschlussdetails sind bewusst einfach gehalten und folgen der materiellen Logik des Massivbaus.

Das Projekt zeigt die hohen Anwendungspotenziale für den Einsatz des Materials beim Bauen mit Sichtbeton.



Bild 9-2 Einfamilienhaus in Berlin, Innenansicht
(Foto: © wilfried-dechau.de)

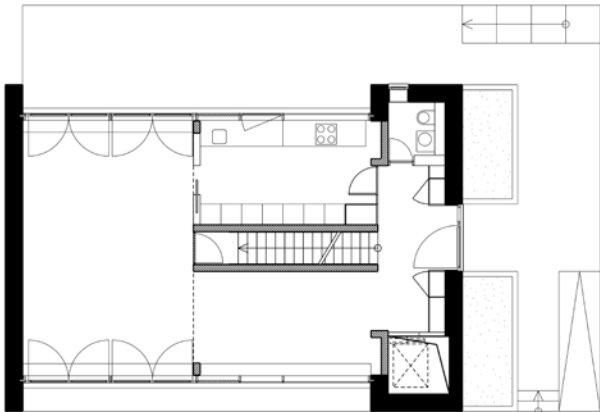


Bild 9-3 Einfamilienhaus in Berlin, Grundriss EG
(Quelle: C. Bonnen Architekt, schlaich bergemann partner)

Dachaufbau:

- extensive Begrünung
Einschichtbauweise, 8 cm
- Dachabdichtung:
durchwurzelfest
min. 2,5 % Gefälle
- Gefälle Wärmedämmplatten:
min. 2,5 % Gefälle
- Dampfsperre
- Bitumen-Voranstrich
- Stahlbeton-Deckenplatte, 25 cm
- evtl. Gips-Deckenputz, 10 mm,
mit Rand-Schattenfuge

Westwand

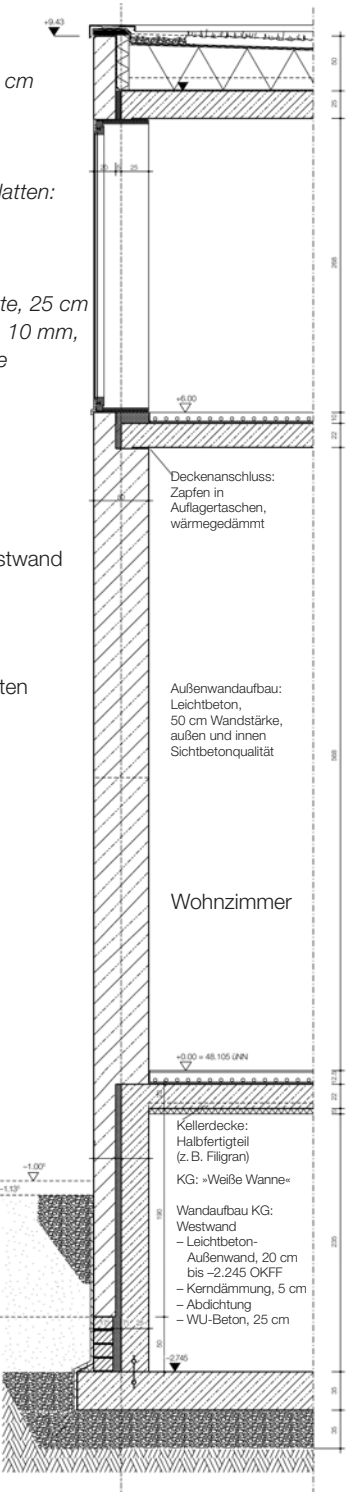
Garten

Wohnzimmer

Bodenaufbau:

- Gesamthöhe: 125 mm
- Gussasphalt-Estrich
 - Fußbodenheizung
 - Wärme-/
Trittschalldämmung,
hitzeunempfindlich
 - PE-Folie, 2 mm
 - Stahlbeton-
Deckenplatte, 22 mm
 - Wärmedämmplatten,
d = 5 cm

Bild 9-4 Einfamilienhaus
in Berlin, Schnitt Fassade
(Quelle: C. Bonnen Architekt,
schlaich bergemann
partner)



9.2 Betonoase, Berlin

Architektur: Gruber + Popp Architekten, Berlin

Tragwerksplanung: schlaich bergemann partner sbp GmbH, Berlin



Bild 9-5 Jugendzentrum in Berlin, Visualisierung (Quelle: Gruber + Popp Architekten)

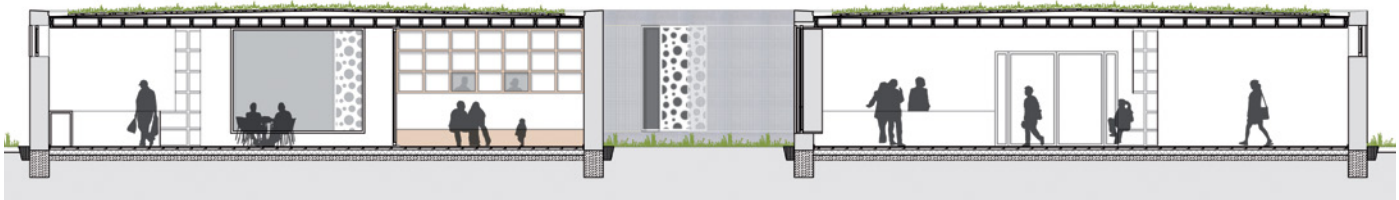


Bild 9-6 Jugendzentrum in Berlin, Querschnitt (Quelle: Gruber + Popp Architekten)

Materialkennwerte zu den Außenwänden aus monolithischem Infralichtbeton:

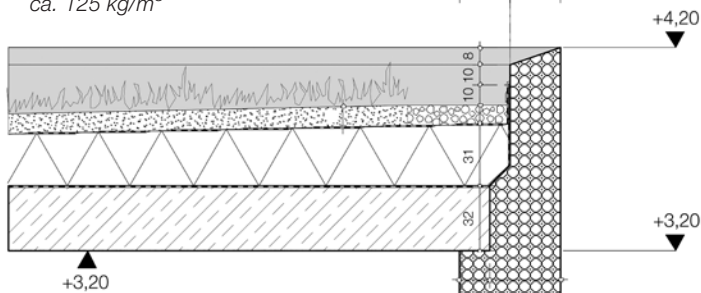
- Trockenrohdichte: 700 kg/m^3
- mittlere Druckfestigkeit: $9,4 \text{ MPa}$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$: $0,166 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Außenwände: 50 cm
- verzinkte Stahlbewehrung

In Berlin Lichtenberg wird im Jahr 2017 der Neubau der Jugendfreizeiteinrichtung »Betonoase« errichtet. Zielgruppe der Einrichtung sind Kinder und Jugendliche im Alter von

8 bis 18 Jahren. Um der Komplexität der Aufgabenstellung Rechnung zu tragen, entwarfen die Planer ein gestalterisch und konstruktiv reduziertes, gleichwohl aber anspruchsvolles Gebäude. Die tragenden, eingeschossigen Wände sind aus monolithischem Infralichtbeton. Eine Besonderheit sind die auskragenden Beton-Vordächer, die ohne zusätzliche Entkopplungen in den Betonwänden rückverankert sind. Der sich nun im Bau befindliche Neubau soll nach den Wünschen des Auslobers exemplarisch für die Grundidee des energieoptimierten und nachhaltigen Bauens stehen.

Dachaufbau:

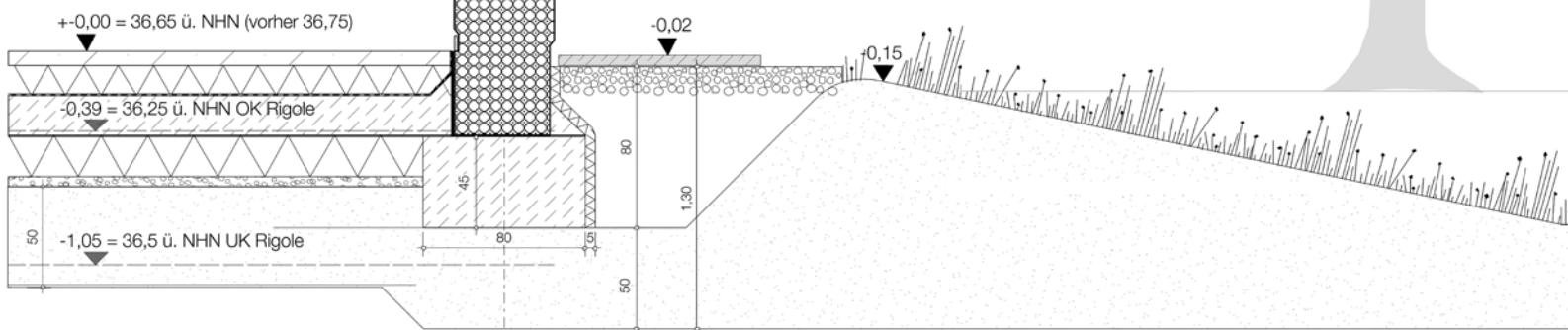
- extensive Begrünung
- Vegetationstragschicht, 7 cm
- Dränschicht, 3 cm
- Bitumendachbahn DIN EN 13707 (V13), 2 mm
- Polystyrol-Extruderschaum 025
- Bitumendachbahn DIN EN 13707 (V13), 2 mm
- Beton C30/37, 32 cm, Bewehrungsgehalt:
ca. 125 kg/m³

**Bodenaufbau:**

- Gussasphalt in 2 Lagen, geschliffen, 7 cm
- mineralische Dämmung (hitzebeständig), 15 cm
- PP-Folien, Dicke $\geq 0,05$ mm
- Bodenplatte unbewehrt C16/20 20 cm
- Polystyrol-Extruderschaum 035, 20 cm
- Kiesschüttung, 5 cm

Streifenfundament:

- Beton C16/20, 80 × 45 cm, unbewehrt
- Normalverdichten unterhalb BP und SF
- Polystyrol-Extruderschaum 035, 5 cm

**Bild 9-7** Jugendzentrum in Berlin, Schnitt Fassade (Quelle: Gruber + Popp Architekten)

9.3 Einfamilienhaus, Aiterbach

Architektur: Michael Thalmeir, KPT Architekten, Freising

Tragwerksplanung: BauFrei Tragwerksplanung GbR, Marc Tremel, München



Bild 9-8 Einfamilienhaus in Aiterbach, Ansicht Straße (Quelle: B. Callsen; K.-C. Thienel [13]; Foto: Matthias Richter – Formkoalition)

Materialkennwerte zu den Außenwänden aus monolithischem Infraleichtbeton:

- Trockenrohddichte: 725 kg/m^3
- mittlere Druckfestigkeit: $12,2 \text{ MPa}$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$: $0,185 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Außenwände: 50 cm

Das im Jahr 2016 fertiggestellte Wohnhaus in Aiterbach überzeugt durch die konsequente Anwendung von Infraleichtbeton in Sichtbetonqualität. Das Untergeschoss aus Normalbeton mit außenliegender Dämmung trägt den weit auskragenden Wohnteil mit einer tragenden monolithischen Außenhülle aus Infraleichtbeton.

Zum Einsatz kam hier ein Beton mit einer Trockenrohddichte von 725 kg/m^3 bei einer Wanddicke von 50 cm . Außen- und Innenseiten der Wände sind als raumhohe Sichtbetonflächen präsent. Die Innenräume werden hauptsächlich durch das Zusammenspiel von natürlichen Holzflächen und Sichtbeton bestimmt.



Bild 9-9 Einfamilienhaus in Aiterbach, Ansicht Garten (Quelle: B. Callsen; K.-C. Thienel [13]; Foto: Matthias Richter – Formkoalition)



Bild 9-10 Einfamilienhaus in Aiterbach, Innenansicht (Foto: Matthias Richter – Formkoalition)

9.4 Small House I, Technische Universität Kaiserslautern

Fachbereich Architektur: Fachgebiet Baukonstruktion II und Entwerfen

Prof. Helmut Kleine-Kraneburg (Projektleitung)

Fachbereich Bauingenieurwesen: Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schnell (Projektleitung)

Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit (Projektleitung)

Entwurf: Sarah Dichter, FG Baukonstruktion II und Entwerfen



Bild 9-11 Small House I, Außenansicht (Foto: Fachbereich Architektur und Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern)

Materialkennwerte zu den Außenwänden aus monolithischem Infralichtbeton:

- Trockenrohdichte: $650\text{--}700\text{ kg/m}^3$
- mittlere Druckfestigkeit: $9,0\text{ MPa}$
- Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^\circ, \text{tr}}$: $0,15\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$
- Außenwände: 50 cm
- verzinkte Stahlbewehrung

Das Small House I entstand im Jahr 2014 in Kooperation unterschiedlicher Fachgebiete der Fachbereiche Architektur und Bauingenieurwesen der Technischen Universität Kaiserslautern. Die Umsetzung des Small House I basiert auf dem studentischen Stegreif-Entwurf. Der introvertierte Innenraum aus Sichtbetonwänden wird von oben über ein Fensterband belichtet.

Das Gebäude wurde als Experimentalgebäude errichtet. Eine der vier Wände wurde zu Vergleichszwecken als Wandelement mit Kerndämmung gebaut. Die Durchfeuchtung der Wände wird mit Multiringsensorelektroden im Rand- und Kernbereich der Wand gemessen.



Bild 9-12 Small House I, Oberlichter (Foto: Fachbereich Architektur und Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern)



Bild 9-13 Small House I, Multiringensorelektroden (MRSE) für das Bauwerksmonitoring (Foto: Fachbereich Architektur und Fachbereich Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern)



10 Anhang

- 10.1 Beispielhafte Bemessungen
- 10.2 ω -Tafeln als Bemessungshilfe
- 10.3 Herausgeber und Autoren
- 10.4 Literatur
- 10.5 Abbildungsverzeichnis
- 10.6 Tabellenverzeichnis
- 10.7 Stichwortverzeichnis

10.1 Beispielhafte Bemessungen

10.1.1 Bemessung ILC-Wandabschnitt

Vorgaben

Als Beispiel wird ein Wandabschnitt aus ILC800 gemäß Tabelle 3-2 im Erdgeschoss eines sechsgeschossigen Gebäudes (Erdgeschoss + fünf Obergeschosse) betrachtet. Die Lasten aus den oberen Etagen werden durch die oberen Wände und eine halbseitig aufliegende Deckenplatte aus Normalbeton übertragen. Es wird von einem gelenkigen Anschluss der Decke an die Wand ausgegangen.

- Abmessungen: 3 m × 3 m (B × H), Wanddicke 0,5 m
- Geschossdecke aus Normalbeton, bis zur Wandmitte (25 cm) aufliegend, d. h. Ausmitte 12,5 cm, gelenkiger Anschluss
- Bewehrung: verzinkter Betonstahl
- Der Öffnungsanteil (Fensterflächen etc.) beträgt ca. 33 %.

Im Folgenden wird beispielhaft die Bemessung für Längskraft mit kleiner Ausmitte im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) durchgeführt.

System

$$l = 3 \text{ m}; h = 3 \text{ m}; b = 0,5 \text{ m}; A = 15000 \text{ cm}^2$$

$$I = \frac{3 \cdot 0,5^3}{12} = 0,03125 \text{ cm}^4$$

(Da hier zunächst ein Nachweis für unbewehrte Bauteile geführt wird, wird an dieser Stelle auf die Verwendung ideeller Querschnittswerte nach Kap. 7.4.3 bewusst verzichtet und die konstruktive Oberflächenbewehrung vernachlässigt.)

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{0,03125}{1,5}} = 0,1443 \text{ cm}$$

Betondeckung (nach Kap. 7.2.3):

$$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} = c_{\text{min}} + 10 \text{ mm} \geq d_{\text{Größtkorn}} + 5 \text{ mm}$$

mit $c_{\text{min}} \geq d_{\text{s,max}}$, $d_{\text{s,max}} = 8 \text{ mm}$ und $d_{\text{Größtkorn}} = 6 \text{ mm}$ (ILC800):

$$c_{\text{nom}} = 8 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 18 \text{ mm} \geq 6 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 11 \text{ mm}$$

gewählt: $c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$

$$d_1 = 34 \text{ mm}; d = 466 \text{ mm}$$

Baustoffe

Beton: ILC800 (nach Kap. 7.1.2 und 7.4.2)

$$f_{\text{ilck}} = 11 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{ilcd}} = \alpha_{\text{ilcc}} \frac{f_{\text{ilck}}}{\gamma_{\text{ilc}}} = 0,75 \frac{11}{1,5} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{ilcd,pl}} = \alpha_{\text{ilcc,pl}} \frac{f_{\text{ilck}}}{\gamma_{\text{ilc}}} = 0,62 \frac{11}{1,5} = 4,6 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{ilct}} = 0,87 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{ilc}} = 3900 \text{ N/mm}^2$$

Stahl: BSt500, verzinkt

$$f_{\text{y,d}} = \frac{f_{\text{y,k}}}{\gamma_{\text{s}}} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{\text{s}} = 200000 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung

Eigengewicht (nach Kap. 7.5.1)

Wichte ILC800 stahlbewehrt: 9,5 kN/m³

$$\text{Eigengewicht je Geschoss: } g_k = 9,5 \cdot 0,5 \cdot 3 = 14,3 \text{ kN/m}$$

Belastung aus Normalbeton-Geschossdecke, Spannweite 6,5 m:

$$g_k = 10 \text{ kN/m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} / 2 = 32,5 \text{ kN/m}$$

Nutzlasten für Wohnräume inkl. Trennwandzuschlag:

$$q_k = (1,5 + 1,2) \text{ kN/m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} / 2 = 8,8 \text{ kN/m}$$

$$q_d = 1,35 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 8,8 = 57 \text{ kN/m}$$

Aus Geschossdecken und Eigengewicht ILC unter Berücksichtigung des Öffnungsanteils (33 % bzw 0,33) über alle sechs Geschosse:

$$p_d = ((1,35 \cdot 14,3 + 57) \cdot 6) / (1 - 0,33) = 686,7 \text{ kN/m}$$

$$p_{d, \text{char}} = ((14,3 + 32,5 + 8,8) \cdot 6) / (1 - 0,33) = 500,4 \text{ kN/m}$$

$$p_{d, \text{perm}} = ((14,3 + 32,5 + 0,3 \cdot 8,8) \cdot 6) / (1 - 0,33) = 444,9 \text{ kN/m}$$

Schnittgrößen

$$N_{\text{Ed}} = p_d \cdot l = 686,7 \cdot 3 = 2060 \text{ kN}$$

$$N_{\text{Ed, char}} = p_{d, \text{char}} \cdot l = 500,4 \cdot 3 = 1501 \text{ kN}$$

$$N_{\text{Ed, perm}} = p_{d, \text{perm}} \cdot l = 444,9 \cdot 3 = 1335 \text{ kN}$$

Bemessung im GZT (nach Kap. 7.5)

Nachweis Längsdruckkraft mit kleiner Ausmitte (nach Kap. 7.5.2)

Unbewehrte Wände:

$$l_0 = \beta \cdot l_w = 1,0 \cdot 3 = 3$$

mit $\beta = 1,0$ für zweiseitig gehaltene Wände

$$\lambda = l_0 / i = \frac{3}{0,1443} = 20,8 \leq 86$$

d. h. Grenzschlankheit nicht überschritten

$$e_{\text{tot}} = e_0 + e_1 + e_2 = 0,125 + 0,008 + 0 = 0,133 \text{ m}$$

mit $e_0 = 0,125 \text{ m}$; näherungsweise $e_1 = l_0/400 = 0,008$; Kriechausmitte $e_2 = 0$ für $\lambda < 25$ (vgl. [31])

$$e_{\text{tot}} / h = \frac{0,133}{0,5} = 0,27 \leq 0,4$$

$$\phi = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot e_{\text{tot}} / h_w) - 0,02 \cdot l_0 / h_w = 1,14 \cdot (1 - 2 \cdot 0,133 / 0,5) - 0,02 \cdot 3 / 0,5 = 0,414$$

$$N_{\text{Rd}, \lambda} = b \cdot h_w \cdot f_{\text{ilcd}, \text{pl}} \cdot \phi = 3 \cdot 0,5 \cdot 4,6 \cdot 0,414 = 2826 \text{ kN}$$

$$N_{\text{Ed}} = 2060 \text{ kN} < N_{\text{Rd}, \lambda} = 2826 \text{ kN}$$

Bemessung im GZG (nach Kap. 7.6)

Begrenzung der Spannungen (► vgl. Kap. 7.6.1)

Begrenzung der Betondruckspannungen unter quasi-ständiger Lastkombination:

$$\sigma_c = \frac{N_{\text{Ed, perm}}}{A_c} = \frac{1335 \text{ kN}}{0,5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m}} = 0,89 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 0,45 \cdot f_{\text{ilck}} = 0,45 \cdot 11 = 4,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Zur Begrenzung der Stahlspannungen siehe Abschnitt »Begrenzung der Verformungen«.

Mindestbewehrung – zentrischer Zwang bei dickeren Bauteilen (nach Kap. 7.6.2)

$$A_{s, \text{min}} = f_{\text{ct, eff}} \cdot A_{i, \text{eff}} / \sigma_s \geq k \cdot f_{\text{ct, eff}} \cdot A_{i, \text{ct}} / f_{yk}$$

$$f_{\text{ct, eff}} = f_{\text{ilctm}} = 0,87 \text{ MPa}; \sigma_s = 200 \text{ MPa (gewählt)}$$

$$h / d_1 = 500 / 34 = 15; h_{\text{eff}} = 0,1 h + 2,0 d_1 = 0,118 \text{ m}$$

$$A_{c, \text{eff}} = h_{\text{eff}} \cdot 1 \text{ m/m} = 0,118 \text{ m}^2/\text{m};$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{\text{ilcm}}} = \frac{200000}{3900} = 51,3$$

$$\text{gewählt: } A_s = 6,7 \text{ cm}^2 / \text{m} (\varnothing 8, \text{ Abstand } 7,5 \text{ cm})$$

$$A_{i, \text{eff}} = A_{c, \text{eff}} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = \frac{0,118 \text{ m}^2}{\text{m}} + (51,3 - 1) \cdot \frac{6,7 \text{ cm}^2}{\text{m}} = 0,152 \text{ m}^2/\text{m};$$

$$A_{i, \text{ct}} = A_{\text{ct}} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = 0,5 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 1 \text{ m/m} + (51,3 - 1) \cdot \frac{6,7 \text{ cm}^2}{\text{m}} = 0,284 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$k = 0,604 \text{ (für } h = 50 \text{ cm)}$$

$$A_{s, \text{min}} = 0,87 \cdot 0,152 / 200 = 6,6 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$\geq k \cdot f_{\text{ct, eff}} \cdot A_{i, \text{ct}} / f_{yk} = 0,604 \cdot 0,87 \cdot \frac{0,284}{500} = 2,98 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$A_{s, \text{min}} = 6,6 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} < A_{s, \text{gewählt}} = 6,7 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} (\varnothing 8, \text{ Abstand } 7,5 \text{ cm})$$

Konstruktive Mindestbewehrung (► vgl. Kap. 7.8.2)

Vertikale Bewehrung:

$$N_{Ed} = 2060 \text{ kN} < 0,3 \cdot f_{lctd} \cdot A_c = 0,3 \cdot 5,5 \frac{\text{MN}}{\text{m}^2} \cdot 3 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} \\ = 2475 \text{ kN}$$

 $\lambda = 20,8 \leq 25$, d. h. keine schlanke Wand

$$A_{sv,min} = 0,15 \frac{N_{Ed}}{f_{yd}} = 0,15 \cdot \frac{2060}{43,5} = 7,1 \text{ cm}^2 \stackrel{!}{\geq} 0,0015 A_c \\ = 0,0015 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 3 \text{ m} = 22,5 \text{ cm}^2 \rightarrow 3,75 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \text{ je Seite}$$

Horizontale Bewehrung:

$$A_{sh,min} = 0,2 \cdot A_{sv,min} = 0,2 \cdot 3,75 \text{ cm}^2 = 0,75 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \text{ je Seite}$$

→ Mindestbewehrung aus zentrischem Zwang mit $6,7 \text{ cm}^2/\text{m}$ maßgebend!

$$A_{sv} = 5,29 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \cdot 3 \text{ m} \cdot 2 = 31,7 \text{ cm}^2 < 0,02 \cdot A_c \\ = 0,02 \cdot 3 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 300 \text{ cm}^2$$

→ Verbügeln nicht erforderlich.

gewählt:

vertikal: $\varnothing 8$, Abstand 13 cm

$$A_{sv} = 3,87 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ je Seite}$$

horizontal: $\varnothing 8$, Abstand 7,5 cm

$$A_{sh} = 6,7 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ je Seite}$$

Begrenzung der Rissbreite (nach Kap. 7.6.2)

Expositionsklasse XC4, korrosionsbeständige Bewehrung:

$$w_{k,max} = 0,4 \text{ mm}$$

Aus ästhetischen Gründen gewählt: $w_{k,max} = 0,3 \text{ mm}$

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

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{3,6 \cdot \rho_{l,eff}} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 \cdot f_{ct,eff}}$$

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

$$d_s = 8 \text{ mm}; f_{ct,eff} = f_{lctm} = 0,87 \text{ MPa}$$

$$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{lcm}} = \frac{200000}{3900} = 51,3$$

$$h/d_1 = 500/34 = 15; h_{eff} = 0,1 h + 2,0 d_1 = 0,118 \text{ m}$$

$$A_{c,eff} = h_{eff} \cdot 1 \text{ m/m} = 0,118 \text{ m}^2/\text{m};$$

$$A_{i,eff} = A_{c,eff} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = \frac{0,118 \text{ m}^2}{\text{m}} + (51,3 - 1) \cdot \frac{6,7 \text{ cm}^2}{\text{m}} \\ = 0,152 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$\rho_{l,eff} = \frac{A_s}{A_{i,eff}} = \frac{6,7 \text{ cm}^2/\text{m}}{0,152 \text{ m}^2/\text{m}} = 0,0044$$

$$\text{Stahlbewehrung: } \beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s - \sigma_{sr,0,95}}{f_y - \sigma_{sr,0,95}} \right); 0 < \beta_t < 0,5$$

Da hier der Rissbreitennachweis unter Ansatz von »innerem« Zwang geführt wird, darf die Dehnungsdifferenz mit $\sigma_s = \sigma_{sr}$; (Stahlspannung im Zustand II bei Erstrissbildung) ermittelt werden. Damit wird an dieser Stelle $\beta_t = 0,5$ angesetzt.

$$\sigma_s = \sigma_{sr} = f_{lctm} \cdot A_{i,eff} / A_s = 0,87 \cdot 0,152 / 6,7 \\ = 197 \text{ MPa} \approx 200 \text{ MPa}$$

(s. o., gewählt für Mindestbewehrung zentrischer Zwang)

$$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm} = \frac{197}{200000} - 0,5 \cdot \frac{0,87}{200000 \cdot 0,0044} \\ \cdot (1 + 51,3 \cdot 0,0044) = 0,000379$$

$$\stackrel{!}{\geq} \frac{0,6 \cdot \sigma_s}{E_s} = \frac{0,6 \cdot 197}{200000} = 0,000591$$

$$s_{r,max} = \frac{8}{3,6 \cdot 0,0044} = 505 \text{ mm} \stackrel{!}{\leq} \frac{197 \cdot 8}{3,6 \cdot 0,87} = 503 \text{ mm}$$

$$w_k = s_{r,max} \cdot (\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}) = 503 \cdot 0,000591 = 0,30 \leq w_{k,max} \\ = 0,3 \text{ mm}$$

Ermittlung der Kriechzahl (nach Kap. 7.4.4)

Die Betrachtung erfolgt für den Zeitpunkt $t = \infty$ bei einer relativen Luftfeuchte von $RH = 50\%$ (Innenraum). Der Belastungsbeginn erfolgt nach $t_0 = 28$ Tagen.

$$\varphi_{(\infty, t_0)} = \varphi_0$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta_{fcm} \beta_{(t_0)}$$

$$h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{u} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 3,0}{2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 3} = 429 \text{ mm}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = 1$$

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \left(\frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0,1 \cdot h_0^{1/3}} \right) \alpha_1 \right) \alpha_2 = \left(1 + \left(\frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1 \cdot 429^{1/3}} \right) 1 \right) 1 = 1,66$$

$$\beta_{fcm} = \frac{16,8}{f_{cm}^{0,5}} = \frac{16,8}{13,0^{0,5}} = 4,67$$

$$t_{0,eff} = t_0 \cdot \left[9 / (2 + t_0^{1,2}) + 1 \right]^\alpha = 24 \geq 0,5$$

$$\alpha = -1 \text{ für CEM III/A N - 32,5 LH/NA}$$

$$\beta_{(t_0)} = \frac{1}{0,1 + t_{0,eff}^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 24^{0,2}} = 0,50$$

$$\varphi_{(\infty, t_0)} = \varphi_0 = \varphi_{RH} \beta_{fcm} \beta_{(t_0)} = 1,66 \cdot 4,67 \cdot 0,50 = 3,88$$

$$E_{eff,ilc(\infty, t_0)} = \frac{E_{ilcm}}{1 + \varphi_{(\infty, t_0)}} = \frac{3900}{1 + 3,88} = 798 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Begrenzung der vertikalen Verformungen (nach Kap. 7.6.3)

gewählte Anforderung:

$$w_{\max} = \text{Geschosshöhe} / 100 = 3 \text{ m} / 100 = 3 \text{ mm}$$

► vgl. Kap. 7.6.3

Stauchung unter Berücksichtigung des Kriechens:

$$E_{eff,ilc} = \frac{E_{ilcm}}{1 + \varphi_{(t, t_0)}} = \frac{3900}{1 + 3,88} = 798 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\alpha_{s,eff} = E_s / E_{ilc,eff} = \frac{200000}{798} = 251$$

$$A_{i,eff} = A_c + (\alpha_{s,eff} - 1) \cdot A_{sv}$$

$$\text{mit } A_s = 2 \cdot 3,87 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \cdot 3 \text{ m} = 23,2 \text{ cm}^2$$

$$A_{i,eff} = 0,5 \cdot 3 \text{ m}^2 + (251 - 1) \cdot 23,2 \text{ cm}^2 = 2,08 \text{ m}^2$$

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \frac{N_{Ed,perm}}{E_{ilc,eff} \cdot A_{i,eff}} = \frac{1335 \text{ kN}}{798 \text{ MN/m}^2 \cdot 2,08 \text{ m}^2} = 0,80 \text{ mm/m}$$

Stauchung aus Schwinden:

Angesetztes Schwindmaß für ILC800 (vgl. Kap. 7.4.4):

$$\varepsilon_{ilcs} = 1,5 \text{ mm/m}$$

$$A_n = A_c - A_{sv} = 0,5 \cdot 3 \text{ m}^2 - 23,2 \text{ cm}^2 = 1,498 \text{ m}^2$$

$$\Delta \varepsilon_{s,s} = \varepsilon_{ilcs} \cdot \frac{A_n}{A_{i,eff}} = 1,5 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot \frac{1,498}{2,08} = 1,08 \text{ mm/m}$$

Stauchung gesamt:

$$\varepsilon_{ges} = \varepsilon_c(t, t_0) + \Delta \varepsilon_{s,s} = 0,80 \frac{\text{mm}}{\text{m}} + 1,08 \frac{\text{mm}}{\text{m}} = 1,88 \text{ mm/m}$$

Verkürzung des Bauteils über Höhe von 3 m:

$$w_{ges} = \varepsilon_{ges} \cdot 3 \text{ m} = 1,88 \frac{\text{mm}}{\text{m}} \cdot 3 \text{ m} = 5,64 \text{ mm} < \text{gewählt } w_{\max} = 30 \text{ mm}$$

Begrenzung der Stahlspannung:

Obwohl die Wand als unbewehrtes Bauteil im GZT betrachtet wird, wird hier auch der Spannungsnachweis für die Stahlbewehrung unter seltener Lastkombination geführt, da die Bewehrung für die Berechnung der Verformung angesetzt wird. Es ergibt sich nach Kap. 7.6.3 ein Lastanteil der Bewehrung von

$$F_s = \varepsilon_s \cdot E_s \cdot A_{sv} = N_{Ed,char} \cdot \frac{\alpha_{s,eff} \cdot A_{sv}}{A_{i,eff}} = 1501 \text{ kN} \cdot \frac{251 \cdot 23,2 \text{ cm}^2}{2,08 \text{ m}^2} = 420 \text{ kN}$$

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = \frac{420 \text{ kN}}{23,2 \text{ cm}^2} = 18,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 0,8 \cdot f_{yk} = 40 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

10.1.2 Bemessung – ILC-Balken

Vorgaben

Als Beispiel wird ein Balken aus ILC800 gemäß Tabelle 3-2 mit einer Streckenlast belastet und nach den Bemessungsvorschlägen im GZT und GZG bemessen.

System

Betrachtet wird ein Balken auf zwei Stützen.

$b = 50 \text{ cm}$; $h = 50 \text{ cm}$; $l = 3 \text{ m}$

Betondeckung (nach Kap. 7.2.3):

$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}} = c_{\text{min}} + 10 \text{ mm} \geq d_{\text{Größtkorn}} + 5 \text{ mm}$
mit $c_{\text{min}} \geq d_{\text{s,max}}$, $d_{\text{s,max}} = 12 \text{ mm}$ und $d_{\text{Größtkorn}} = 6 \text{ mm}$ (ILC800):

$c_{\text{nom}} = 12 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 22 \text{ mm} \geq 6 \text{ mm} + 5 \text{ mm}$
 $= 11 \text{ mm}$

gewählt: $c_{\text{nom}} = 30 \text{ mm}$

Ideelle Querschnittswerte gemäß Kap. 7.4.3:

Längsbewehrung Annahme: $A_s = 6,78 \text{ cm}^2$ ($6 \varnothing 12$)

$A_n = A_c - A_s = (50 \cdot 50) - 6,78 = 2493 \text{ cm}^2$

$\alpha_s = \frac{E_s}{E_{\text{ilc}}} = \frac{200\,000}{3900} = 51,3$

$A_i = A_c + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = (50 \cdot 50) + (51,3 - 1) \cdot 6,78 = 2841 \text{ cm}^2$

Annahme: $d_{\text{Bügel}} = 10 \text{ mm}$

$z_{\text{cs}} = \frac{h}{2} - c_{\text{nom}} - d_{\text{Bügel}} - \frac{d_s}{2} = 25 - 3 - 1 - \frac{1,2}{2} = 20,4 \text{ cm}$

$\Delta z_i = \frac{(\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot z_{\text{cs}}}{A_i} = \frac{(51,3 - 1) \cdot 6,78 \cdot 20,4}{2841} = 2,4 \text{ cm}$

$z_{\text{is}} = z_{\text{cs}} - \Delta z_i = 20,4 - 2,4 = 18,0 \text{ cm}$

$z_{i,\text{max,s}} = \frac{h}{2} - \Delta z_i = 25 - 2,4 = 22,6 \text{ cm}$

$I_{c,y} = \frac{50 \cdot 50^3}{12} = 520\,833,33 \text{ cm}^4$

$I_{i,y} = I_{c,y} + A_c \cdot \Delta z_i^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_s \cdot z_{\text{is}}^2 = 520\,833,33 + 2500 \cdot 2,4^2$
 $+ (51,3 - 1) \cdot 6,78 \cdot (18,0)^2 = 645\,728,35 \text{ cm}^4$

Baustoffe

Beton: ILC800 (nach Kap. 7.4.2)

$f_{\text{ilck}} = 11 \text{ N/mm}^2$

$f_{\text{ilcd}} = \alpha_{\text{ilcc}} \frac{f_{\text{ilck}}}{\gamma_{\text{ilc}}} = 0,75 \frac{11}{1,5} = 5,5 \text{ N/mm}^2$

$f_{\text{ilct}} = 0,87 \text{ N/mm}^2$

$E_{\text{ilc}} = 3900 \text{ N/mm}^2$

Stahl: BSt500, verzinkt

$f_{\text{yld}} = \frac{f_{\text{yk}}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2$

$E_s = 200\,000 \text{ N/mm}^2$

Einwirkung (nach Kap. 7.5.1)

Eigengewicht:

Wichte ILC800 stahlbewehrt: $9,5 \text{ kN/m}^3$

$g_k = 9,5 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 2,38 \text{ kN/m}$

Belastung:

Aus Normalbeton-Geschossdecke, Spannweite $6,5 \text{ m}$:

$g_k = 10 \text{ kN/m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} / 2 = 32,5 \text{ kN/m}$

Nutzlasten für Wohnräume inkl. Trennwandzuschlag:

$q_k = (1,5 + 1,2) \text{ kN/m}^2 \cdot 6,5 \text{ m} / 2 = 8,8 \text{ kN/m}$

$q_d = 1,35 \cdot 32,5 + 1,5 \cdot 8,8 = 57 \text{ kN/m}$

Aus Geschossdecken und Eigengewicht:

$p_d = 1,35 \cdot 2,38 + 57 = 60,2 \text{ kN/m}$

$p_{d,\text{char}} = 2,38 + 32,5 + 8,8 = 43,7 \text{ kN/m}$

$p_{d,\text{perm}} = 2,38 + 32,5 + 0,3 \cdot 8,8 = 37,5 \text{ kN/m}$

Schnittgrößen GZT

$$N = 0$$

$$Q = \frac{p_d l}{2} = 90,3 \text{ kN}$$

$$M = \frac{p_d l^2}{8} = 67,73 \text{ kNm}$$

Schnittgrößen GZG

$$N = 0$$

$$Q_{\text{perm}} = \frac{p_{d,\text{perm}} l}{2} = 56,28 \text{ kN}$$

$$M_{\text{char}} = \frac{p_{d,\text{char}} l^2}{8} = 49,16 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{perm}} = \frac{p_{d,\text{perm}} l^2}{8} = 42,21 \text{ kNm}$$

Bemessung im GZT (nach Kap. 7.5)**Nachweis: Biegung (nach Kap. 7.5.3)**

Betondeckung: 3 cm; $d_s = 12 \text{ mm}$; $d = 45,4 \text{ cm}$

Bewehrung (untere Lage):

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{M_{\text{Eds}}}{b d^2 f_{\text{licd}}} = \frac{6773}{50 \cdot 45,4^2 \cdot 0,55} = 0,119$$

$$\omega = 0,1303$$

$$A_{s1,\text{erf}} = \frac{1}{\sigma_{s1d}} (\omega b d f_{\text{licd}}) = \frac{1}{43,5} \cdot 0,1303 \cdot 50 \cdot 45,4 \cdot 0,55 = 3,74 \text{ cm}^2$$

$$A_{s1,\text{erf}} < A_{s,\text{vorh}} = 6,78 \text{ cm}^2$$

Duktiles Bauteilverhalten (nach Kap. 7.3), Begrenzung der bezogenen Druckzonenhöhe: $\xi_{\text{lim}} = x/d \leq 0,35$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,2607 \leq \xi_{\text{lim}} = 0,35$$

→ keine Umschnürung der Biegedruckzone erforderlich

Nachweis: Querkraft (nach Kap. 7.5.4)

Querkraft im Abstand d vom Auflager (direkte Stützung):

$$V_{\text{Ed}} = 90,3 \text{ kN} - 0,454 \text{ m} \cdot 60,2 \text{ kN/m} = 63,0 \text{ kN}$$

Querkraftwiderstand $V_{\text{IRd,c}}$ für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung:

$$\eta_1 = 0,4 + 0,6 \cdot \frac{\rho}{2200} = 0,4 + 0,6 \cdot \frac{800}{2200} = 0,618$$

$$V_{\text{IRd,c}} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \cdot k \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{\text{lick}})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{\text{cp}} \right] \cdot b_w \cdot d \geq (v_{l,\text{min}} \cdot \eta_1 + 0,12 \cdot \sigma_{\text{cp}}) \cdot b_w \cdot d$$

$$k = 1 + \sqrt{200 / d} = 1 + \sqrt{200 / 454} = 1,66 \leq 2,0$$

$$v_{l,\text{min}} = 0,035 \cdot k^2 \cdot \frac{1}{f_{\text{lick}}^2} = 0,035 \cdot 1,66^2 \cdot 11^2 = 0,137$$

$$\rho_l = A_{s1} / b_w \cdot d = \frac{6,78}{50 \cdot 45,4} = 0,0030$$

$$V_{\text{IRd,c}} = \left[\frac{0,15}{1,5} \cdot 1,66 \cdot 0,618 \cdot (100 \cdot 0,0030 \cdot 11)^{1/3} \right] \cdot 500 \cdot 454 = 34,7 \text{ kN} \geq 0,137 \cdot 0,618 \cdot 500 \cdot 454 = 19,2 \text{ kN}$$

$$\rightarrow V_{\text{IRd,c}} = 34,7 \text{ kN} \leq 63,0 = V_{\text{Ed}}$$

Querkraftbewehrung ist erforderlich!

Querkraftwiderstand $V_{\text{IRd,max}}$ für Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung:

$$z = \zeta \cdot d = 0,9131 \cdot 45,4 = 41,5 \text{ cm}$$

$$v_l = 0,75 \cdot \eta_1 = 0,75 \cdot 0,618 = 0,464$$

$$V_{\text{IRd,max}} = \alpha_{\text{cw}} \cdot v_l \cdot f_{\text{cd}} \cdot b_w \cdot z \cdot \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{(1 + \cot^2 \theta)} = 1,0 \cdot 0,464 \cdot 5,5 \cdot 500 \cdot 41,5 \cdot \frac{1,2 + 0}{1 + 1,2^2}$$

$$V_{\text{IRd,max}} = 260,4 \text{ kN} \geq 63,0 \text{ kN} = V_{\text{Ed}}$$

Tragwiderstand ausreichend!

$$V_{\text{Rd,s}} = a_{\text{sw}} \cdot f_{\text{ywd}} \cdot z \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$a_{\text{sw}} = \frac{V_{\text{Ed,w}}}{\cot \theta \cdot f_{\text{yd}} \cdot z} = \frac{63,0}{1,2 \cdot 43,5 \cdot 0,415} = 2,91 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Bemessung im GZG (nach Kap. 7.6)**Ermittlung der Kriechzahl (nach Kap. 7.4.4)**

Die Kriechzahl wird zum Zeitpunkt $t = \infty$ berechnet. Es wird von einer relativen Luftfeuchte von $\text{RH} = 50 \%$ im Innenraum

ausgegangen. Nur die obere Seite des Balkens ist bedeckt.
Der Belastungsbeginn erfolgt nach $t_0 = 28$ Tagen.

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta_{fcm} \beta_{(t_0)}$$

$$h_0 = 2 \cdot \frac{A_c}{u} = \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{3 \cdot 0,5} = 333 \text{ mm}$$

$$\alpha_1, \alpha_2 = 1$$

$$\varphi_{RH} = \left(1 + \left(\frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0,1 \cdot h_0^{1/3}} \right) \alpha_1 \right) \alpha_2 = \left(1 + \left(\frac{1 - \frac{50}{100}}{0,1 \cdot 333^{1/3}} \right) 1 \right) 1 = 1,72$$

$$\beta_{fcm} = \frac{16,8}{f_{cm}^{0,5}} = \frac{16,8}{13,0^{0,5}} = 4,67$$

$$t_{0,eff} = t_0 \cdot \left[9 / (2 + t_0^{1,2}) + 1 \right]^\alpha = 24 \geq 0,5$$

$$\alpha = -1 \text{ für CEM III/A N - 32,5 LH/NA}$$

$$\beta_{(t_0)} = \frac{1}{0,1 + t_{0,eff}^{0,2}} = \frac{1}{0,1 + 24^{0,2}} = 0,50$$

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 = \varphi_{RH} \beta_{fcm} \beta_{(t_0)} = 1,72 \cdot 4,67 \cdot 0,50 = 4,04$$

$$E_{eff,ilc(t,t_0)} = \frac{E_{ilcm}}{1 + \varphi(t,t_0)} = \frac{3900}{1 + 4,04} = 774 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Begrenzung der Spannungen (nach Kap. 7.6.1)

$$\sigma_c \leq 0,45 f_{ilc,k} = 0,45 \cdot 11 = 4,95 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Endkriechzahl } \varphi_{(\infty, t_0)} = 4,04$$

$$E_{eff,ilc(t,t_0)} = \frac{E_{ilcm}}{1 + \varphi(t,t_0)} = \frac{3900}{1 + 4,04} = 774 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\alpha_{e,\infty} = \frac{E_s}{E_{eff,ilc(t,t_0)}} = \frac{200000}{774} = 258,4$$

$$\rho_l = A_{sl} / b_w \cdot d = \frac{6,78}{50 \cdot 45,4} = 0,0030$$

$$\alpha_{e,\infty} \cdot \rho_l = 258,4 \cdot 0,0030 = 0,775$$

$$\xi_\infty = \sqrt{\alpha_{e,\infty} \cdot \rho_l \cdot (2 + \alpha_{e,\infty} \cdot \rho_l)} - \alpha_{e,\infty} \cdot \rho_l \\ = \sqrt{0,775 \cdot (2 + 0,775)} - 0,775 = 0,692$$

$$x_\infty = \xi_\infty \cdot d = 0,692 \cdot 45,4 = 31,4 \text{ cm}$$

$$z_\infty = d - \frac{x_\infty}{3} = 45,4 - \frac{31,4}{3} = 34,9 \text{ cm}$$

$$\sigma_c = \frac{2 M_{perm}}{b x_\infty z_\infty} = \frac{2 \cdot 42,21}{0,5 \cdot 0,314 \cdot 0,349} \\ = 1,54 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 0,45 f_{ilc,k} = 4,95 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_s = \frac{M_{char}}{z_\infty A_s} = \frac{49,16}{0,349 \cdot 6,78} = 208 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 400 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 0,8 \cdot f_{y,k}$$

Mindestbewehrung für Biegebauteile

$$A_{s,min} \sigma_s = k_c k f_{lct} A_{i,ct}$$

$$k_c = 0,4 \text{ (reine Biegung)}$$

$$k = 0,604 \text{ (für } h = 50 \text{ cm)}$$

$$d_s = 12 \text{ mm}; h_{cr} = \frac{h}{2} = 0,25 \text{ m}$$

$$A_{ct} = 0,5 \cdot b \cdot h = 0,5 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m} = 0,159 \text{ m}^2$$

$$A_{i,ct} = A_{ct} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = 0,125 \text{ m}^2 + (51,3 - 1) \cdot 6,78 \text{ cm}^2 \\ = 0,159 \text{ m}^2$$

(► vgl. Kap. 7.6.2)

$$\sigma_s = 160 \text{ N/mm}^2 \text{ (gewählt für } w_k = 3 \text{ mm)}$$

$$\text{Grenzdurchmesser } d_s^* = 41 \text{ mm gemäß [31], Tafel 5.97a}$$

$$A_{s,min} = k_c k f_{lct} \frac{A_{i,ct}}{\sigma_s} = 0,4 \cdot 0,604 \cdot 0,87 \cdot \frac{0,159}{160} = 2,09 \text{ cm}^2$$

$$A_{s,min} = 2,09 \text{ cm}^2 < A_{s,vorh} = 6,78 \text{ cm}^2$$

$$d_s = d_s^* \cdot \frac{k_c \cdot k \cdot h_{cr}}{4 \cdot (h - d)} \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{ct0}} \geq d_s^* \cdot \frac{f_{ct,eff}}{f_{ct0}}$$

$$d_s = 41 \cdot \frac{0,4 \cdot 0,604 \cdot 25}{4 \cdot (50 - 45,4)} \cdot \frac{0,87}{2,9} = 4,0 \text{ mm} \stackrel{!}{\geq} 41 \cdot \frac{0,87}{2,9} \\ = 12,3 \text{ mm}$$

$$d_s = 12,3 \text{ mm} > d_{s,vorh} = 12 \text{ mm}$$

→ Kontrolle durch direkte Berechnung der Rissbreiten

Begrenzung der Rissbreiten (nach Kap. 7.6.2)

Expositionsklasse XC4, korrosionsbeständige Bewehrung:

$$w_{k,max} = 0,4 \text{ mm}$$

Aus ästhetischen Gründen gewählt: $w_{k,max} = 0,3 \text{ mm}$

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

$$\frac{h}{d_1} = \frac{50}{4,6} = 10,87$$

$$h_{eff} = 0,05 h + 2,0 \cdot d_1 = 0,05 \cdot 50 + 2,0 \cdot 4,6 = 11,7 \text{ cm}$$

$$A_{c,eff} = h_{eff} \cdot b = 11,7 \cdot 50 = 585 \text{ cm}^2$$

$$A_{i,eff} = A_{c,eff} + (\alpha_s - 1) \cdot A_s = 585 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} + (51,3 - 1) \cdot 6,78 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} = 926 \text{ cm}^2$$

$$\rho_{i,eff} = \frac{A_s}{A_{i,eff}} = \frac{6,78}{926} = 0,0073$$

$$f_{ct,eff} = f_{lctm} = 0,87 \text{ MPa}$$

$$\sigma_s = \frac{M_{perm}}{z_{\infty} A_s} = \frac{42,21}{0,349 \cdot 6,78} = 178,1 \text{ N/mm}^2$$

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

$$s_{r,max} = \frac{12}{3,6 \cdot 0,0073} = 455 \text{ mm} \leq \frac{178,1 \cdot 12}{3,6 \cdot 0,87} = 682 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sr,0,95} = 1,3 \cdot f_{lctm} \cdot A_{i,eff} / A_s = 1,3 \cdot 0,87 \cdot \frac{926}{6,78} = 154,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_s - \sigma_{sr,0,95}}{f_{yk} - \sigma_{sr,0,95}} \right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{178,1 - 154,5}{500 - 154,5} \right) = 0,466$$

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

$$\alpha_e \text{ bzw. } \alpha_s = \frac{E_s}{E_{ilc}} = \frac{200\,000}{3\,900} = 51,3$$

An dieser Stelle wird bewusst mit α_e und nicht mit $\alpha_{e,\infty}$ gerechnet, um auf der sicheren Seite eine Verringerung der Rissbreite durch Zugkriechen nicht zu berücksichtigen.

$$(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = \frac{178,1}{200\,000} - 0,466 \cdot \frac{0,87}{200\,000 \cdot 0,0073}$$

$$\cdot (1 + 51,3 \cdot 0,0073) \geq \frac{0,6 \cdot 178,1}{200\,000}$$

$$= 0,000509 \geq 0,000534$$

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 455 \text{ mm} \cdot 0,000534 = 0,24 \text{ mm} < w_{k,max}$$

Der Rissbreitennachweis wird für $A_{s,vorh} = 6,78 \text{ cm}^2$ erfüllt. Eine Reduktion der Bewehrung auf z.B. 5 statt 6Ø12 ist jedoch nicht möglich, da dann die maximale Rissbreite überschritten würde.

Auswirkungen des Schwindens (nach Kap. 7.6.4)

Angesetztes Schwindmaß für ILC800 (► vgl. Kap. 7.4.4):

$$\varepsilon_{ilcs} = 1,5 \text{ mm/m}$$

$$\alpha_{s,\infty} = \alpha_{e,\infty} = \frac{E_s}{E_{eff,ilc(t,t_0)}} = \frac{200\,000}{774} = 258,4$$

$$N_{cs} = \varepsilon_{ilcs} \cdot E_s \cdot A_s = 1,5 \text{ mm/m} \cdot 200\,000 \cdot 6,78 = 203,4 \text{ kN}$$

$$M_{cs} = N_{cs} \cdot z_{i,s} = 203,3 \cdot 0,180 = 36,6 \text{ kNm}$$

Durchbiegung infolge Last (nach Kap. 7.6.3), Kriechen und Schwinden (nach Kap. 7.6.4)

Grenzwerte:

$$f \leq \frac{l}{250} = \frac{3000}{250} = 12 \text{ mm (allgemein)}$$

$$w \leq \frac{l}{500} = \frac{3000}{500} = 6 \text{ mm (Innenausbau)}$$

Träger auf zwei Stützen:

$$w = k \cdot \left(\frac{M}{EI''} - \beta_t \cdot \left(\frac{M_{cr,i}}{EI''} - \frac{M_{cr,j}}{EI_i} \right) \right) \cdot l_{eff}^2, k = \frac{5}{48} \cdot l_{eff} = 3 \text{ m}$$

$$M_{cr,i} = f_{lctm} \cdot \frac{l_{i,s}}{z_{i,max,s}}$$

$$z_{i,max,s} = 22,6 \text{ cm}$$

$$I_{i,s} = I_{i,y} = 645728,35 \text{ cm}^4$$

$$f_{lctm} = 0,87 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{cr,i} = f_{lctm} \cdot \frac{I_{i,s}}{Z_{i,max,s}} = 0,087 \cdot \frac{645728,35}{22,6} = 24,9 \text{ kNm}$$

$$I'' = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot z_s \cdot (d - x)$$

$$\alpha_s = \alpha_{e,eff} = 258,4$$

$$A_{s1} = 6,78 \text{ cm}^2$$

$$z_s = z_\infty = 34,9 \text{ cm}$$

$$d = 45,4 \text{ cm}$$

$$x = x_\infty = 31,4 \text{ cm}$$

$$I'' = 258,4 \cdot 6,78 \cdot 34,9 \cdot (45,4 - 31,4) = 856003,75 \text{ cm}^4$$

$$\beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{M - 1,3 \cdot M_{cr,i}}{M_y - 1,3 \cdot M_{cr,i}} \right)$$

$$M_y = f_{yd} \cdot A_s \cdot z_s = 43,5 \cdot 6,78 \cdot 34,9 = 102,9 \text{ kNm}$$

Moment aus Last und Schwinden:

$$M = M_{perm} + M_{cs} = 42,21 + 36,6 = 78,8 \text{ kNm}$$

$$\beta_t = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{M - 1,3 \cdot M_{cr,i}}{M_y - 1,3 \cdot M_{cr,i}} \right) = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{78,8 - 1,3 \cdot 24,9}{102,9 - 1,3 \cdot 24,9} \right) = 0,171$$

$$E_{eff,ilc(t,t_0)} = 774 \text{ N/mm}^2$$

$$EI'' = 77,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 856003,75 \text{ cm}^4 = 6625,5 \text{ kNm}^2$$

$$EI_i = 77,4 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 645728,35 \text{ cm}^4 = 4997,9 \text{ kNm}^2$$

$$w = k \cdot \left(\frac{M}{EI''} - \beta_t \cdot \left(\frac{M_{cr,i}}{EI''} - \frac{M_{cr,i}}{EI_i} \right) \right) \cdot l_{eff}^2$$

$$= \frac{5}{48} \cdot \left(\frac{78,4}{6625,5} - 0,174 \cdot \left(\frac{24,9}{6625,5} - \frac{24,9}{4997,9} \right) \right) \cdot 3^2$$

$$= 11,3 \text{ mm}$$

$$w = 11,3 \text{ mm} \begin{cases} \leq f = 12 \text{ mm} = \frac{l}{250} \\ \leq w = 6 \text{ mm} = \frac{l}{500} \end{cases}$$

→ Die Anforderungen an den maximalen Durchhang f werden erfüllt. Im Hinblick auf die Einhaltung der maximalen Durchbiegung w für Ausbauten wird empfohlen, das Bauteil mit Überhöhung zu betonieren.

10.2 ω -Tafeln als Bemessungshilfe

ILC600 Stahlbewehrung (ST)

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	2,50	434,8	0	0,333
0,010	0,0101	0,0432	0,9856	-0,11	2,50	434,8	0,235	0,333
0,015	0,0153	0,0527	0,9824	-0,14	2,50	434,8	0,290	0,333
0,020	0,0204	0,0608	0,9797	-0,16	2,50	434,8	0,336	0,333
0,025	0,0256	0,0677	0,9774	-0,18	2,50	434,8	0,378	0,333
0,030	0,0308	0,0739	0,9754	-0,20	2,50	434,8	0,416	0,333
0,035	0,0360	0,0797	0,9734	-0,22	2,50	434,8	0,451	0,333
0,040	0,0412	0,0851	0,9716	-0,23	2,50	434,8	0,484	0,333
0,045	0,0464	0,0929	0,9690	-0,24	2,34	434,8	0,500	0,333
0,050	0,0518	0,1036	0,9655	-0,24	2,08	434,8	0,500	0,333
0,055	0,0572	0,1144	0,9619	-0,24	1,86	434,8	0,500	0,333
0,060	0,0626	0,1252	0,9583	-0,24	1,68	434,8	0,500	0,333
0,065	0,0681	0,1362	0,9546	-0,24	1,52	434,8	0,500	0,333
0,070	0,0736	0,1472	0,9509	-0,24	1,39	434,8	0,500	0,333
0,075	0,0792	0,1584	0,9472	-0,24	1,28	434,8	0,500	0,333
0,080	0,0848	0,1696	0,9435	-0,24	1,18	434,8	0,500	0,333
0,085	0,0905	0,1809	0,9397	-0,24	1,09	434,8	0,500	0,333
0,090	0,0962	0,1923	0,9359	-0,24	1,01	434,8	0,500	0,333
0,095	0,1019	0,2039	0,9320	-0,24	0,94	434,8	0,500	0,333
0,100	0,1077	0,2155	0,9282	-0,24	0,87	434,8	0,500	0,333
0,105	0,1136	0,2272	0,9243	-0,24	0,82	434,8	0,500	0,333
0,110	0,1195	0,2390	0,9203	-0,24	0,76	434,8	0,500	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,24	0,72	434,8	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,24	0,67	434,8	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,24	0,63	434,8	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,24	0,59	434,8	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,24	0,56	434,8	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,24	0,53	434,8	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,24	0,50	434,8	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,24	0,47	434,8	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,24	0,44	434,8	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,24	0,42	434,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,24	0,40	434,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,24	0,37	434,8	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,24	0,35	434,8	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,24	0,33	434,8	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,24	0,32	434,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,24	0,30	434,8	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,24	0,28	434,8	0,500	0,333

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,24	0,26	434,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,24	0,25	434,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,24	0,24	434,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,24	0,22	434,8	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,24	0,21	361,9	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,24	0,20	339,7	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,24	0,18	318,4	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,24	0,17	298,0	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,24	0,16	278,3	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,24	0,15	259,3	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,24	0,14	241,0	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,24	0,13	223,3	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,24	0,12	206,2	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,24	0,11	189,6	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,24	0,10	173,6	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,24	0,09	158,0	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,24	0,08	142,9	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,24	0,07	128,1	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,24	0,07	113,7	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,24	0,06	99,7	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,24	0,05	86,0	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,24	0,04	72,5	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,24	0,03	59,4	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,24	0,03	46,4	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,24	0,02	33,6	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,24	0,01	20,9	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,24	0	8,4	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,24	0	-4,2	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,24	-0,01	-16,7	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,24	-0,02	-29,4	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,24	-0,02	-42,3	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,24	-0,03	-55,6	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,24	-0,04	-69,6	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,24	-0,05	-84,8	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,24	-0,06	-102,8	0,500	0,333

ILC650 Stahlbewehrung (ST)

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	2,50	434,8	0	0,333
0,010	0,0102	0,0457	0,9848	-0,12	2,50	434,8	0,222	0,333
0,015	0,0153	0,0558	0,9814	-0,15	2,50	434,8	0,274	0,333
0,020	0,0204	0,0643	0,9786	-0,17	2,50	434,8	0,318	0,333
0,025	0,0256	0,0716	0,9761	-0,19	2,50	434,8	0,358	0,333
0,030	0,0308	0,0783	0,9739	-0,21	2,50	434,8	0,394	0,333
0,035	0,0360	0,0843	0,9719	-0,23	2,50	434,8	0,427	0,333
0,040	0,0412	0,0900	0,9700	-0,25	2,50	434,8	0,458	0,333
0,045	0,0465	0,0952	0,9683	-0,26	2,50	434,8	0,488	0,333
0,050	0,0518	0,1036	0,9655	-0,27	2,34	434,8	0,500	0,333
0,055	0,0572	0,1144	0,9619	-0,27	2,09	434,8	0,500	0,333
0,060	0,0626	0,1252	0,9583	-0,27	1,89	434,8	0,500	0,333
0,065	0,0681	0,1362	0,9546	-0,27	1,71	434,8	0,500	0,333
0,070	0,0736	0,1472	0,9509	-0,27	1,56	434,8	0,500	0,333
0,075	0,0792	0,1584	0,9472	-0,27	1,43	434,8	0,500	0,333
0,080	0,0848	0,1696	0,9435	-0,27	1,32	434,8	0,500	0,333
0,085	0,0905	0,1809	0,9397	-0,27	1,22	434,8	0,500	0,333
0,090	0,0962	0,1923	0,9359	-0,27	1,13	434,8	0,500	0,333
0,095	0,1019	0,2039	0,9320	-0,27	1,05	434,8	0,500	0,333
0,100	0,1077	0,2155	0,9282	-0,27	0,98	434,8	0,500	0,333
0,105	0,1136	0,2272	0,9243	-0,27	0,92	434,8	0,500	0,333
0,110	0,1195	0,2390	0,9203	-0,27	0,86	434,8	0,500	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,27	0,81	434,8	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,27	0,76	434,8	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,27	0,71	434,8	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,27	0,67	434,8	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,27	0,63	434,8	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,27	0,59	434,8	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,27	0,56	434,8	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,27	0,53	434,8	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,27	0,50	434,8	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,27	0,47	434,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,27	0,45	434,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,27	0,42	434,8	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,27	0,40	434,8	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,27	0,38	434,8	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,27	0,35	434,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,27	0,33	434,8	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,27	0,32	434,8	0,500	0,333

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,27	0,30	434,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,27	0,28	434,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,27	0,26	434,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,27	0,25	434,8	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,27	0,23	434,8	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,27	0,22	434,8	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,27	0,21	358,2	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,27	0,19	335,2	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,27	0,18	313,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,27	0,17	291,7	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,27	0,16	271,1	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,27	0,14	251,2	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,27	0,13	232,0	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,27	0,12	213,3	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,27	0,11	195,3	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,27	0,10	177,8	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,27	0,09	160,7	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,27	0,08	144,1	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,27	0,07	128,0	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,27	0,06	112,2	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,27	0,06	96,7	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,27	0,05	81,6	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,27	0,04	66,8	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,27	0,03	52,2	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,27	0,02	37,8	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,27	0,01	23,5	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,27	0,01	9,4	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,27	0	-4,7	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,27	-0,01	-18,8	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,27	-0,02	-33,1	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,27	-0,03	-47,6	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,27	-0,04	-62,5	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,27	-0,05	-78,3	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,27	-0,05	-95,4	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,27	-0,07	-115,7	0,500	0,333

ILC700 Stahlbewehrung (ST)

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	2,50	434,8	0	0,333
0,010	0,0102	0,0482	0,9839	-0,13	2,50	434,8	0,211	0,333
0,015	0,0153	0,0588	0,9804	-0,16	2,50	434,8	0,260	0,333
0,020	0,0205	0,0677	0,9774	-0,18	2,50	434,8	0,302	0,333
0,025	0,0256	0,0754	0,9749	-0,20	2,50	434,8	0,340	0,333
0,030	0,0308	0,0824	0,9725	-0,22	2,50	434,8	0,375	0,333
0,035	0,0361	0,0888	0,9704	-0,24	2,50	434,8	0,406	0,333
0,040	0,0413	0,0947	0,9684	-0,26	2,50	434,8	0,436	0,333
0,045	0,0466	0,1002	0,9666	-0,28	2,50	434,8	0,465	0,333
0,050	0,0518	0,1055	0,9648	-0,29	2,50	434,8	0,491	0,333
0,055	0,0572	0,1144	0,9619	-0,30	2,32	434,8	0,500	0,333
0,060	0,0626	0,1252	0,9583	-0,30	2,10	434,8	0,500	0,333
0,065	0,0681	0,1362	0,9546	-0,30	1,90	434,8	0,500	0,333
0,070	0,0736	0,1472	0,9509	-0,30	1,74	434,8	0,500	0,333
0,075	0,0792	0,1584	0,9472	-0,30	1,59	434,8	0,500	0,333
0,080	0,0848	0,1696	0,9435	-0,30	1,47	434,8	0,500	0,333
0,085	0,0905	0,1809	0,9397	-0,30	1,36	434,8	0,500	0,333
0,090	0,0962	0,1923	0,9359	-0,30	1,26	434,8	0,500	0,333
0,095	0,1019	0,2039	0,9320	-0,30	1,17	434,8	0,500	0,333
0,100	0,1077	0,2155	0,9282	-0,30	1,09	434,8	0,500	0,333
0,105	0,1136	0,2272	0,9243	-0,30	1,02	434,8	0,500	0,333
0,110	0,1195	0,2390	0,9203	-0,30	0,95	434,8	0,500	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,30	0,90	434,8	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,30	0,84	434,8	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,30	0,79	434,8	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,30	0,74	434,8	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,30	0,70	434,8	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,30	0,66	434,8	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,30	0,62	434,8	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,30	0,59	434,8	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,30	0,55	434,8	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,30	0,52	434,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,30	0,49	434,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,30	0,47	434,8	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,30	0,44	434,8	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,30	0,42	434,8	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,30	0,39	434,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,30	0,37	434,8	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,30	0,35	434,8	0,500	0,333

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,3	0,33	434,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,3	0,31	434,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,3	0,29	434,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,3	0,28	434,8	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,3	0,26	434,8	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,3	0,24	434,8	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,3	0,23	434,8	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,3	0,21	372,4	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,3	0,20	347,8	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,3	0,19	324,1	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,3	0,17	301,2	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,3	0,16	279,1	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,3	0,15	257,7	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,3	0,14	237,0	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,3	0,12	217,0	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,3	0,11	197,5	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,3	0,10	178,6	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,3	0,09	160,1	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,3	0,08	142,2	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,3	0,07	124,6	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,3	0,06	107,5	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,3	0,05	90,7	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,3	0,04	74,2	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,3	0,03	58,0	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,3	0,02	42,0	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,3	0,02	26,1	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,3	0,01	10,4	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,3	0	-5,2	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,3	-0,01	-20,9	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,3	-0,02	-36,7	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,3	-0,03	-52,8	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,3	-0,04	-69,5	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,3	-0,05	-87,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,3	-0,06	-106,0	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,3	-0,07	-128,5	0,500	0,333

ILC750 Stahlbewehrung (ST)

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	2,50	434,8	0	0,333
0,010	0,0102	0,0497	0,9834	-0,13	2,50	434,8	0,204	0,333
0,015	0,0153	0,0606	0,9798	-0,16	2,50	434,8	0,253	0,333
0,020	0,0205	0,0698	0,9767	-0,19	2,50	434,8	0,293	0,333
0,025	0,0257	0,0778	0,9741	-0,21	2,50	434,8	0,330	0,333
0,030	0,0309	0,0850	0,9717	-0,23	2,50	434,8	0,363	0,333
0,035	0,0361	0,0916	0,9695	-0,25	2,50	434,8	0,394	0,333
0,040	0,0413	0,0977	0,9674	-0,27	2,50	434,8	0,423	0,333
0,045	0,0466	0,1034	0,9655	-0,29	2,50	434,8	0,451	0,333
0,050	0,0519	0,1088	0,9637	-0,31	2,50	434,8	0,477	0,333
0,055	0,0572	0,1144	0,9619	-0,32	2,48	434,8	0,500	0,333
0,060	0,0626	0,1252	0,9583	-0,32	2,24	434,8	0,500	0,333
0,065	0,0681	0,1362	0,9546	-0,32	2,03	434,8	0,500	0,333
0,070	0,0736	0,1472	0,9509	-0,32	1,85	434,8	0,500	0,333
0,075	0,0792	0,1584	0,9472	-0,32	1,70	434,8	0,500	0,333
0,080	0,0848	0,1696	0,9435	-0,32	1,57	434,8	0,500	0,333
0,085	0,0905	0,1809	0,9397	-0,32	1,45	434,8	0,500	0,333
0,090	0,0962	0,1923	0,9359	-0,32	1,34	434,8	0,500	0,333
0,095	0,1019	0,2039	0,9320	-0,32	1,25	434,8	0,500	0,333
0,100	0,1077	0,2155	0,9282	-0,32	1,17	434,8	0,500	0,333
0,105	0,1136	0,2272	0,9243	-0,32	1,09	434,8	0,500	0,333
0,110	0,1195	0,2390	0,9203	-0,32	1,02	434,8	0,500	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,32	0,95	434,8	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,32	0,90	434,8	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,32	0,84	434,8	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,32	0,79	434,8	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,32	0,75	434,8	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,32	0,70	434,8	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,32	0,66	434,8	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,32	0,63	434,8	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,32	0,59	434,8	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,32	0,56	434,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,32	0,53	434,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,32	0,50	434,8	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,32	0,47	434,8	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,32	0,44	434,8	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,32	0,42	434,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,32	0,40	434,8	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,32	0,37	434,8	0,500	0,333

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,32	0,35	434,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,32	0,33	434,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,32	0,31	434,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,32	0,30	434,8	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,32	0,28	434,8	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,32	0,26	434,8	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,32	0,24	434,8	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,32	0,23	434,8	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,32	0,21	371,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,32	0,20	345,7	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,32	0,18	321,3	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,32	0,17	297,7	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,32	0,16	274,9	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,32	0,15	252,9	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,32	0,13	231,4	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,32	0,12	210,7	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,32	0,11	190,5	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,32	0,10	170,8	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,32	0,09	151,6	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,32	0,08	132,9	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,32	0,07	114,6	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,32	0,06	96,7	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,32	0,05	79,1	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,32	0,04	61,8	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,32	0,03	44,8	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,32	0,02	27,9	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,32	0,01	11,1	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,32	0	-5,6	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,32	-0,01	-22,3	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,32	-0,02	-39,2	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,32	-0,03	-56,4	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,32	-0,04	-74,1	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,32	-0,05	-92,8	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,32	-0,07	-113,1	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,32	-0,08	-137,1	0,500	0,333

ILC800 Stahlbewehrung (ST)

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	2,50	434,8	0	0,333
0,010	0,0102	0,0520	0,9827	-0,14	2,50	434,8	0,196	0,333
0,015	0,0153	0,0633	0,9789	-0,17	2,50	434,8	0,242	0,333
0,020	0,0205	0,0729	0,9757	-0,20	2,50	434,8	0,281	0,333
0,025	0,0257	0,0812	0,9729	-0,22	2,50	434,8	0,316	0,333
0,030	0,0309	0,0887	0,9704	-0,24	2,50	434,8	0,349	0,333
0,035	0,0362	0,0957	0,9681	-0,26	2,50	434,8	0,378	0,333
0,040	0,0414	0,1020	0,9660	-0,28	2,50	434,8	0,406	0,333
0,045	0,0467	0,1080	0,9640	-0,30	2,50	434,8	0,432	0,333
0,050	0,0520	0,1135	0,9622	-0,32	2,50	434,8	0,458	0,333
0,055	0,0573	0,1189	0,9604	-0,34	2,50	434,8	0,481	0,333
0,060	0,0626	0,1252	0,9583	-0,35	2,44	434,8	0,500	0,333
0,065	0,0681	0,1362	0,9546	-0,35	2,22	434,8	0,500	0,333
0,070	0,0736	0,1472	0,9509	-0,35	2,03	434,8	0,500	0,333
0,075	0,0792	0,1584	0,9472	-0,35	1,86	434,8	0,500	0,333
0,080	0,0848	0,1696	0,9435	-0,35	1,71	434,8	0,500	0,333
0,085	0,0905	0,1809	0,9397	-0,35	1,58	434,8	0,500	0,333
0,090	0,0962	0,1923	0,9359	-0,35	1,47	434,8	0,500	0,333
0,095	0,1019	0,2039	0,9320	-0,35	1,37	434,8	0,500	0,333
0,100	0,1077	0,2155	0,9282	-0,35	1,27	434,8	0,500	0,333
0,105	0,1136	0,2272	0,9243	-0,35	1,19	434,8	0,500	0,333
0,110	0,1195	0,2390	0,9203	-0,35	1,11	434,8	0,500	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,35	1,04	434,8	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,35	0,98	434,8	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,35	0,92	434,8	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,35	0,87	434,8	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,35	0,82	434,8	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,35	0,77	434,8	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,35	0,73	434,8	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,35	0,69	434,8	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,35	0,65	434,8	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,35	0,61	434,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,35	0,58	434,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,35	0,55	434,8	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,35	0,52	434,8	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,35	0,49	434,8	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,35	0,46	434,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,35	0,43	434,8	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,35	0,41	434,8	0,500	0,333

μ_{Eds}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{s1} [%]	σ_{sd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,35	0,39	434,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,35	0,36	434,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,35	0,34	434,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,35	0,32	434,8	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,35	0,30	434,8	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,35	0,28	434,8	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,35	0,27	434,8	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,35	0,25	434,8	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,35	0,23	434,8	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,35	0,22	434,8	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,35	0,20	351,4	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,35	0,19	325,6	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,35	0,17	300,7	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,35	0,16	276,6	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,35	0,15	253,1	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,35	0,13	230,4	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,35	0,12	208,3	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,35	0,11	186,8	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,35	0,10	165,9	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,35	0,08	145,4	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,35	0,07	125,4	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,35	0,06	105,8	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,35	0,05	86,6	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,35	0,04	67,6	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,35	0,03	49,0	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,35	0,02	30,5	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,35	0,01	12,2	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,35	0	-6,1	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,35	-0,01	-24,4	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,35	-0,02	-42,9	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,35	-0,04	-61,7	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,35	-0,05	-81,0	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,35	-0,06	-101,4	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,35	-0,07	-123,7	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,35	-0,09	-149,9	0,500	0,333

ILC600 Glasfaserbewehrung (GF)

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	0,74	444,0	0	0,333
0,010	0,0103	0,0781	0,9740	-0,06	0,74	444,0	0,131	0,333
0,015	0,0155	0,0954	0,9682	-0,08	0,74	444,0	0,162	0,333
0,020	0,0208	0,1096	0,9635	-0,09	0,74	444,0	0,189	0,333
0,025	0,0261	0,1219	0,9594	-0,10	0,74	444,0	0,214	0,333
0,030	0,0314	0,1329	0,9557	-0,11	0,74	444,0	0,236	0,333
0,035	0,0367	0,1427	0,9524	-0,12	0,74	444,0	0,257	0,333
0,040	0,0421	0,1521	0,9493	-0,13	0,74	444,0	0,277	0,333
0,045	0,0475	0,1609	0,9464	-0,14	0,74	444,0	0,296	0,333
0,050	0,0530	0,1690	0,9437	-0,15	0,74	444,0	0,314	0,333
0,055	0,0584	0,1766	0,9411	-0,16	0,74	444,0	0,331	0,333
0,060	0,0639	0,1839	0,9387	-0,17	0,74	444,0	0,347	0,333
0,065	0,0694	0,1908	0,9364	-0,17	0,74	444,0	0,364	0,333
0,070	0,0749	0,1975	0,9342	-0,18	0,74	444,0	0,379	0,333
0,075	0,0805	0,2038	0,9321	-0,19	0,74	444,0	0,395	0,333
0,080	0,0860	0,2098	0,9301	-0,20	0,74	444,0	0,410	0,333
0,085	0,0916	0,2158	0,9281	-0,20	0,74	444,0	0,424	0,333
0,090	0,0972	0,2215	0,9262	-0,21	0,74	444,0	0,438	0,333
0,095	0,1028	0,2269	0,9244	-0,22	0,74	444,0	0,453	0,333
0,100	0,1084	0,2323	0,9226	-0,22	0,74	444,0	0,467	0,333
0,105	0,1140	0,2375	0,9208	-0,23	0,74	444,0	0,480	0,333
0,110	0,1197	0,2425	0,9192	-0,24	0,74	444,0	0,493	0,333
0,115	0,1255	0,2510	0,9163	-0,24	0,72	430,0	0,500	0,333
0,120	0,1315	0,2631	0,9123	-0,24	0,67	403,0	0,500	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,24	0,63	379,0	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,24	0,59	357,0	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,24	0,56	336,0	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,24	0,53	317,0	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,24	0,50	299,0	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,24	0,47	282,0	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,24	0,44	266,0	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,24	0,42	251,0	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,24	0,40	237,0	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,24	0,37	224,0	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,24	0,35	212,0	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,24	0,33	200,0	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,24	0,32	189,0	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,24	0,30	179,0	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,24	0,28	169,0	0,500	0,333

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,24	0,26	159,0	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,24	0,25	150,0	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,24	0,24	141,0	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,24	0,22	133,0	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,24	0,21	125,0	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,24	0,20	117,0	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,24	0,18	110,0	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,24	0,17	103,0	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,24	0,16	96,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,24	0,15	89,0	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,24	0,14	83,0	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,24	0,13	77,0	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,24	0,12	71,0	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,24	0,11	65,0	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,24	0,10	60,0	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,24	0,09	55,0	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,24	0,08	49,0	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,24	0,07	44,0	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,24	0,07	39,0	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,24	0,06	34,0	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,24	0,05	30,0	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,24	0,04	25,0	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,24	0,03	20,0	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,24	0,03	16,0	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,24	0,02	12,0	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,24	0,01	7,0	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,24	0	3,0	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,24	0	-1,0	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,24	-0,01	-6,0	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,24	-0,02	-10,0	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,24	-0,02	-15,0	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,24	-0,03	-19,0	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,24	-0,04	-24,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,24	-0,05	-29,0	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,24	-0,06	-35,0	0,500	0,333

ILC650 Glasfaserbewehrung (GF)

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	0,74	444,0	0	0,333
0,010	0,0103	0,0829	0,9724	-0,07	0,74	444,0	0,124	0,333
0,015	0,0155	0,1008	0,9664	-0,08	0,74	444,0	0,154	0,333
0,020	0,0208	0,1159	0,9614	-0,10	0,74	444,0	0,179	0,333
0,025	0,0261	0,1290	0,9570	-0,11	0,74	444,0	0,203	0,333
0,030	0,0315	0,1405	0,9532	-0,12	0,74	444,0	0,224	0,333
0,035	0,0369	0,1511	0,9496	-0,13	0,74	444,0	0,244	0,333
0,040	0,0423	0,1607	0,9464	-0,14	0,74	444,0	0,263	0,333
0,045	0,0477	0,1699	0,9434	-0,15	0,74	444,0	0,281	0,333
0,050	0,0532	0,1785	0,9405	-0,16	0,74	444,0	0,298	0,333
0,055	0,0586	0,1866	0,9378	-0,17	0,74	444,0	0,314	0,333
0,060	0,0642	0,1942	0,9353	-0,18	0,74	444,0	0,330	0,333
0,065	0,0697	0,2014	0,9329	-0,19	0,74	444,0	0,346	0,333
0,070	0,0752	0,2084	0,9305	-0,19	0,74	444,0	0,361	0,333
0,075	0,0808	0,2151	0,9283	-0,20	0,74	444,0	0,376	0,333
0,080	0,0864	0,2215	0,9262	-0,21	0,74	444,0	0,390	0,333
0,085	0,0920	0,2277	0,9241	-0,22	0,74	444,0	0,404	0,333
0,090	0,0976	0,2335	0,9222	-0,23	0,74	444,0	0,418	0,333
0,095	0,1032	0,2394	0,9202	-0,23	0,74	444,0	0,431	0,333
0,100	0,1089	0,2450	0,9183	-0,24	0,74	444,0	0,445	0,333
0,105	0,1146	0,2502	0,9166	-0,25	0,74	444,0	0,458	0,333
0,110	0,1202	0,2555	0,9148	-0,25	0,74	444,0	0,471	0,333
0,115	0,1260	0,2609	0,9130	-0,26	0,74	444,0	0,483	0,333
0,120	0,1317	0,2656	0,9115	-0,27	0,74	444,0	0,496	0,333
0,125	0,1376	0,2753	0,9082	-0,27	0,71	426,5	0,500	0,333
0,130	0,1438	0,2876	0,9041	-0,27	0,67	401,4	0,500	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,27	0,63	378,0	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,27	0,59	356,3	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,27	0,56	336,1	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,27	0,53	317,1	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,27	0,50	299,4	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,27	0,47	282,8	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,27	0,45	267,1	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,27	0,42	252,4	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,27	0,40	238,4	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,27	0,38	225,2	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,27	0,35	212,7	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,27	0,33	200,9	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,27	0,32	189,6	0,500	0,333

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{ft} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,27	0,30	178,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,27	0,28	168,6	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,27	0,26	158,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,27	0,25	149,4	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,27	0,23	140,4	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,27	0,22	131,8	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,27	0,21	123,6	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,27	0,19	115,6	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,27	0,18	108,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,27	0,17	100,6	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,27	0,16	93,5	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,27	0,14	86,7	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,27	0,13	80,0	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,27	0,12	73,6	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,27	0,11	67,4	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,27	0,10	61,3	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,27	0,09	55,4	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,27	0,08	49,7	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,27	0,07	44,1	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,27	0,06	38,7	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,27	0,06	33,4	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,27	0,05	28,2	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,27	0,04	23,0	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,27	0,03	18,0	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,27	0,02	13,0	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,27	0,01	8,1	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,27	0,01	3,2	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,27	0	-1,6	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,27	-0,01	-6,5	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,27	-0,02	-11,4	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,27	-0,03	-16,4	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,27	-0,04	-21,6	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,27	-0,05	-27,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,27	-0,05	-32,9	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,27	-0,07	-39,9	0,500	0,333

ILC700 Glasfaserbewehrung (GF)

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	0,74	444,0	0	0,333
0,010	0,0103	0,0872	0,9709	-0,07	0,74	444,0	0,118	0,333
0,015	0,0156	0,1062	0,9646	-0,09	0,74	444,0	0,146	0,333
0,020	0,0208	0,1219	0,9594	-0,10	0,74	444,0	0,171	0,333
0,025	0,0262	0,1357	0,9548	-0,12	0,74	444,0	0,193	0,333
0,030	0,0316	0,1477	0,9508	-0,13	0,74	444,0	0,214	0,333
0,035	0,0370	0,1588	0,9471	-0,14	0,74	444,0	0,233	0,333
0,040	0,0424	0,1690	0,9437	-0,15	0,74	444,0	0,251	0,333
0,045	0,0478	0,1783	0,9406	-0,16	0,74	444,0	0,268	0,333
0,050	0,0533	0,1874	0,9375	-0,17	0,74	444,0	0,285	0,333
0,055	0,0588	0,1958	0,9347	-0,18	0,74	444,0	0,300	0,333
0,060	0,0644	0,2038	0,9321	-0,19	0,74	444,0	0,316	0,333
0,065	0,0699	0,2114	0,9295	-0,20	0,74	444,0	0,331	0,333
0,070	0,0755	0,2189	0,9270	-0,21	0,74	444,0	0,345	0,333
0,075	0,0811	0,2256	0,9248	-0,22	0,74	444,0	0,359	0,333
0,080	0,0867	0,2323	0,9226	-0,22	0,74	444,0	0,373	0,333
0,085	0,0923	0,2387	0,9204	-0,23	0,74	444,0	0,387	0,333
0,090	0,0980	0,2449	0,9184	-0,24	0,74	444,0	0,400	0,333
0,095	0,1037	0,2507	0,9164	-0,25	0,74	444,0	0,413	0,333
0,100	0,1094	0,2567	0,9144	-0,26	0,74	444,0	0,426	0,333
0,105	0,1151	0,2623	0,9126	-0,26	0,74	444,0	0,439	0,333
0,110	0,1208	0,2676	0,9108	-0,27	0,74	444,0	0,451	0,333
0,115	0,1265	0,2730	0,9090	-0,28	0,74	444,0	0,463	0,333
0,120	0,1323	0,2782	0,9073	-0,29	0,74	444,0	0,475	0,333
0,125	0,1380	0,2833	0,9056	-0,29	0,74	444,0	0,487	0,333
0,130	0,1438	0,2881	0,9040	-0,30	0,74	444,0	0,499	0,333
0,135	0,1500	0,3000	0,9000	-0,30	0,70	420,0	0,500	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,30	0,66	395,9	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,30	0,62	373,4	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,30	0,59	352,4	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,30	0,55	332,7	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,30	0,52	314,2	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,30	0,49	296,8	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,30	0,47	280,4	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,30	0,44	264,9	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,30	0,42	250,3	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,30	0,39	236,4	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,30	0,37	223,2	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,30	0,35	210,7	0,500	0,333

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{ft} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,3	0,33	198,7	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,3	0,31	187,3	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,3	0,29	176,4	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,3	0,28	166,0	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,3	0,26	156,0	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,3	0,24	146,5	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,3	0,23	137,3	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,3	0,21	128,5	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,3	0,20	120,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,3	0,19	111,8	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,3	0,17	103,9	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,3	0,16	96,3	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,3	0,15	88,9	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,3	0,14	81,8	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,3	0,12	74,9	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,3	0,11	68,1	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,3	0,10	61,6	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,3	0,09	55,2	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,3	0,08	49,0	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,3	0,07	43,0	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,3	0,06	37,1	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,3	0,05	31,3	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,3	0,04	25,6	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,3	0,03	20,0	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,3	0,02	14,5	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,3	0,02	9,0	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,3	0,01	3,6	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,3	0	-1,8	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,3	-0,01	-7,2	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,3	-0,02	-12,7	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,3	-0,03	-18,2	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,3	-0,04	-24,0	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,3	-0,05	-30,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,3	-0,06	-36,6	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,3	-0,07	-44,3	0,500	0,333

ILC750 Glasfaserbewehrung (GF)

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	0,74	444,0	0	0,333
0,010	0,0103	0,0899	0,9700	-0,07	0,74	444,0	0,115	0,333
0,015	0,0156	0,1095	0,9635	-0,09	0,74	444,0	0,142	0,333
0,020	0,0209	0,1257	0,9581	-0,11	0,74	444,0	0,166	0,333
0,025	0,0262	0,1399	0,9534	-0,12	0,74	444,0	0,187	0,333
0,030	0,0316	0,1523	0,9492	-0,13	0,74	444,0	0,207	0,333
0,035	0,0370	0,1637	0,9454	-0,14	0,74	444,0	0,226	0,333
0,040	0,0425	0,1742	0,9419	-0,16	0,74	444,0	0,244	0,333
0,045	0,0479	0,1836	0,9388	-0,17	0,74	444,0	0,261	0,333
0,050	0,0534	0,1930	0,9357	-0,18	0,74	444,0	0,277	0,333
0,055	0,0590	0,2017	0,9328	-0,19	0,74	444,0	0,292	0,333
0,060	0,0645	0,2099	0,9300	-0,20	0,74	444,0	0,307	0,333
0,065	0,0701	0,2175	0,9275	-0,21	0,74	444,0	0,322	0,333
0,070	0,0757	0,2252	0,9249	-0,22	0,74	444,0	0,336	0,333
0,075	0,0813	0,2323	0,9226	-0,22	0,74	444,0	0,350	0,333
0,080	0,0869	0,2391	0,9203	-0,23	0,74	444,0	0,364	0,333
0,085	0,0926	0,2457	0,9181	-0,24	0,74	444,0	0,377	0,333
0,090	0,0983	0,2521	0,9160	-0,25	0,74	444,0	0,390	0,333
0,095	0,1039	0,2582	0,9139	-0,26	0,74	444,0	0,403	0,333
0,100	0,1096	0,2640	0,912	-0,27	0,74	444,0	0,415	0,333
0,105	0,1154	0,2699	0,9100	-0,27	0,74	444,0	0,428	0,333
0,110	0,1211	0,2755	0,9082	-0,28	0,74	444,0	0,440	0,333
0,115	0,1269	0,2807	0,9064	-0,29	0,74	444,0	0,452	0,333
0,120	0,1326	0,2861	0,9046	-0,30	0,74	444,0	0,464	0,333
0,125	0,1384	0,2913	0,9029	-0,30	0,74	444,0	0,475	0,333
0,130	0,1443	0,2964	0,9012	-0,31	0,74	444,0	0,487	0,333
0,135	0,1501	0,3012	0,8996	-0,32	0,74	444,0	0,498	0,333
0,140	0,1563	0,3126	0,8958	-0,32	0,70	422,3	0,500	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,32	0,66	398,3	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,32	0,63	375,9	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,32	0,59	354,9	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,32	0,56	335,2	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,32	0,53	316,6	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,32	0,50	299,1	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,32	0,47	282,6	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,32	0,44	267,0	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,32	0,42	252,1	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,32	0,40	238,1	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,32	0,37	224,7	0,500	0,333

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{ft} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,32	0,35	212,0	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,32	0,33	199,8	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,32	0,31	188,2	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,32	0,30	177,1	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,32	0,28	166,5	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,32	0,26	156,3	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,32	0,24	146,5	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,32	0,23	137,1	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,32	0,21	128,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,32	0,20	119,3	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,32	0,18	110,9	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,32	0,17	102,7	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,32	0,16	94,9	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,32	0,15	87,2	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,32	0,13	79,8	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,32	0,12	72,7	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,32	0,11	65,7	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,32	0,10	58,9	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,32	0,09	52,3	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,32	0,08	45,9	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,32	0,07	39,6	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,32	0,06	33,4	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,32	0,05	27,3	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,32	0,04	21,3	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,32	0,03	15,4	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,32	0,02	9,6	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,32	0,01	3,8	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,32	0	-1,9	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,32	-0,01	-7,7	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,32	-0,02	-13,5	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,32	-0,03	-19,4	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,32	-0,04	-25,6	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,32	-0,05	-32,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,32	-0,07	-39,0	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,32	-0,08	-47,3	0,500	0,333

ILC800 Glasfaserbewehrung (GF)

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{f1} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0	0	0	1	0	0,74	444,0	0	0,333
0,010	0,0103	0,0938	0,9687	-0,08	0,74	444,0	0,110	0,333
0,015	0,0156	0,1147	0,9618	-0,10	0,74	444,0	0,136	0,333
0,020	0,0209	0,1307	0,9564	-0,11	0,74	444,0	0,160	0,333
0,025	0,0263	0,1460	0,9513	-0,13	0,74	444,0	0,180	0,333
0,030	0,0317	0,1584	0,9472	-0,14	0,74	444,0	0,200	0,333
0,035	0,0371	0,1710	0,9430	-0,15	0,74	444,0	0,217	0,333
0,040	0,0426	0,1812	0,9396	-0,16	0,74	444,0	0,235	0,333
0,045	0,0481	0,1915	0,9362	-0,18	0,74	444,0	0,251	0,333
0,050	0,0536	0,2015	0,9328	-0,19	0,74	444,0	0,266	0,333
0,055	0,0592	0,2105	0,9298	-0,20	0,74	444,0	0,281	0,333
0,060	0,0647	0,2186	0,9271	-0,21	0,74	444,0	0,296	0,333
0,065	0,0703	0,2268	0,9244	-0,22	0,74	444,0	0,310	0,333
0,070	0,0759	0,2344	0,9219	-0,23	0,74	444,0	0,324	0,333
0,075	0,0816	0,2421	0,9193	-0,24	0,74	444,0	0,337	0,333
0,080	0,0873	0,2493	0,9169	-0,25	0,74	444,0	0,350	0,333
0,085	0,0929	0,2560	0,9147	-0,25	0,74	444,0	0,363	0,333
0,090	0,0986	0,2623	0,9126	-0,26	0,74	444,0	0,376	0,333
0,095	0,1044	0,2690	0,9103	-0,27	0,74	444,0	0,388	0,333
0,100	0,1101	0,2753	0,9082	-0,28	0,74	444,0	0,400	0,333
0,105	0,1158	0,2805	0,9065	-0,29	0,74	444,0	0,413	0,333
0,110	0,1216	0,2861	0,9046	-0,30	0,74	444,0	0,425	0,333
0,115	0,1274	0,2922	0,9026	-0,31	0,74	444,0	0,436	0,333
0,120	0,1332	0,2973	0,9009	-0,31	0,74	444,0	0,448	0,333
0,125	0,1390	0,3029	0,8990	-0,32	0,74	444,0	0,459	0,333
0,130	0,1449	0,3083	0,8972	-0,33	0,74	444,0	0,470	0,333
0,135	0,1507	0,3127	0,8958	-0,34	0,74	444,0	0,482	0,333
0,140	0,1566	0,3176	0,8941	-0,34	0,74	444,0	0,493	0,333
0,145	0,1626	0,3253	0,8916	-0,35	0,73	435,6	0,500	0,333
0,150	0,1691	0,3381	0,8873	-0,35	0,69	411,1	0,500	0,333
0,155	0,1755	0,3511	0,8830	-0,35	0,65	388,1	0,500	0,333
0,160	0,1821	0,3642	0,8786	-0,35	0,61	366,6	0,500	0,333
0,165	0,1888	0,3775	0,8742	-0,35	0,58	346,3	0,500	0,333
0,170	0,1955	0,3909	0,8697	-0,35	0,55	327,2	0,500	0,333
0,175	0,2023	0,4046	0,8651	-0,35	0,52	309,1	0,500	0,333
0,180	0,2092	0,4183	0,8606	-0,35	0,49	292,0	0,500	0,333
0,185	0,2161	0,4323	0,8559	-0,35	0,46	275,8	0,500	0,333
0,190	0,2232	0,4464	0,8512	-0,35	0,43	260,4	0,500	0,333
0,195	0,2304	0,4608	0,8464	-0,35	0,41	245,8	0,500	0,333

μ_{Edf}	ω_1	$\xi = x/d$	$\zeta = z/d$	ε_{c2} [%]	ε_{ft} [%]	σ_{fd} [MPa]	α_R	k_a
0,200	0,2377	0,4753	0,8416	-0,35	0,39	231,8	0,500	0,333
0,205	0,2450	0,4900	0,8367	-0,35	0,36	218,5	0,500	0,333
0,210	0,2525	0,5050	0,8317	-0,35	0,34	205,8	0,500	0,333
0,215	0,2601	0,5202	0,8266	-0,35	0,32	193,7	0,500	0,333
0,220	0,2678	0,5356	0,8215	-0,35	0,30	182,1	0,500	0,333
0,225	0,2757	0,5513	0,8162	-0,35	0,28	170,9	0,500	0,333
0,230	0,2836	0,5673	0,8109	-0,35	0,27	160,2	0,500	0,333
0,235	0,2917	0,5835	0,8055	-0,35	0,25	149,9	0,500	0,333
0,240	0,3000	0,6000	0,8000	-0,35	0,23	140,0	0,500	0,333
0,245	0,3084	0,6168	0,7944	-0,35	0,22	130,5	0,500	0,333
0,250	0,3170	0,6340	0,7887	-0,35	0,20	121,2	0,500	0,333
0,255	0,3257	0,6515	0,7828	-0,35	0,19	112,3	0,500	0,333
0,260	0,3347	0,6693	0,7769	-0,35	0,17	103,7	0,500	0,333
0,265	0,3438	0,6876	0,7708	-0,35	0,16	95,4	0,500	0,333
0,270	0,3531	0,7063	0,7646	-0,35	0,15	87,3	0,500	0,333
0,275	0,3627	0,7254	0,7582	-0,35	0,13	79,5	0,500	0,333
0,280	0,3725	0,7450	0,7517	-0,35	0,12	71,9	0,500	0,333
0,285	0,3826	0,7652	0,7449	-0,35	0,11	64,5	0,500	0,333
0,290	0,3929	0,7859	0,7380	-0,35	0,10	57,2	0,500	0,333
0,295	0,4036	0,8072	0,7309	-0,35	0,08	50,2	0,500	0,333
0,300	0,4146	0,8292	0,7236	-0,35	0,07	43,3	0,500	0,333
0,305	0,4260	0,8519	0,7160	-0,35	0,06	36,5	0,500	0,333
0,310	0,4378	0,8755	0,7082	-0,35	0,05	29,9	0,500	0,333
0,315	0,4500	0,9000	0,7000	-0,35	0,04	23,3	0,500	0,333
0,320	0,4628	0,9255	0,6915	-0,35	0,03	16,9	0,500	0,333
0,325	0,4761	0,9523	0,6826	-0,35	0,02	10,5	0,500	0,333
0,330	0,4902	0,9804	0,6732	-0,35	0,01	4,2	0,500	0,333
0,335	0,5051	1,0101	0,6633	-0,35	0	-2,1	0,500	0,333
0,340	0,5209	1,0417	0,6528	-0,35	-0,01	-8,4	0,500	0,333
0,345	0,5379	1,0757	0,6414	-0,35	-0,02	-14,8	0,500	0,333
0,350	0,5564	1,1127	0,6291	-0,35	-0,04	-21,3	0,500	0,333
0,355	0,5768	1,1536	0,6155	-0,35	-0,05	-28,0	0,500	0,333
0,360	0,6000	1,2000	0,6000	-0,35	-0,06	-35,0	0,500	0,333
0,365	0,6275	1,2551	0,5816	-0,35	-0,07	-42,7	0,500	0,333
0,370	0,6634	1,3268	0,5577	-0,35	-0,09	-51,7	0,500	0,333

10.3 Herausgeber und Autoren

Prof. Dr. sc. techn. **Mike Schlaich** studierte Bauingenieurwesen und promovierte an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) Zürich. Er ist geschäftsführender Gesellschafter des Ingenieurbüros schlaich bergemann und partner (sbp GmbH) mit Hauptsitz in Stuttgart. Seit 2004 ist Mike Schlaich Professor an der Technischen Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Lehrstuhl Entwerfen und Konstruieren – Massivbau und seit 2005 anerkannter Prüfenieur für Baustatik. Er plant und realisiert weltweit Hochbauten und Brücken. Mike Schlaich wurde 2015 mit der Gold Medal der Institution of Structural Engineers, London ausgezeichnet und ist Mitglied der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW).

Prof. **Regine Leibinger** studierte Architektur an der Technischen Universität Berlin und der Harvard University, USA. Sie führt seit 1993 gemeinsam mit Frank Barkow das Büro Barkow Leibinger in Berlin. In der Zeit von 2006–2016 war Regine Leibinger Professorin für Baukonstruktion und Entwerfen an der Technischen Universität Berlin. Derzeit ist sie als Gastprofessorin an der Princeton University, School of Architecture, USA. Sie lehrte unter anderem an der Architectural Association in London sowie an der Harvard Graduate School of Design in Boston, USA. Zahlreiche Projekte im In- und Ausland wurden mit Preisen ausgezeichnet.

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. **Claudia Lösch** studierte in Karlsruhe, London und Aachen Bauingenieurwesen und Wirtschaftsingenieurwesen. Nach mehrjähriger Tätigkeit in einem mittelständischen Ingenieurbüro arbeitete sie im Ausland als beratende Ingenieurin in der Umweltschutztechnik. Seit 2014 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau der Technischen Universität Berlin und forscht im Bereich des Infralichtbetons.

Dipl.-Ing. **Philip Rieseberg** studierte Architektur an der Technischen Universität Berlin und der Ecole Nationale Supérieure d'Architecture Paris. Gemeinsam mit Tarek Massalme und Jan-Oliver Kunze führt er seit 2008 das Büro MARS Architekten in Berlin. Seit 2014 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen der Technischen Universität Berlin und forscht im Bereich des Infralichtbetons.

10.4 Literatur

- [1] Schlaich, M.; Zareef, M. E.: Infraleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Nr. 3, S. 175–182
- [2] Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton 2.0. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Nr. 11, S. 757–766
- [3] Bosold, D.; Beck, M.: Zement-Merkblatt Beton-technik B13 – Leichtbeton. Erkrath: Informations-Zentrum Beton, Juni 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 206:2014-07 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013 [Dokument zurückgezogen]
- [6] Filipaj, P.: Architektonisches Potenzial von Dämmbeton. Zürich: vdf-Hochschulverlag an der ETA Zürich, 2010
- [7] Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn, 2003
- [8] Expanded Shale Clay and Slate Institute (Hrsg.): Lightweight Concrete – History, Applications, Economics. USA: Selbstverlag, 1971
- [9] Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton – Die Entwicklung zum Hochleistungsleichtbeton. In: Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen (Hrsg.): Massivbau im Wandel. Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger. Berlin: Ernst & Sohn, 2014 (S. 179–192)
- [10] Cassinello, P.; Hückler, A.; Schlaich, M.: Evolution of Lightweight Concrete. From Eduardo Torroja's 1949 International Competition to date. In: Cassinello, P. (Hrsg.): Eduardo Torroja 1949. Strategy to industrialise housing in post-world war II. Madrid: Fundación Eduardo Torroja; Fundación Juanelo Turriano, 2013 (S. 341–352)
- [11] Zareef, Mohamed Ahmed Mohamed El: Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete. Berlin, 2010 (Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen; 7)
- [12] Schlaich, M.; Lösch, C.; Hückler, A.: Infraleichtbeton – Stand 2015. In: Betonbauwerke für die Zukunft. Hintergründe, Auslegungen, Praxisbeispiele. Tagungsband zur 11. Tagung »Betonbauteile« am 19. März 2015 in Leipzig. Berlin: Beuth, 2015 (S. 93–104)
- [13] Callsen, B.; Thienel, K.-C.: Besondere Aspekte bei der Entwicklung und Ausführung eines hochwärmedämmenden Hochleistungs-Leichtbetons mit sehr niedriger Betonrohddichte. beton (2017), Nr. 4, S. 128–134
- [14] Breit, W.; Schulze, J.; Heese, C. et al.: Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014 (Forschungsinitiative Zukunft Bau; 2894)
- [15] Filipaj, P.: Hat Dämmbeton Zukunft? Die leichte Schwere in der Energiefalle. werk, bauen + wohnen (2013), Nr. 4, S. 46–47
- [16] Kahn, N.: My Architect: A Son's Journey. USA, 2003 (Film)
- [17] Radisch, I.: Camus. Das Ideal der Einfachheit. Eine Biographie. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, 2014
- [18] Janson, A.: Grundbegriffe der Architektur. Basel: De Gruyter; Birkhäuser, 2013
- [19] Filipaj, P.: Dämmbeton – ein Material und seine Möglichkeiten. Detail 51 (2011), Nr. 4, S. 372–375
- [20] DIN EN 1992-1-1/NA: 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
- [21] Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC). Göttingen: Sierke Verlag, 2016
- [22] Hückler, A.; Schlaich, M.: Zur Biegung von Infraleichtbetonbauteilen – Werkstoff-, Verbund-, Trag- und Verformungsverhalten. Beton- und Stahlbetonbau 112 (2017), Nr. 5, S. 282–292

- [23] Geist, J. F.; Kürvers, K.: Das Berliner Mietshaus 1862–1945. München: Prestel-Verlag, 1984
- [24] Schöck Bauteile GmbH: Technische Information Schöck ComBAR. Baden-Baden: Selbstverlag, März 2017
- [25] SCHMOLZ + BICKENBACH AG; Swiss Steel AG: TOP12-500, Nichrostender Betonstahl. Produktdatenblatt, X2CrNi12, 1.4003
- [26] Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung (EnEV 2014) vom 18. November 2013 (BGBl. I (2013) Seite 3951)
- [27] Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.: Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017
- [28] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Referentenentwurf): Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung Erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz (GEG) 2017)
- [29] DIN EN 12664:2001-05 Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät – Trockene und feuchte Produkte mit mittlerem und niedrigem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12664:2001
- [30] DIN EN ISO 10456:2010-05 Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte und Verfahren zur Bestimmung der wärmeschutztechnischen Nenn- und Bemessungswerte
- [31] Schneider, K.-J.; Goris, A.; Albert, A.: Bautabellen für Ingenieure mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Köln: Werner, 2012
- [32] Brecht, K.: Wassereindringtiefe und Frost/Frost-Tausalz-Widerstand von Infraleichtbeton. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2016
- [33] DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 Prüfung von Festbeton, Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung
- [34] DIN 1045-2:2008-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [35] Bose, T.; Kampen, R.: Zement-Merkblatt Hochbau H10 – Wasserundurchlässige Betonbauwerke. Erkrath: InformationsZentrum Beton, 2012
- [36] DIN EN ISO 15148:2016-12 Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten – Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen
- [37] Fischer, H.-M.; Häupl, P.; Freymuth, H.: Lehrbuch der Bauphysik. Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008
- [38] DIN EN 12390-8:2009-07 Prüfung von Festbeton; Teil 8: Wassereindringtiefe unter Druck
- [39] DIN 4108-3:2017-09 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden, Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung
- [40] DIN EN ISO 12572:2001-09 Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit
- [41] 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
- [42] Brecht, K.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2013

- [43] Zikopoulos, P.: Bestimmung und Bewertung der spezifischen Wärmekapazität von Infrleichtbeton. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2012
- [44] DIN 4102-4:2016-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4: Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile
- [45] DIN 4102-1:1998-05 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen
- [46] Einbrodt, C.: Das Verhalten von Infrleichtbeton bei hohen Temperaturen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2014
- [47] DIN 4109-32:2016-07 Schallschutz im Hochbau, Teil 32: Daten für die rechnerischen Nachweise des Schallschutzes (Bauteilkatalog) – Massivbau
- [48] Weber, L.: WDV-Systeme zum Thema Schallschutz. Berlin: Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., 2013 (Technische Systeminfo; 7)
- [49] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (Hrsg.): Schallschutz. Sicher geplant und einfach ausgeführt mit Kalksandstein. Nachweis nach DIN 4109:2016-07. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik GmbH, 2016
- [50] DIN 4108 Beiblatt 2:2006-03 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Wärmebrücken – Planungs- und Ausführungsbeispiele
- [51] Dobrzynska, S.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökonomischen und ökologischen Bewertung eines Infrleichtbetonbauwerks. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2016
- [52] Schlosser, J.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökologischen und ökonomischen Bewertung eines Bauwerks aus Infrleichtbetonfertigteilen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2016
- [53] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): ÖKOBAUDAT 2017-I (27.11.2017) – EN 15804 und BNB-konforme Daten für über 1 200 verschiedene Bauprodukte
- [54] GaBi. Product Sustainability Performance. (LCA-Software für Ökobilanzen) Leinfelden-Echterdingen: thinkstep AG, 2015
- [55] Surendra Sharma: Use of microsilica for High Rise Buildings. Silica Fume for high rise buildings, 2015. <https://www.linkedin.com/pulse/use-microsilica-high-building-bldg-surendra-sharma> [Stand: 19.01.2018]
- [56] Rübner, K.; Schnell, A.; Haamkens, F. et al.: Leichtbeton aus Aufbaukörnungen. Chemie Ingenieur Technik 84 (2012), Nr. 10, S. 1792–1797
- [57] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Hrsg.): Nutzungsdauerangaben von ausgewählten Bauteilen der Kostengruppen 300, 400 und 500 nach DIN 276-1. Entwurf der BBSR-Endfassung vom 20.10.2009. Bonn, Berlin: 2009
- [58] Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hrsg.): Umweltproduktdeklaration nach ISO 14025. Ytong-Porenbeton. Xella Baustoffe GmbH. Königswinter: 2012
- [59] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem.html> [Stand: 28.02.2017]
- [60] Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- [61] Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V.: Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau Mehrfamilienhäuser – Neubau. Steckbrief Ökonomische Qualität, Abschnitt 4.1.1. Berlin: Selbstverlag, September 2016

- [62] DIN 4213:2014-01 Anwendung von vorgefertigten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung in Bauwerken
- [63] DIN 4213:2003-07 Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus haufwerksporigem Leichtbeton in Bauwerken [Dokument zurückgezogen]
- [64] DIN EN 1520:2011-06 Vorgefertigte Bauteile aus haufwerksporigem Leichtbeton und mit statisch anrechenbarer oder nicht anrechenbarer Bewehrung; Deutsche Fassung EN 1520:2011
- [65] DIN EN 771-3:2015-11 Festlegungen für Mauersteine, Teil 3: Mauersteine aus Beton (mit dichten und porigen Zuschlägen); Deutsche Fassung EN 771-3:2011 + A1:2015.
- [66] DIN V 18151-100:2005-10 Hohlblöcke aus Leichtbeton, Teil 100: Hohlblöcke mit besonderen Eigenschaften
- [67] DIN V 18152-100:2005-10 Vollsteine und Vollblöcke aus Leichtbeton, Teil 100: Vollsteine und Vollblöcke mit besonderen Eigenschaften
- [68] DIN V 20000-403:2005-06 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken, Teil 403: Regeln für die Verwendung von Mauersteinen aus Beton nach DIN EN 771-3:2005-05
- [69] DIN 4166:1997-10 Porenbeton-Bauplatten und Porenbeton-Planbauplatten
- [70] DIN EN 771-4:2011-11 Festlegungen für Mauersteine, Teil 4: Porenbetonsteine; Deutsche Fassung EN 771-4:2011 + A1:2015
- [71] DIN 20000-404:2015-12 Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken, Teil 404: Regeln für die Verwendung von Porenbetonsteinen nach DIN EN 771-4:2011-07
- [72] DIN EN 12602:2016-12 Vorgefertigte bewehrte Bauteile aus dampfgehärtetem Porenbeton; Deutsche Fassung EN 12602:2016
- [73] DIN 4223-100:2014-12 Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton, Teil 100: Eigenschaften und Anforderungen an Baustoffe und Bauteile
- [74] DIN 4223-103:2014-12 Anwendung von vorgefertigten bewehrten Bauteilen aus dampfgehärtetem Porenbeton, Teil 103: Sicherheitskonzept
- [75] Reiter, P.: Korrosionsschutz der Stahlbewehrung bei Bauteilen aus Infraleichtbeton. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2014
- [76] Stark, J.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin: Springer, 2013
- [77] Brandolini, A.: Untersuchungen zur Bewehrungskorrosion bei Infraleichtbetonbauteilen. Masterarbeit, Technische Universität Berlin, Berlin: 2016
- [78] Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau. In: Eibl, J. (Hrsg.): Beton-Kalender 2001. Berlin: Ernst & Sohn, 2001 (S. 311–492)
- [79] Institut Feuerverzinken GmbH: Arbeitsblätter Feuerverzinken. E.4 Fachgerechte Ausbesserung. Stand 13.10.2016. Düsseldorf: Selbstverlag, 2016
- [80] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-1.6-238: Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm. Berlin: 2014. https://www.schoeck.de/download/1085/Zulassung_Schoeck_Combar_Z_1.6_238%5B1085%5D.pdf [Stand: 19.01.2018]
- [81] H-Bau Technik GmbH: H-Bau Technik – Preisliste 2017, RIPINOX WSTNR. 1.4571. Klettgau: Februar 2017
- [82] SCHMOLZ + BICKENBACH AG; Swiss Steel AG: Materialrichtpreise TOP12, Emmenbrücke: 2010
- [83] Schöck Bauteile GmbH: Schöck Preisliste 2017. https://www.schoeck.de/download/6500/Preisliste_2017%5B6500%5D.pdf [Stand: 19.01.2018]

- [84] DIN EN 1992-1-2:2006-10 Eurocode 2 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004
- [85] DIN EN 1992-1-1:2011-01 Nationaler Anhang – national festgelegte Parameter – Eurocode 2 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [86] Petzold, K.: Beschreibung des Lastabtrags im Infraleichtbeton mittels optischer Verformungsanalyse. Bachelorarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2013
- [87] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2). Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- [88] Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang. Kommentierte Fassung. Berlin: Ernst & Sohn, Beuth, 2012
- [89] Lingenfelder, M.: Experimentelle Untersuchungen zum Verbundkriechen von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit, TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2015
- [90] CEB-FIP: fib model code for concrete structures 2010. Berlin: Ernst & Sohn, 2013
- [91] Euro-International Committee for Concrete (Hrsg.): CEB-FIP model code 1990. Design code. London: Telford, 1993 (Bulletin d'information/Comité Euro-International du Béton; 213/214)
- [92] Bazant, Z. P.; Murphy, W. P.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. Materials and Structures 28 (1995), Nr. 180, S. 357–365
- [93] Bazant, Z. P.; Baweja, S.: Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures: Model B3. In: Akthem Al-Manaseer (Hrsg.): The Adam Neville Symposium. Creep and Shrinkage-Structural Design Effects. SP-194. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2000
- [94] 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
- [95] König, G.; Tue, N.V.: 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. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Heft 466. Berlin: Beuth, 1996
- [96] ISO 4356:1977-11 Bases for the design of structures – Deformations of buildings at the serviceability limit states
- [97] Kordina, K.: Bemessungshilfsmittel zu Eurocode 2 Teil 1. (DIN V ENV 1992 Teil 1-2, Ausgabe 06.92) Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. In: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Heft 425. Berlin: Beuth, 1992
- [98] Fédération internationale du béton (Hrsg.): Lightweight aggregate concrete. Lausanne: fib, 2000 (fib Bulletin; 8)
- [99] Schlaich, M.; Hückler, A.: Betonoase. Ergebnisbericht zu Bauteilprüfungen für die Erteilung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE). TU Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Berlin: 2016 (nicht öffentlich verfügbar)
- [100] Neß, L.: Untersuchung von Infraleichtbeton zu baubetrieblichen und ökonomischen Aspekten. Studienarbeit, Technische Universität Berlin, Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Berlin: 2015

- [101] PERI GmbH: Peri-Trennmittel. <https://www.peri.com/de/produkte/schalungssysteme/zubehoer/trennmittel.html> [Stand: 20.12.2017]
- [102] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V. (Hrsg.): DBV-Merkblatt Sichtbeton. Fassung 2004
- [103] Dickamp, M. J.; Eppers, S.: Zement-Merkblatt Betontechnik B 29 – Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung. Erkrath: Informations-Zentrum Beton GmbH, 2006
- [104] DIN EN 13670:2011-03 Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009
- [105] DIN 1045-3:2001-07 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 3: Bauausführung
- [106] DIN EN 1504-2:2015-03 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
- [107] DIN ISO 6344-2:2000-04 Schleifmittel auf Unterlagen – Korngrößenanalyse, Teil 2: Bestimmung der Korngrößenverteilung der Makrokörnungen P 12 bis P 220 (ISO 6344-2:1998)
- [108] Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (Hrsg.): Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C, Berlin: 2015
- [109] Deutsches Institut für Bautechnik DIBt (Hrsg.): Verzeichnis Eingeführte Technische Baubestimmung (entsprechend § 3 Abs. 3 MBO) Stand: 10.12.2014. Berlin: 2014
- [110] Bauministerkonferenz, Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder – ARGEBAU – (Hrsg.): Musterbauordnung (MBO). In der Fassung vom 1. November 2012, zuletzt geändert durch den Beschluss vom 21. September 2012
- [111] Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt, Oberste Bauaufsicht (Hrsg.): Merkblatt zur Zustimmung im Einzelfall gemäß § 20 und § 21 der Bauordnung für Berlin, Stand: 1. Dezember 2012. Berlin: 2012

10.5 Abbildungsverzeichnis

Soweit nicht anders angegeben stammen alle Abbildungen (Fotos, Zeichnungen, Visualisierungen) aus den Fachgebieten »Entwerfen und Konstruieren – Massivbau« von Prof. Dr. sc. techn. Mike Schlaich sowie »Baukonstruktion und Entwerfen« von Prof. Regine Leibinger der Technischen Universität Berlin.

Bild 0-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Kapitel 1

Bild 1-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Kapitel 2

Bild 2-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 2-1 Schlaich, M.; Zareef, M. E.: Infraleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 3 [1], S. 175

Bild 2-2 Foto: Mike Schlaich

Bild 2-3 Foto: Hans Joosten

Bild 2-4 Foto: Mike Schlaich

Bild 2-5 Foto: Cengiz Dicleli

Bild 2-6 Schlaich, M.; Hückler, A.: Infraleichtbeton – Die Entwicklung zum Hochleistungsleichtbeton. In: Lehrstuhl und Institut für Massivbau der RWTH Aachen (Hrsg.): Massivbau im Wandel. Festschrift zum 60. Geburtstag von Josef Hegger. Berlin: Ernst & Sohn, 2014 ([9], basierend auf [10]), S. 181

Bild 2-7 Foto: Yoshito Isono

Bild 2-8 Foto: Mike Schlaich

Bild 2-9 Barkow Leibinger Architekten

Bild 2-10 Architettura civile, tav. 4, Torino, 1737

Bild 2-11 Foto Margherita Spiluttini, © Architekturzentrum Wien, Sammlung

Kapitel 3

Bild 3-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 3-1 Foto: Alexander Hückler

Kapitel 4

Bild 4-0 Philip Rieseberg, FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-1 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas, bis 4-5 FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-6 Foto: Claudia Lösch, Philip Rieseberg

Bild 4-7 Geist, Johann Friedrich; Kurvers, Klaus: Das Berliner Mietshaus 1862–1945. München: Prestel Verlag, 1984 [23]

Bild 4-8 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas, bis 4-10 FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-11 Foto: Philip Rieseberg

Bild 4-12 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas, FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-13 Anne Lacaton & Jean Philippe Vassal; Visualisierung: Frédéric Druot, Christophe Hutin

Bild 4-14 Anne Lacaton & Jean Philippe Vassal; Foto: Philippe Ruault

Bild 4-15 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas, bis 4-19 FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-20 Philip Rieseberg, FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-21 Foto: Edward Beierle

Bild 4-22 Bruno, Fioretti; Marquez Architekten; Foto: Christoph Rokitta

Bild 4-23 Barkow Leibinger Architekten; schlaich bergemann partner

Bild 4-24 Barkow Leibinger Architekten; FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Bild 4-25 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 4-26 Barkow Leibinger Architekten

Bild 4-27 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas,
FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Kapitel 5

Bild 5-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Detail 5-1 Philip Rieseberg, Lukas Specks, Dimitra Megas,
bis 5-18 FG Baukonstruktion und Entwerfen, TU Berlin

Kapitel 6

Bild 6-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 6-1 Claudia Lösch
und 6-2

Bild 6-3 Brecht, K.: Wassereindringtiefe und Frost/
Frost-Tausalz-Widerstand von Infraleichtbeton.
Masterarbeit, Technische Universität Berlin,
Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet
Entwerfen und Konstruieren – Massivbau,
Berlin, 2016 [32], S. 48

Bild 6-4 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 134

Bild 6-5 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 87

Bild 6-6 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 86

Bild 6-7 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 107

Bild 6-8 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 115

Bild 6-9 Claudia Lösch, basierend auf [51]

Kapitel 7

Bild 7-0 Foto: Alexander Hückler

Bild 7-1 Reiter, P.: Korrosionsschutz der Stahlbewehrung
bei Bauteilen aus Infraleichtbeton.
Studienarbeit, Technische Universität Berlin,
Institut für Bauingenieurwesen, Fachgebiet
Entwerfen und Konstruieren – Massivbau,
Berlin, 2014 [75], S. 5

Bild 7-2 Foto: Philipp Reiter

Bild 7-3 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 7-4 Claudia Lösch, basierend auf [21]

Bild 7-5 Alexander Hückler [22]

Bild 7-6 Foto: Alexander Hückler

Bild 7-7 Claudia Lösch

Bild 7-8 Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten
von biegebeanspruchten Bauteilen aus
Infraleichtbeton (ILC). Göttingen: Sierke Verlag,
2016 [21], S.189

Kapitel 8

Bild 8-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 8-1 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.:
Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
(INBIG). Abschlussbericht zum Forschungs-
projekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-,
Stadt- und Raumforschung im Bundesamt
für Bauwesen und Raumordnung. Stuttgart:
Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 146 und 147

Bild 8-2 Foto: Philip Rieseberg

Bild 8-3 Foto: Jan-Oliver Kunze
bis 8-9

Bild 8-10 Foto: Lukas Specks
und 8-11

Bild 8-12 Foto: Minh Duc Pahn
bis 8-14

Bild 8-15 Foto: Jenny Sarah Loebel

Bild 8-16 Foto: Jan-Oliver Kunze
bis 8-18

Kapitel 9

Bild 9-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

Bild 9-1 Foto: @wilfried-dechau.de
und 9-2

Bild 9-3 C. Bonnen Architekt,
und 9-4 schlaich bergemann partner

Bild 9-5 Gruber + Popp Architekten
bis 9-7

Bild 9-8 B. Callsen; K.-C. Thienel [13];
bis 9-10 Foto: Matthias Richter – Formkoalition

Bild 9-11 Fachbereich Architektur und Fachbereich
bis 9-13 Bauingenieurwesen der TU Kaiserslautern

Kapitel 10

Bild 10-0 Foto: Jan-Oliver Kunze

10.6 Tabellenverzeichnis

Kapitel 3

Tabelle 3-1 Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC). Göttingen: Sierke Verlag

Tabelle 3-2 Claudia Lösch, basierend auf [21, 22]

Kapitel 6

Tabelle 6-1 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.: Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 48

Tabelle 6-2 Claudia Lösch

Tabelle 6-3 Claudia Lösch, basierend auf [32]

Tabelle 6-4 Claudia Lösch, basierend auf [37]

Tabelle 6-5 Claudia Lösch, basierend auf [32]

Tabelle 6-6 Claudia Lösch, basierend auf [31, 41, 42]

Tabelle 6-7 Claudia Lösch, basierend auf [31, 43]

Tabelle 6-8 Claudia Lösch, basierend auf [24, 31]

Tabelle 6-9 Claudia Lösch, basierend auf [47]

Tabelle 6-10 Claudia Lösch, basierend auf [47, 49]

Tabelle 6-11 Leibinger, R.; Schlaich, M.; Lösch, C. et al.: Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Zukunft Bau, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Fraunhofer IRB Verlag, 2017 [27], S. 83

Tabelle 6-12 Max Bauer, basierend auf [27]

Kapitel 7

Tabelle 7-1 Claudia Lösch, basierend auf [24, 25]

Tabelle 7-2 Claudia Lösch, basierend auf [21]

Tabelle 7-3 Claudia Lösch

Tabelle 7-4 Claudia Lösch, basierend auf [21]

Tabelle 7-5 Claudia Lösch, basierend auf [21]

Tabelle 7-6 Claudia Lösch

Kapitel 10

ω-Tafeln Alexander Hückler

10.7 Stichwortverzeichnis

A

allgemeine bauaufsichtliche Zulassung 113
Attika 86ff.
Ausschalfrist 155

B

Balkon 36, 64ff.
Barock 21
Baulücke 38
Bauteil
– schlank 127
– unbewehrt 119
Bauteilverhalten, duktil 122
Bemessungsdiagramm, allgemein 131
Betondeckung 122
Betonierhorizont 154
Betonierhorizonte 154
Betonkosmetik 156f.
Bewehrung 121
bewittert 156
Bewitterung 97
Biegung 129
Brandschutz 101, 141

C

Carbonatisierung 112, 120, 156

D

Dämmbeton 14
Dauerstandbeiwert 119
Deckenanschluss 60ff.
Diskontinuitätsbereich 128
Duktilität 141
Durchbiegung 136, 140f.
Durchfärben 153

E

Eigengewicht 126
Einfamilienhaus 45, 162, 166
Elastizitätsmodul 27
EnEV 94
Expositionsklasse 96

F

Fallhöhe 154
Fassade 40
Fensteranschluss 68ff.

Fensterflächenanteil 52
Flachdach 86ff.
Forschung 18
Freiform 40
Frost-Tau-Widerstand 96
Fußpunkt 78ff.

G

Gebäudeenergiegesetz 94
Gebäudehöhe 34
Gebrauchstauglichkeit 119, 133
Geschoss 34
Geschosszahl 92f.
GFK-Bewehrung 121
GWP 111

H

Hochhaus 49
Holzkonstruktion 44
Hydratationswärme 28
Hydrophobierung 100, 120, 156

I

INBIG 11, 18
Interaktionsdiagramm 129

K

Korrosionsverhalten 120
Kosten 112
Kriechen 139
Kriechzahl 124

L

Längsdruckkraft 127
Lastannahme 126
Lebenszykluskosten 113
Leichtbeton 14
– gefügedicht 14
– haufwerksporig 14
Loggia 52
Luftporengehalt 27

M

Materialsicherheitsbeiwert 119
Mindestbetondeckung 101
Mindestbewehrung 133f., 143
Mischvorgang 154

N

Nachbearbeitung 156
 Nachbehandlung 155
 Norm 118
 Nutzungsdauer 112f.

O

Oberflächengestaltung 146
 Objekt, epistemisch 20
 Öffnungsmaß 34
 Ökobilanz 110

P

Poché 21, 46
 Punkthaus 49

Q

Querkraft 132
 Querschnittswert, ideell 123

R

Raumfeuchte 107
 Rissbreitenbegrenzung 133
 Rohdichteklasse 26

S

Schalldämm-Maß 43, 102f.
 Schallschutz 102
 Schalung 146ff.
 Schlagregen 100
 Schlankheit 129
 Schleifen 157ff.
 Schwinden 139
 Schwindmaß 126
 selbstverdichtend 28
 Setzfließmaß 27
 Silikastaub 27, 110
 Simulation
 – hygrisch 107
 – thermisch 104
 Sohlplatte 79, 81
 Spannungs-Dehnungs-Linie 123
 Stabwand 51
 Stabwerkmodell 128

T

Teilflächenpressung 128

Temperaturentwicklung 28

Torsion 132

Tragfähigkeit 119, 126

Treibhauspotenzial 111

Trockenrohdichte 27

U

U-Wert 93, 95

V

Verbundkriechen 125

Verbundverhalten 142

Verdichtung 28, 154

Verformung 135, 141

Verformungsmodell 137

Villa 45

Völligkeitsbeiwert 126, 129, 134

W

Wandaufbau 58

Wand, unbewehrt 127

Wärmebrücke 108ff.

Wärmebrückenverlustkoeffizient 108

Wärmedämmung, aktiv 104

Wärmedurchgangskoeffizient 95

Wärmeschutz, sommerlich 104

Wärmespeicherkapazität, spezifisch 99

Wasseraufnahme 97

Wasserdampfdiffusion 99

Wassereindringtiefe 97

Z

Zeilengebäude 43

Zugversteifung 125, 139

Zustimmung im Einzelfall 112, 114, 118

Rissbildungen verstehen und vermeiden



Stefan Röhling, Heinz Meichsner
2018, 513 Seiten, 520 Abb., 50 Tab., Hardcover
ISBN 978-3-8167-9645-9, auch als E-Book und BuchPlus verfügbar



Direkt online bestellen:

www.baufachinformation.de

Die große Betonbau-Reihe



Betonbau | Band 1 bis 3

Der Betonbau wurde in den letzten Jahrzehnten durch eine Reihe von Veränderungen und Entwicklungen geprägt. Diese Änderungen rücken vor allem die Qualitätssicherung immer weiter in den Mittelpunkt und fordern von allen Beteiligten ein umfassendes Wissen, das die insgesamt drei Bände bieten. Die Inhalte wurden nicht nur für den Gebrauch in der Bauvorbereitung und Bauleitung ausgewählt, sondern sind auch für die Ausbildung im Bauingenieurwesen der Hochschulen und Universitäten geeignet.

Stefan Röhling, Helmut Eifert, Manfred Jablinski

2015, 1194 Seiten, 565 Abb., 157 Tab., Hardcover
ISBN 978-3-8167-9491-2

Band 1: Im ersten Band wird auf die Zusammensetzung, Klassifizierung und die Dauerhaftigkeit des Betons, den Schalungs- und Bewehrungsbau, die Herstellung und Verarbeitung von Frischbeton sowie auf Maßnahmen zur Qualitätssicherung detailliert eingegangen.

2012, 446 Seiten | ISBN 978-3-8167-8644-3

Band 2: Band zwei widmet sich den Hydratationsvorgängen und den Strukturentwicklungen im Beton. Auch das Thema der Erhärtung und Entwicklung der Betoneigenschaften behandelt der Autor ausführlich. Beanspruchungen aus Zwang, Schwinden und Kriechen sowie die verschiedenen Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung von Rissen runden die Thematik ab.

2013, 308 Seiten | ISBN 978-3-8167-8646-7

Band 3: Besondere Eigenschaften des Betons wie z.B. bei hochfestem Beton, Strahlenschutzbeton oder Beton mit hohem Brand- und Feuerwiderstand werden im dritten Band aufgezeigt. Darüber hinaus beschreiben die Autoren spezielle Verfahren, vom Spritzbeton über Unterwasserbeton bis hin zu selbstverdichtetem Beton. Sonderaufgaben wie Betonieren bei extremen Temperaturen oder das Herstellen von Fahrbahndecken finden ebenfalls Beachtung.

2013, 308 Seiten | ISBN 978-3-8167-8646-7

Alle Bände auch als E-Book und BuchPlus verfügbar!

Fraunhofer IRB Verlag

Der Fachverlag zum Planen und Bauen

Nobelstraße 12 ■ 70569 Stuttgart ■ irb@irb.fraunhofer.de ■ www.baufachinformation.de

Claudia Lösch | Philip Rieseberg
Herausgegeben von Mike Schlaich | Regine Leibinger

Infraleichtbeton

Entwurf | Konstruktion | Bau

Infraleichtbeton ist ein Beton mit sehr geringer Rohdichte, der sowohl die tragende als auch die wärmedämmende Funktion der Gebäudehülle in einem monolithischen Material vereint. Sichtbetonbauten aus Infraleichtbeton können im Hinblick auf die Nachhaltigkeitsdiskussion, den Klimawandel und die Energiewende alternative Lösungsansätze bieten und darüber hinaus mit ihrem gestalterischen Anspruch einen Beitrag zur Baukultur leisten.

Das Buch soll als Planungshilfe und Leitfaden für die Anwendung von Infraleichtbeton in der Praxis dienen. Es basiert auf Erkenntnissen aus langjähriger Forschung sowie einem interdisziplinären Forschungsprojekt, in dem Architekten und Bauingenieure gemeinsam die architektonischen und konstruktiven Potenziale von Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau ausgelotet haben. Die Autoren stellen Ansätze für den materialgerechten Entwurf, die konstruktive Durchbildung und die Bemessung vor. Außerdem bieten sie einen Überblick über die bauphysikalischen Eigenschaften des Materials und geben Hinweise zur Bauausführung.

Mit zahlreichen Leitdetails, Projekt- und Bemessungsbeispielen stellt dieses Handbuch erstmals eine praktische Anleitung für Planer, Bauherren und Baufirmen zur Verfügung, die mit diesem neuartigen Hochleistungsleichtbeton planen und bauen möchten.

ISBN 978-3-8167-9881-1



Fraunhofer IRB  Verlag