

Kapitel IV | Synopse dreier Betontechnologien

4.1 Einleitung vergleichende Forschung

Im folgenden Kapitel werden drei Betontechnologien - Gradientenbeton, Infraleichtbeton und Aeroleichtbeton – nebeneinander untersucht und in Beziehung gesetzt. Es zeigt sich, dass die Entwicklung der drei Betontechnologien auf Forschungsansätzen beruhen, die vorbildlich die Forschung im Sinne einer Individualisierten Standardisierung vorantreiben.

Der wissenschaftliche Vergleich erfolgt in Form einer synoptischen Darstellung hinsichtlich der aufgestellten These zu den Potenzialen der Individualisierten Standardisierung (→1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung). Entscheidend ist eine übereinstimmende Ausgangslage, um eine echte Vergleichbarkeit herbeizuführen. So werden im ersten Schritt die Vergleichskriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung vorgestellt. Ziel ist es, die aufgestellten Schnittstellen für die Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen aufzuzeigen (→3.1.3 Erweiterung der Leitfaktoren um neuartige Schnittstellen). Diese Herangehensweise erlaubt im zweiten Schritt einen direkten Vergleich, eine Bewertung und die Ableitung von Potenzialen anhand der betrachteten drei Betontechnologien. Es wird aufgezeigt, dass die drei verschiedenen Herangehensweisen zu ähnlichen Zielen kommen, jedoch auf unterschiedlichen Wegen.

Die Systeme gehen von den gleichen Ausgangsfaktoren aus, die im folgenden Kapitel 4.1.1 zusammengefasst werden (→4.1.1 Definition der Bauteilanforderungen an monolithische, vorgefertigte Wandsysteme). Dennoch gibt es Schwerpunkte in jedem der Forschungsansätze, die in der Analyse der jeweiligen Betontechnologie herausgearbeitet werden (→4.2 Betontechnologie: Infraleichtbeton, 4.3 Betontechnologie: Gradientenbeton, 4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton).

4.1.1 Definition der Bauteilanforderungen an monolithische, vorgefertigte Wandsysteme

Gegenstand der Betrachtungen sind die unter (→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen) eingeführten monolithischen Betonbauweisen, die die folgenden Anforderungen vereinen:

- tragende Wandkonstruktion mit Dämmwirkung für 4-5-geschossigen Wohnungsbau
- monolithisches, mineralisches Material mit Leichtzuschlägen
- Bauteildimension und Wärmeleitfähigkeit entsprechend Anforderungen nach GEG⁴⁰⁴
- serielle Fertigung
- optimierte Betonmatrix mit reduziertem Zementgehalt
- Qualität mit Sichtbetonoberfläche
- gestalterische Varianz

4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen

Die zuvor gemachten Betrachtungen zur digital gestützten Nachhaltigkeit werden in dieser Vertiefung auf den Betonsektor zugeschnitten. Die Aspekte werden hinsichtlich der Zielstellung einer Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen neu sortiert. Dazu erfolgte von der Autorin eine gezielte Auswahl von Kriterien, denen ein nennenswertes Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zugeschrieben wird. Die Auswahl setzt sich zusammen aus Kriterien, die auf Materialebene eine Optimierung herbeiführen, aber auch aus Kriterien, die maßgeblich die Prozessebene optimieren beziehungsweise eine Umsetzung der Kreislauffähigkeit forcieren. Die Kriterien sind allesamt in der Wissenschaft hinlänglich bekannt, jedoch in dieser Zusammenschau neu gruppiert.

1. Nutzungsdauer
2. Reduktion von Masse
3. Reduktion Zementanteil
4. Substitution Zement
5. Einfluss der Druckfestigkeit
6. Recyclinganteil
7. Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten
8. Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik
9. Abfallreduktion
10. Transport und Regionalität
11. Vorfertigung und Produktivität
12. Zeit und Prozess

⁴⁰⁴ Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (wie Anm. 340).

Der Aufbau der Zuordnung der Kriterien entspricht der sich anschließenden Synopse, die nach den Oberbegriffen Materialtechnologie, Fertigungstechnologie, Konstruktion und Digitales Gestalten sortiert ist. Einleitend wird jedes Kriterium in einer Kurzdarstellung erläutert und ein Bezug zum vorangehend erläuterten Prinzip der Pyramidalen Zirkularität hergestellt. Dadurch können Planerinnen und Planer einen umfassenden Überblick über die relevanten Stellschrauben zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen erhalten. Darüber hinaus bilden die Kriterien die Wissensgrundlage für das kriteriengeleitete Prüfraster der Synopse.

4.1.2.1 Nutzungsdauer

Aufgrund der hohen CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase schneiden Betonkonstruktionen in der Ökobilanzierung signifikant schlechter ab als beispielsweise Holzkonstruktionen. Dabei ist zu beachten, dass bei der Bewertung von Betonkonstruktionen nach klassischen Bilanzierungsverfahren häufig eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird. Die tatsächliche Langlebigkeit von Betonwerkstoffen fließt in diesem Fall nicht angemessen in die Betrachtung ein. Im Betonkalender 2022 wird von Dehn und Wiens neben der Einflussgröße der Umweltwirkung der Zusammenhang aus Lebensdauer und Leistungsfähigkeit über die untenstehende Gleichung festgesetzt.⁴⁰⁵ Die Formel definiert das Nachhaltigkeitspotenzials von Baustoffen. Eine positive Beeinflussung des Baustoff-Nachhaltigkeitspotenzials kann nach Dehn und Wiens über die Steigerung der Leistungsfähigkeit, die Reduktion der Umweltwirkungen sowie die Erhöhung der Nutzungsdauer von Baustoffen erreicht werden:

$$\text{Baustoff-Nachhaltigkeitspotenzial} \sim \frac{\text{Lebensdauer} * \text{Leistungsfähigkeit}}{\text{Summe der Umweltwirkungen}}^{406}$$

Bei einer vergleichenden Betrachtung, die an der TU München zum Projekt „Einfach Bauen“ durchgeführt wurde, wurden monolithische Konstruktionen unterschiedlicher Materialisierung (Holz, Mauerwerk, Leichtbeton) auf Basis einer erweiterten Lebensdauerbetrachtung von 100 Jahren bilanziert.⁴⁰⁷ „Der Vergleich zeigt, dass bei einer Betrachtungsdauer von 100 Jahren das Treibhausgaspotenzial bei Leichtbeton deutlich niedriger liegt als bei einem Standard-Referenzgebäude aus Stahlbeton mit WDVS nach ENEC 2014/2016.“⁴⁰⁸

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Mit Blick auf die Zielstellung der Pyramidalen Zirkularität kann an dieser Stelle geschlussfolgert werden, dass die Berücksichtigung der Lebensdauer schon zu Planungsbeginn wesentlich ist. Thiel et al. beschreiben, dass gerade durch die lange Lebensdauer des Werkstoffs Beton bei entsprechender Planung, die eine Anpassbarkeit beziehungsweise Nutzungsflexibilität oder modulares Bauen berücksichtigt „ein großer Hebel bei zirkulärem Bauen mit Beton“ erreicht werden könne (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug).⁴⁰⁹

⁴⁰⁵ Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 140.

⁴⁰⁶ Vgl. ebd.

⁴⁰⁷ Vgl. Florian Nagler u. a., *Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion*, Stuttgart 2019 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3151).

⁴⁰⁸ Anna Mendgen und Mike Schlaich, »Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau – Zusammenfassung und Vergleich des Forschungsstands zu GWP und thermischen Speichereffekten«, in: *Bauphysik*, 43 (2021), Nr. 5, S. 335–346, hier S. 339.

⁴⁰⁹ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 265.

4.1.2.2 Reduktion von Masse

Oberstes Ziel sollte es sein, jeden Werkstoff in Abhängigkeit von seiner Leistungsfähigkeit einzusetzen und falls möglich durch leistungsfähigere Baustoffe zu ersetzen, nur so kann sichergestellt werden, dass Ressourcen zielgerichtet und effizient eingesetzt und damit letztlich eingespart werden. Diesem Assessment sollte sich jede geplante Konstruktion unterziehen. Das Verhältnis aus Materialeinsatz und Leistungsfähigkeit beschreibt der Begriff Formeffizienz.⁴¹⁰ So hat der Baustoff Beton beispielsweise im Einsatz als nichttragende Innenwand keine bevorzugte Berechtigung, da es bezüglich der damit verbundenen Anforderung Produkte mit geringerem ökologischem Fußabdruck gibt (→5.3 Fazit).

Bei der Betrachtung von Betonbauteilen erfordert die Reduktion der Masse eine bewusstere Dimensionierung. Durch digitale Berechnungsverfahren wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode⁴¹¹ können Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen simuliert werden. Somit kann eine Überdimensionierung, wie sie bei bisherigen Konstruktionen oftmals vorhanden ist, vermieden werden. „Instead of thin-walled shell structures, thick-walled concrete components subjected to flexural stress dominate today's construction activities. The reason for this is the permanent increase in wage costs compared to material costs over the past decades. In concrete construction, this led to the increased use of uniform system formwork, which replaced material-saving construction systems requiring labor-intensive, individualized mold making.“⁴¹² Eine optimierte Materialzusammensetzung der Betonmatrix kann zur Reduktion von Ressourcen beitragen, indem in Abhängigkeit von der Tragfunktion beispielsweise Leichtzuschläge zugefügt werden oder die Einbindung von Luft erhöht wird.⁴¹³ Die Möglichkeit, Material durch neuartige automatisierte Fertigungstechnologien (Leitfaktor Technik) zielgerichtet einzusetzen, kann ebenso Ressourcen einsparen.⁴¹⁴ Hierbei werden konstruktive, geometrische Prinzipien wie beispielsweise Bogenkonstruktionen oder die Implementierung von Hohlkörpern oder Rippen entsprechend dem Lastverlauf eingesetzt. Ein Beispiel für das optimierte Zusammenspiel aus erhöhter Tragfähigkeit bei reduziertem Materialeinsatz zeigt die **Abbildung 48** zur Forschung zum Rippmann Floor System (RFS), welches das klassische, auf Zug belastete Deckensystem umkehrt und durch eine leicht bogenförmige Ausbildung in ein auf Druck beanspruchtes System gewandelt wird.⁴¹⁵

⁴¹⁰ Vgl. Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 45.

⁴¹¹ Finite-Elemente-Methode (FEM).

⁴¹² Kloft u. a. 2020 (wie Anm. 119), S. 131.

⁴¹³ Vgl. Materialzusammensetzungen des Aeroleichtbetons, Infraleichtbetons, Gradientenbetons

⁴¹⁴ Vgl. Digital Building Technologies, »Fast Complexity«, <https://dbt.arch.ethz.ch/project/fast-complexity/> (abgerufen am 7. Juni 2023).

⁴¹⁵ M. Rippmann u. a., »Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes«, in: *Materials Today Communications*, 15 (2018), S. 254–259, hier S. 254.

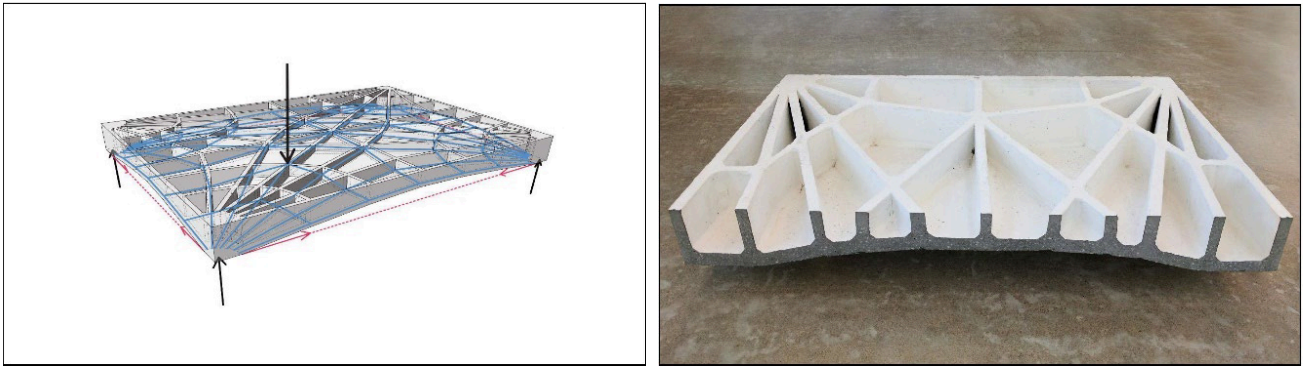


Abb. 48: Rippmann Floor System (RFS) © Block Research Group, ETH Zürich

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Bei der Reduktion der Masse geht es vorwiegend um die Verknüpfung optimierter Materialzusammensetzungen (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material), konstruktiver Prinzipien und automatisierter Fertigung (→3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil). Die Erschließung dieser Vorteile wird nur durch digitale Simulation im Vorfeld möglich (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug) und beschreibt so das Spannungsfeld zwischen den Leitfaktoren Gestaltung – Konstruktion, Konstruktion – Technik und Gestaltung – Technik.

4.1.2.3 Reduktion Zementanteil

Laut Studie des WWF mit dem Titel „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie“ entstehen zwei Prozent der deutschen und acht Prozent der globalen Treibhausgasemissionen bei der Produktion von Zement.⁴¹⁶ Aufgrund der damit verbundenen Relevanz wurden bereits vielseitige Strategien zur Reduktion dieser Emissionen initiiert, die auf unterschiedlichen Ebenen national sowie international ansetzen. Beauftragt von der Internationalen Energie Agentur (IEA) ⁴¹⁷, hat die „Cement Sustainable Initiative“ (CSI) schon im Jahr 2018 einen Fahrplan für die Zementindustrie erstellt, wie sich diese zukunftsfähig aufstellen kann. Ebenfalls sind Akteure der Wirtschaft wie der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), an einem nachhaltigen Wandel des Werkstoffs Zement interessiert.⁴¹⁸ Dieser vollzieht sich jedoch langsam und in unterschiedliche Richtungen, wie die Studie des WWF ebenso aufzeigt. Sie unterteilt bei der Potentialanalyse bezogen auf die Herstellung von Zement in Einsparung prozessbedingter sowie energiebedingter Emissionen. „Knapp 50% der Emissionen sind auf die Entsäuerung des Klinkers während des Brennvorgangs im Hochofen, sog. prozessbedingte Emissionen, zurückzuführen. Die restlichen Emissionen entstehen energiebedingt durch die Wärmebereitstellung für den Brennprozess im Hochofen (Brennstoffe), den Stromverbrauch für Mahl-, Mühl- und Förderprozesse sowie den Transport der Rohstoffe.“⁴¹⁹ Nachhaltigkeitspotenzial liegt somit in der Reduktion dieser prozess- und energiebedingten Emissionen durch beispielsweise effizientere Verfahren oder den Einsatz erneuerbarer Energien. Für das Bauwesen bestehen zudem auf Materialebene drei Substitutionsstrategien: 1.) Ersatz des Baustoffs Beton; 2.) Verringerung des Zementanteils im Beton; 3.) Verringerung des Klinkeranteils im Zement.⁴²⁰ Eine Reduktion des Zementanteils wird durch die zuvor beschriebene Strategie der Reduktion von Masse erreicht, da in diesem Fall auch der Zementanteil direkt vermindert wird. Darüber hinaus kann der Zementanteil in Abhängigkeit der erforderlichen Druckfestigkeit sinken (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit), was wiederum durch optimierte Konstruktionen ermöglicht wird.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Schnittstelle Digitales Material zeigt sich bei der Anwendung der drei eingeführten Substitutionsstrategien. Im Abgleich konstruktiver Anforderungen mit einem angemessenen Materialeinsatz kann Beton und damit auch Zement funktionsoptimiert zum Einsatz kommen. Grundlage dieser Reduktionsstrategien

⁴¹⁶ Vgl. WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 5.

⁴¹⁷ Vgl. International Energy Agency (IEA), World Business Council on Sustainable Development (WBCSD), Cement Sustainability Initiative, *Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, 2018, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf> (abgerufen am 5. August 2023).

⁴¹⁸ Vgl. Verein Deutscher Zementwerke e.V., *Zementindustrie im Überblick 2022/2023*, Berlin, 2022, S. 10, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2022-2023.pdf (abgerufen am 5. August 2023).

⁴¹⁹ WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 13.

⁴²⁰ Vgl. ebd., S. 14.

bildet die digitale Simulation (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material).

4.1.2.4 Substitution Zement

Für die negative Ökobilanz bei der Herstellung von Portlandzement (Typ CEM I) sind maßgeblich die prozessbedingten CO₂-Emissionen verantwortlich. Detaillierte Einblicke in die Zementproduktion, mit den damit verbundenen Emissionen, Abfallstoffen, aber auch Entwicklungen zu Zementen mit reduzierten CO₂-Emissionen geben Sobek et al.⁴²¹ „Der Großteil des in Deutschland abgesetzten Zements entfällt auf die drei Hauptzementarten Portlandzement (CEM I, ca. 27 Prozent), Portlandkompositzement (CEM II, ca. 51 Prozent) sowie Hochofenzement (CEM III, ca. 20 Prozent). Künftig wird eine weitere Verschiebung des Marktes hin zu klinkereffizienteren Zementen wie z.B. CEM II-C/M angestrebt.“⁴²² Bezogen auf den dritten Punkt der WWF-Studie „Verringerung des Klinkeranteils im Zement“ wird in der „CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie“ der CSI in einem Szenario eine CO₂-Einsparung von 19 Prozent durch genau diese Substitution des Portlandzementklinkers und durch den Einsatz neuer Bindemittel als möglich beschreiben.⁴²³ Das Kapitel „Klinkereffiziente Zemente“ des Betonkalenders 2022 erläutert ausführlich die Möglichkeiten neuartiger Zemente. Diese neuen CEM-II/C- und CEM-VI-Zemente werden in der EN 197-5 geregelt. Maßgeblich wird dabei der Gehalt des Portlandzementklinkers im Zement/Bindemittel optimiert. „Hierbei spielt neben dem Einsatz von CEM-II/C-Zementen (Klinkeranteil zwischen 50 und 65 %) auch CEM-VI-Zementen (Klinkergehalt zwischen 35 und 50 %) eine Rolle. Der Einsatz von Hüttensand und v. a. Flugasche wird dabei sukzessive abnehmen und gleichzeitig werden calcinierte Tone und ungebrannter Kalkstein an Bedeutung gewinnen. Bis 2050 kann der Klinker-Zement-Faktor so auf 53% gesenkt werden.“⁴²⁴ Zu berücksichtigen ist, dass für das Eintreten der prognostizierten Entwicklung die angesetzten Substitute und daran gekoppelte Prozesse in ausreichendem Maße verfügbar sein müssen.

Im Rahmen der Dissertation kann auf den spezifischen Forschungsbedarf in diesem Feld nicht näher eingegangen werden. Der in Abb. 49 von Mendgen und Schlaich dargestellte Vergleich von Zementarten belegt jedoch den möglichen positiven Einfluss klimaeffizienter Zemente auf die Ökobilanz der Betonkonstruktionen.

⁴²¹ Vgl. Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 44–52.

⁴²² Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2022 (wie Anm. 434), S. 9.

⁴²³ Vgl. Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 140.

⁴²⁴ Bergmeister/Fingerloos/Wörner 2022 (wie Anm. 121), S. 140.

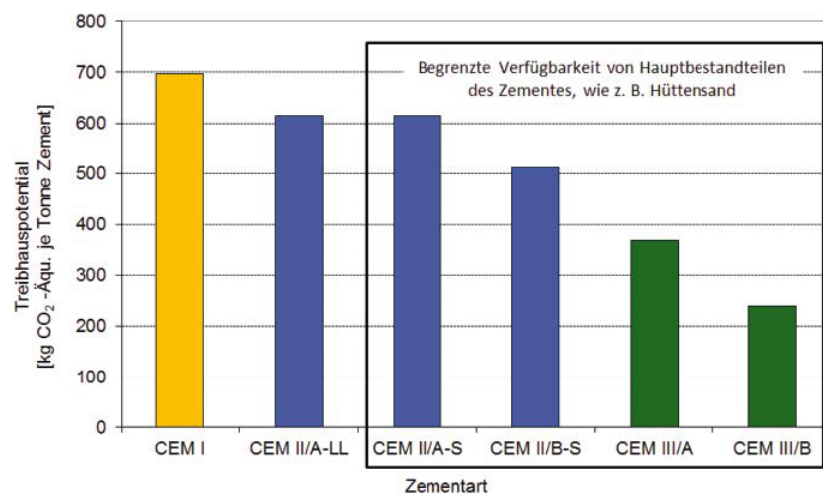


Abb. 49: Optimierung des Treibhauspotenzials durch klimaeffizientere Zemente

© Anna Mendgen und Mike Schlaich⁴²⁵

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Auch die Entwicklung neuartiger Materialzusammensetzungen und deren Einsatz verortet sich in der Schnittstelle des Digitalen Materials und ist wesentlich für die Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen verantwortlich (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material)

⁴²⁵ Aus: (Mendgen und Schlaich 2021, (wie Anm. 408), S. 336).

4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit

In der Studie „Konzepte zur Herstellung ressourceneffizienter Betone am Beispiel Zement“ wird der Zusammenhang aus Druckfestigkeit und Lebensdauer vor dem Hintergrund der entstehenden CO₂-Emissionen hergestellt.⁴²⁶ Entscheidend ist laut Studie die Abstimmung der tragkonstruktiven Anforderung an die Materialzusammensetzung, da das Treibhausgaspotenzial nachweislich in Relation zur Druckfestigkeitsklasse um 10-15 Prozent steigt.⁴²⁷ Die Druckfestigkeit der Materialmatrix könnte zukünftig direkt auf Gebäudehöhe und -klasse und damit einhergehende Lasten abgestimmt werden, um so maximal Ressourcen einzusparen. Dies geht aus der Forschung der HTW Berlin „Ökobilanzierungsvergleich zwischen Ortbetondecken und Spannbeton-Fertigdecken am Beispiel einer Wohnanlage für Studierende in Bochum“ hervor.⁴²⁸ Es gibt demnach bei der Betrachtung des Einflusses der Druckfestigkeit zwei Möglichkeiten, eine CO₂-Reduktion zu bewirken: Es kann entweder ein leistungsfähiger Beton mit einem schlanken Querschnitt (→4.1.2.2 Reduktion von Masse), jedoch höherem Zementanteil zum Einsatz kommen, oder die Festigkeit minimiert werden und damit auch der Zementanteil. „Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend differenzierte Bemessung. [...] Wichtig ist, die Leistungsfähigkeit der Betone, z. B. die Druckfestigkeit, möglichst vollständig auszunutzen.“⁴²⁹

Auch Mendgen und Schlaich differenzieren den Zusammenhang und belegen analog im Rahmen der Forschung um den Infraleichtbeton, dass eine höhere Druckfestigkeit ein unmittelbar größeres Treibhauspotenzial bewirkt.⁴³⁰

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Zwei mögliche Strategien lassen sich abschließend zusammenfassen. So kann entweder die Betonqualität bei vordimensionierten Bauteilstärken an die Leistungsnotwendigkeit angepasst, oder schlankere Bauteile mit leistungsfähigeren Betonen umgesetzt werden. Mit einer Verknüpfung an weitere Parameter, beispielsweise Anforderungen an die Dämmwirkung, kann das entsprechende Optimum für die jeweilige Bauaufgabe konzipiert werden. Diese Potenziale ergeben sich an der Schnittstelle der Leitfaktoren Gestaltung und Technik im Sinne der Pyramidalen Zirkularität (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material).

⁴²⁶ Christoph Müller, »Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement«, in: *Beton*, 9 (2019), S. 311–314, hier S. 312.

⁴²⁷ Vgl. Tab. 1 Quelle des Concrete Sustainability Council (CSC)

Julian Biermann u. a., »Nachhaltig bauen mit Beton: Klimaeffizient. Ressourcenschonend. Energiesparend«, S. 14–15, <https://betonshop.de/media/wysiwyg/PDF/Nachhaltig-bauen-mit-Beton-2023.pdf> (abgerufen am 7. April 2024).

⁴²⁸ Vgl. Andreas Heuer, »Ortbetondecken vs. Spannbeton-Fertigdecken: Auswirkung auf die Ökobilanz eines Gebäudekomplexes«, 2023, S. 26, https://www.dw-systembau.de/downloads.html?file=files/downloads/Nachhaltigkeit/HTW%20Berlin_%C3%96kobilanzierung_Ortbetondecken%2Bvs.%2BSpannbeton-Fertigdecken.pdf (abgerufen am 7. April 2024).

⁴²⁹ Biermann u. a. (wie Anm. 427), S. 14.

⁴³⁰ Vgl. Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 346.

4.1.2.6 Recyclinganteil

Aktuell ist ein Recycling-Anteil von bis zu 45 Volumen-Prozent je nach Kategorie der beigefügten Gesteinskörnung möglich und wird in der Richtlinie für Beton mit RC-Gesteinskörnung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) sowie in der DIN EN 206-1 in Verbindung mit der DIN 1045-2, Abschnitte 5.2.3.3 und 5.2.4, geregelt.⁴³¹ Die Thematik wird kontrovers diskutiert, da die Einsparungen der Treibhausgasemissionen durch die Einbindung des Rezyklats im Vergleich zur alternativen Möglichkeit der Reduktion des Zementanteils nur marginal seien.⁴³² Es sei jedoch zu beachten, dass nicht nur die Reduktion der Emissionen relevant ist. Der Einsatz von Rezyklat spare darüber hinaus wertvolle Primärressourcen ein, so dass der Materialfußabdruck um 31-43 Prozent im Vergleich zum konventionellen Beton reduziert werden könne.⁴³³ Neben der Substitution der Gesteinskörnung können auch feinere Anteile rezyklierter Materialien in die Betonmatrix eingebunden werden. „Diese sogenannten (gemahlenen) Brechsande können im Bindemittel üblicherweise eingesetzte inerte Zuschlagstoffe wie Kalksteinmehle ersetzen.“⁴³⁴ Die Nutzung alternativer Zusatzstoffe wird von Mostert et al. als gewinnbringend zur Reduktion des Klimafußabdrucks beschrieben.⁴³⁵ Auch in diesem spezifischen Forschungsbereich gibt es vielfältige Ansätze auf Materialebene ebenso wie mit Bezug auf neue Fertigungstechnologien zur Gewinnung von Recyclingstoffen. Müller legt zudem eine umfassende Bestandsaufnahme der notwendigen Anlagen zur Aufbereitung vor, die die Grundlage für die eigentliche Einbindung von Rezyklaten bilden.⁴³⁶

Entscheidend bei der Verwendung von Recycling-Anteilen sind deren ausreichende und lokale Verfügbarkeit, da ein langer Transport einer positiven Klimabilanz entgegenwirken. An dieser Stelle kann keine pauschale Handlungsempfehlung zum Einsatz von Rezyklaten in Betonbauteilen gegeben werden. Vielmehr sollte geprüft werden, ob Synergien genutzt werden können, wenn beispielsweise ein Bestandsgebäude rückgebaut wird und eine direkte lokale Aufbereitung der Baustoffe und eine Verwendung möglich ist. Vor diesem Hintergrund wird sich die Infrastruktur zum Beispiel von stationären hin zu mobilen Recyclinganlagen weiterentwickeln müssen.

Die „Ökonomie des Urban Mining“ wurde beispielhaft beim selektiven Rückbau des Modellprojektes Rathaus Korbach beispielhaft umgesetzt.⁴³⁷ Das Projekt wird ausführlich in dem Forschungsbericht „Neubau aus Rückbau -

⁴³¹ Vgl. Fachinformationen werden im Zement-Merkblatt Betontechnik B30 zusammengefasst.

Michaela Biscopig, Diethelm Boslod und Markus Brunner, »Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton«, in: *Zement-Merkblatt Betontechnik*, S. 1–8.

⁴³² Vgl. Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 143.

⁴³³ Vgl. Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 84.

⁴³⁴ Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 141.

⁴³⁵ Vgl. Clemens H. Mostert u. a., *Neubau aus Rückbau. Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)*, BBSR-Online-Publikation, Bonn, S. 59, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-15-2021-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

⁴³⁶ Vgl. Anette Müller, *Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*, Wiesbaden 2018 (SpringerLink Bücher), S. 125–147.

⁴³⁷ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 84.

Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)⁴³⁸ dokumentiert und belegt exemplarisch einen vollumfänglichen Einsatz von Recyclingmaterialien. Die konkreten Effekte auf die Ökobilanz von R-Betonen werden durch ein neuartiges digitales Bewertungstool der Firma SURAP⁴³⁹ erforscht.⁴⁴⁰ „Mit der vergleichenden Fußabdruckanalyse wurde erstmalig ein softwaregestütztes, ökobilanzielles Bewertungskonzept entwickelt und erfolgreich getestet, mit dem die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verwendung von RC-Materialien in Urban Mining-Projekten abgeschätzt werden kann. Die ausgewählten Indikatoren haben sich als richtungssicherer Bewertungsmaßstab für die Bestimmung der Ressourceneffizienz im Hochbau erwiesen.“⁴⁴¹

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Schnittstelle des Digitalen Materials zeigt sich in der Nutzung digitaler Simulations- und Bewertungstools und gibt Rückschluss auf den ressourcenschonenden Materialeinsatz auch unter Anwendung von Rezyklaten (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material). Auch die Einbindung von Rezyklaten beeinflusst die Materialzusammensetzung und Bauteilentwicklung.

⁴³⁸ Mostert u. a. (wie Anm. 435).

⁴³⁹ SURAP ist ein Startup, das sich auf die Bilanzierung des Ressourcenaufwands und der Klimawirkung von Baumaterialien, inklusive R-Betonen, und deren Implementierung in Building Information Modeling (BIM) Systeme spezialisiert hat.

⁴⁴⁰ Vgl. C. Mostert u. a., »Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588 (2020), Nr. 5, S. 52021, hier S. 1.

⁴⁴¹ Mostert u. a. (wie Anm. 435), S. 58.

4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten

Gerade in Betonkonstruktionen steckt aufgrund der großen Mengen an gebundenem CO₂ ein großes Nachhaltigkeitspotenzial. Dies rechtfertigt es, diese Strukturen als Speicher grauer Energie zu halten, und durch eine planerische Herangehensweise auf unterschiedlichen Skalen in robuste und erweiterbare Strukturen zu wandeln. Der Abriss und Ersatz hingegen bedingen den Verlust vorangegangener Bindungen grauer Emissionen des Bestandes und implizieren weitgehend neue Emissionen. Sonderegger beschreibt die Sinnhaftigkeit der Wiederverwendung von bestehenden massiven Konstruktionen wie folgt: „Insbesondere massive Primärstrukturen, die den Löwenanteil an der Baumasse ausmachen, lassen sich kaum zerstörungsfrei dekonstruieren und folglich werden diese in den Recyclingprozessen zu Rohstoffen zerlegt und aufgereiht. Innenausbauten, Holz- und Stahlbaustrukturen eignen sich besser zur Wiederverwendung, aber auch nur, wenn sich die Verbindungen der Bauteile beschädigungsfrei demontieren lassen, was oftmals nicht der Fall ist.“⁴⁴²

Basierend auf dem Ziel einer kreislauffähigen Betonwirtschaft wird geschlussfolgert, dass man in Betracht ziehen sollte, Betonkonstruktionen situationsbezogen so zu konstruieren, dass Sie zerstörungsfrei wiederverwendet werden können, also als gesamtes Bauteil. Laut Aussage der Autorin ist diese Rückbaubarkeit in Abhängigkeit an die konzipierte Flexibilität zu berücksichtigen. Die Anforderung an eine flächeneffiziente Nachnutzung und zerstörungsfreie Zerlegung von Betonstrukturen beschreibt Rosen wie folgt: „Das mineralische Baustoffrecycling bietet ein hohes Potenzial zur Einsparung endlicher stofflicher Ressourcen, kann aber nur einen geringen Beitrag zum Klimaschutz leisten, weil eine Rückgewinnung des klimaschädlichen Zements noch nicht möglich ist. Bestandsgebäude sollten deshalb bevorzugt erhalten werden, wenn eine flächeneffiziente Nachnutzung sinnvoll möglich ist. Bei der Planung neuer Gebäude muss der Anteil von Stahlbeton auf ein möglichst geringes Maß reduziert werden. Die eingesetzten Betonbauteile sollten im besten Fall so konstruiert sein, dass sie als Bauelemente ohne Zerstörung komplett wiederverwendet werden können. Hinsichtlich der Entwicklung und des Einsatzes demontagefähiger Betonkonstruktionen besteht jedoch noch vielfältiger Forschungsbedarf.“⁴⁴³ Das Forschungsprojekt „MZD“⁴⁴⁴ verfolgt den dargelegten Zusammenhang aus bewusster Reduktion massiver Bauteile und deren in Teilen reversiblen Fügung (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“).

⁴⁴² Sonderegger 2021 (wie Anm. 392), S. 285.

⁴⁴³ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 91.

⁴⁴⁴ DBU „Modular – Zirkulär – Digital: Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“ (10/2022-03/2025).

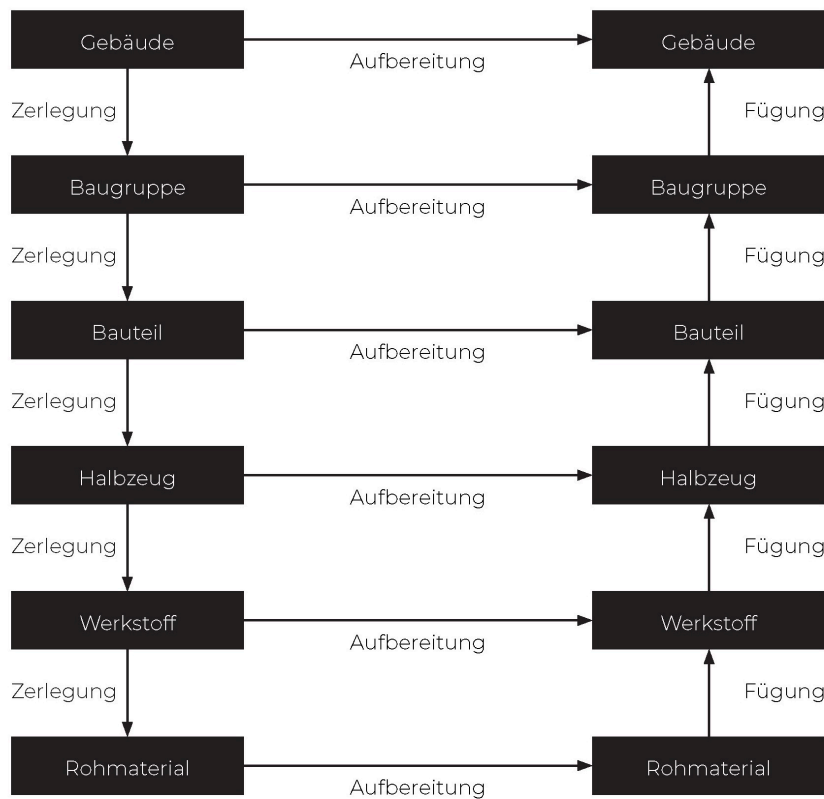


Abb. 50: Ebenen der Wiederverwendung © Baukreisel e.V.

Entscheidend bei der Rückführung ist, auf welcher Stufe dabei angesetzt wird. Die obenstehende **Abbildung 50** zeigt die Ebenen der Wiederverwendung und damit einhergehend, dass das Nachhaltigkeitspotenzial in Abhängigkeit von der Ebene der Rückführung steigt. Bei der Rückführung auf Bauteilebene ganzer Komponenten entstehen wesentlich weniger Emissionen als bei der Rückführung auf Baustoffebene beispielsweise als Betonbruch. Ein Wiederverwendungsfall wird als „Optimal Reuse Case (ORC)“⁴⁴⁵ bezeichnet, wenn er eine sehr hohe praktische Anwendbarkeit aufweist und die vom Verein Baukreisel definierten vier Kriterien „Gesamtkosten, CO₂-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Abfallmenge“ optimiert.⁴⁴⁶

Der Umsetzung einer Wiederverwendung müssen immer Aufwand und Kosten gegengerechnet werden. In der Lehrveranstaltung „Material – Einsatz – Wandel“⁴⁴⁷ wurde in Kooperation mit Baukreisel e.V., der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen Prof. Dr.-Ing. J. Albus und dem Lehrstuhl Baukonstruktion Prof. P. Eckert und W. Eckert ein Format entwickelt, das die Studierenden für die Prozesse bei der Wiederverwendung sensibilisieren soll. Es galt dabei, das optimale Wiederverwendungsszenario für ein gewähltes Bauteil aus dem bestehenden Materiallager des Rheinlanddammturms in Dortmund zu eruieren (**Abb. 51**).

⁴⁴⁵ Vgl. Baukreisel e.V., »Baukreisel: Kollektiv für Transformtion und Gestaltung«, <https://baukreisel.org/> (abgerufen am 23. April 2024).

⁴⁴⁶ Jonas Läufer und Conrad Riesch, *WPF - MATERIAL EINSATZ WANDEL. Optimal Reuse Case (ORC)*, Dortmund 2023.

⁴⁴⁷ Wahlpflichtfach mit dem Titel „Material - Einsatz – Wandel“ im Sommersemester 2023 an der TU Dortmund.

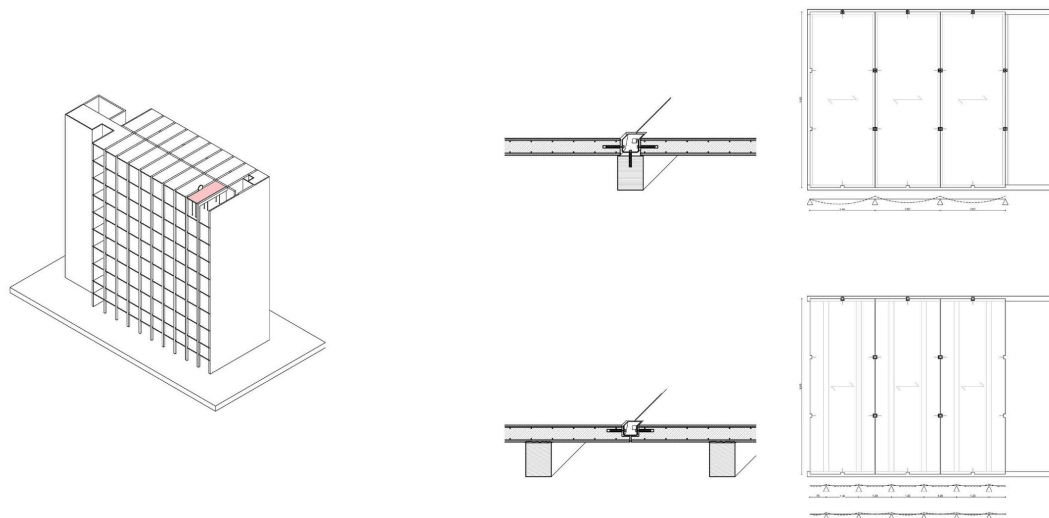


Abb. 51: Ergebnis aus der Lehrveranstaltung „Material – Einsatz – Wandel“ © Dina Suberg, Leona Wiemers

Eine Forschung mit zwei Fallstudien zur Wiederverwendung von Betonkomponenten wurden in der Schweiz von K pfer et al. an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) durchgeführt. Dies geschah vor dem Hintergrund die Auswirkungen der Wiederverwendung von Betonbauteilen auf die Ökobilanz zu evaluieren. Bei der Studie „Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies“⁴⁴⁸ wurden im ersten Fall großformatige Betonblöcke zur Konstruktion einer Bogenbrücke sowie im zweiten Fall zur Herstellung einer Parkplatzdecke wiederverwendet. K pfer et al. zogen folgende Bilanz: „Reusing concrete blocks can significantly reduce the environmental footprint of projects. Compared to conventional alternatives, the studied reused-concrete arch and pavement reduce up to 75 % and 82 % climate-change impact and up to 67 % and 77 % the ecological load, respectively.“⁴⁴⁹

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Wiederverwendung kompletter Komponenten stellt an der Schnittstelle zwischen Technik und Konstruktion im Rückbau-Kreislauf einen nennenswerten Mehrwert zur Einsparung von Ressourcen dar (→3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung). Diese Strategie einer Wiederverwendung muss bereits in der Herstellung durch eine geeignete Konstruktion und Fügetechnik die spätere Zerlegung vorbereiten, so dass ein Neuentwurf mit wiederverwendeten Bauteilen möglich wird (→3.1.3.5 Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf).

⁴⁴⁸ C. K pfer u. a., »Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078 (2022), Nr. 1, S. 12013.

⁴⁴⁹ Ebd., S. 8–9.

4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik

„Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist bereits zu Beginn der Planung auf die Möglichkeit des selektiven Rückbaus zu achten.“⁴⁵⁰ Die Umsetzung einer reversiblen Fügetechnik hat Auswirkungen auf Statik und Abdichtungstechnik und muss auf das System abgestimmt sein. So kann der Verbund bei Wandbauteilen beispielsweise über die gesamte Querschnittsbreite erfolgen, oder aber punktuell wirken. Bei der Konzipierung zerlegbarer Fügetechniken sollte eine sortenreine Trennung im Vordergrund stehen. Die Herangehensweisen zur Entwicklung loser Fügeprinzipien sind vielfältig und erfordern eine hohe Präzision. Innerhalb des Transregio Projektes TRR 277 „Additive Manufacturing in Construction“ werden von Lanwer et al. neuartige Trockenfugen entwickelt, die unter Einbindung additiver Fertigungsverfahren realisiert werden.⁴⁵¹ Thiel et al. beschreiben den Zusammenhang aus Fügeprinzip und Lastübertragung. Oftmals geht eine reversible Fügetechnik mit Einbußen bei der Kraftübertragung einher. „Es gilt daher für jede Konstruktion die geeignete lösbare Verbindung zu wählen, ohne dabei den Materialbedarf unverhältnismäßig ansteigen zu lassen, um somit eine bestimmte Belastbarkeit zu erreichen.“⁴⁵² Hier können geometrische Prinzipien wie Nut-Feder-Verbindungen ausgebildet werden. Alternativ können Stoßfugen mit Klettbändern ausgeführt werden, die innerhalb eines automatisierten Prozesses eingelegt werden. Eine weitere Möglichkeit bildet die Verwendung von mechanischen Elementen wie Popnieten, die in die Betonstrukturen integriert werden können. An der TU Graz am Institut für Architekturtechnologie laufen Forschungstätigkeiten, die die Entwicklung reversibler Fügetechniken von Betonbauteilen vorantreiben.⁴⁵³ Das Prinzip des Klettbetons wird beispielsweise von Raudaschl in der Dissertationsschrift „Klettbeton: Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung“ ausgeführt.⁴⁵⁴

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Auch wenn die Thematik der Rückbaubarkeit im ersten Moment bei Betonkonstruktionen aufgrund der vergleichbar langen Lebensdauer nicht vorrangig erscheint, sollte diese nicht ausgeschlossen werden. Vielmehr sollte bewusst bereits im Planungsprozess abgewogen werden, bei welchen Konstruktionen es sinnvoll ist, eine Rückbaubarkeit von Beginn an mitzudenken. Die Kriterien Rückbaubarkeit und reversible Fügetechniken sind somit kongruent zur Schnittstelle Technik und Konstruktion (→3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung).

⁴⁵⁰ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

⁴⁵¹ Jan-Paul Lanwer u. a., »Jointing Principles in AMC—Part 1: Design and Preparation of Dry Joints«, in: *Applied Sciences*, 12 (2022), Nr. 9, S. 4138.

⁴⁵² Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 268.

⁴⁵³ Vgl. F. Oswald, R. Riewe und M. Raudaschl, »Hook-and-Loop fastener – application for the technical building equipment«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323 (2019), Nr. 1, S. 12124, hier S. 6–7.

⁴⁵⁴ Vgl. Matthias Raudaschl, »Klettbeton: Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung« Technische Universität Graz, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=6110fd7f6240e&location=browse> (abgerufen am 20. September 2023).

4.1.2.9 Abfallreduktion

Einen umfassenden Überblick über die Mengen und eine Aufschlüsselung zum Abfallaufkommen in Deutschland gibt Sobek: „Der Begriff Bauschutt bezeichnet ausschließlich mineralische Abfälle, also Baumaterialien wie zum Beispiel Beton, Backsteine, Ziegel, Klinkersteine und Mörtelreste, aber auch Fliesen, Keramiken oder Ziegel.“⁴⁵⁵ Ausschlaggebend vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft ist Sobeks Wertung zum Umgang mit diesen enormen Massen. „Trotz einer nominal sehr hohen Verwertungsquote von über 90% bei Baustellen- und Abbruchabfällen ist festzustellen, dass eine hochwertige Kreislaufführung unter Weiternutzung der stofflichen Eigenschaften der mineralischen Sekundärbaustoffe nicht umfassend praktiziert wird. Von den jährlich in Deutschland anfallenden circa 52 mio. t Bauschutt werden zwar ca. 80% recycelt, aber nur ein Bruchteil davon wird wieder als hochwertiger Betonzuschlagstoff eingesetzt. Rund 42 Mio. t an Recyclingbaustoffen werden im Straßenbau eingesetzt. Ein großer Teil des Sekundärmaterials wird in Form eines Downcyclings⁴⁵⁶ beispielsweise im Landschafts- und Wegebau oder als Ausgleichsmaterial verwendet. Die Gründe hierfür liegen zumeist in informatorischen, logistischen und rechtlichen Hindernissen.“^{457,458} Mit dem Ziel einer Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen und deren Wertschätzung als Ressource innerhalb des urbanen Rohstofflagers entsprechend des Urban Mining Ansatzes ist es wichtig, rückzubauende Betonkonstruktionen nicht einfach zu zerkleinern, sondern im besten Fall als Komponente weiter zu vermitteln. Laut eines gemeinsamen Forderungspapiers der Deutschen Umwelthilfe und der A4F⁴⁵⁹ mit dem Titel „Gebäudeabrisse vermeiden und Bauen im Bestand fördern“ wird ein Lösungsansatz zur Abfallreduktion durch eine „verpflichtende Bauteilsichtung“ gegeben: „Eine in der Planungsphase stattfindende Bauteilsichtung vor dem Rückbau ermöglicht eine Zuschreibung von Bauteilen und Baustoffen dem sinnvollsten Nutzungsweg (Wiederverwendung, hochwertiges Recycling, stoffliche Verwertung) oder, wenn nicht anders möglich, der Verbrennung oder Deponierung. Durch diese Zuschreibungen kann ein selektiver Rückbau effektiv geplant und damit Wertstoffe dem Kreislauf bestmöglich zugeführt werden. So können die massiven Abfallmengen (ca. 55% des deutschen Abfallaufkommens) reduziert werden.“⁴⁶⁰

⁴⁵⁵ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 163.

⁴⁵⁶ Vgl. Erläuterungen im Glossar.

⁴⁵⁷ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 163–164.

⁴⁵⁸ Originalquelle aus: Felix Müller u. a., »Urban Mining: Ressourcenschonung im Anthropozän«, 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf.

⁴⁵⁹ Die Abkürzung steht für Architects for Future.

⁴⁶⁰ Deutsche Umwelthilfe, Architects for Future, *Gebäudeabrisse vermeiden und Bauen im Bestand fördern. Gemeinsames Forderungspapier von A4F und DUH*, 2022, S. 4, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Geb%C3%A4udeabrisse/A4F_DUH_Forderungspapier_Abrissvermeidung_08122022_final.pdf (abgerufen am 28. Dezember 2023).

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Eine Sichtung von Betonbauteilen kann maßgeblich mithilfe digitaler Werkzeuge, wie beispielsweise, solche, die zur zerstörungsfreien Diagnostik genutzt werden, erfolgen. Dort ist die Schnittstelle Digitaler Werkzeuge verortet und deren Kopplung mit der Digitalen Zerlegung relevant. Dies leitet zurück zu den Punkten (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik) und damit zur Berücksichtigung einer Rückbaubarkeit durch reversible Fügung und darauf aufbauend einer Wiederverwendung von Betonkomponenten. Entsprechend sollen Verbundkonstruktionen und Komposite künftig vermieden werden. Für Betonkonstruktionen könnte dies die Umsetzung einer sortenreinen Betonmatrix oder vielmehr die Zerlegung der Bestandteile durch geeignete Verfahren bedeuten. Auch die Abfallreduktion wird an unterschiedlichen Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität mitgestaltet.

4.1.2.10 Transport und Regionalität

Der Faktor Transport tritt beim Betonbau in unterschiedlichen Phasen auf. So ist zunächst der Transport der Ausgangsstoffe in der frühen Phase der Betonherstellung relevant. Deutschlandweit besteht eine durchgehend regionalisierte Infrastruktur von Betonwerken, um Transportwege gering zu halten. Laut Angabe der Studie des WWFs „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie“ erfolgen 75 Prozent der Zementlieferungen im Umkreis von 100 km.⁴⁶¹ Dies ist insbesondere den Transportkosten geschuldet. „Bei Transportbeton verstärkt sich die Relevanz der Transportkosten noch weiter. Bei der dafür benötigten Körnung (Kies bzw. Sand) fallen ähnliche gewichtsbezogene Transportkosten an, stehen allerdings einem Warenwert von nur ca. 5 – 10 €/Tonne gegenüber. Sowohl bei Beton als auch bei Zement ergibt sich somit eine starke finanzielle Motivation die Transportdistanzen zu minimieren, was eine Regionalisierung der Industrie zur Folge hat.“⁴⁶² Der Transport ist ein wesentlicher Kostenfaktor, aber darüber hinaus relevant beim Ausstoß von Emissionen im Bauwesen. Dies fließt aber oftmals nicht vollumfänglich in die Bilanzierung ein. Laut Sobek würden „Energieverbrauch und die Emissionen, welche bei Transportvorgängen während der Herstellung und beim Rückbau von Bauwerken entstehen, [werden] bei der Bilanzierung im Bauwesen häufig nicht erfasst, sondern den Sektoren ‚Mobilität‘ oder ‚Industrie‘ zugeschrieben, d.h. externalisiert. Die wahren Zusammenhänge werden hierdurch verschleiert.“⁴⁶³ Sobek macht darüber hinaus deutlich, welches Ausmaß an Emissionen auch beim Rückbau von Betonkonstruktionen entsteht: „Beim Transport von Betonschutt zu Deponien im Norden Tschechiens oder im Süden von Polen, so wie dies heute beim Anfall von Bauschutt in Süddeutschland häufig vorkommt, wird mehr CO₂ durch den Lkw-Transport emittiert als bei der Herstellung des Betons selbst.“⁴⁶⁴ Diese Aussage macht deutlich, wie wichtig es ist, den Faktor Transport entsprechend über alle Lebensphasen zu gewichten. Für Betonkonstruktionen bedeutet die Reduktion von Masse demzufolge auch eine Reduktion der Emissionen durch den eingesparten Transport, sowohl bei der Herstellung als auch beim Rückbau.

Bei der Verlagerung der Betonfertigung ins Werk werden auf den ersten Blick nicht unbedingt Emissionen und Kosten eingespart. Oftmals fallen beim Transport großformatiger Betonbauteile sogar erhöhte Kosten für Sondertransporte an. Wirtschaftlich betrachtet können diese jedoch durch die effiziente und deutlich verkürzte Bau- und Montagezeit häufig ausgeglichen werden wie von Bertram et al. wie folgt zusammengefasst: „Logistics. In the world of modular construction, coordination and delivery of modules to the site is critical—especially when large 3D units must be moved. The total cost of a project can increase by up to 10 percent in locations with restrictive transport regulations. When considering the use of 3D modules, builders have to ensure that the productivity gains outweigh this cost,

⁴⁶¹ WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 12.

⁴⁶² Die Quelle bezieht sich auf Daten des Bundeskartellamts (2017): Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton.

ebd.

⁴⁶³ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 261.

⁴⁶⁴ Ebd., S. 262.

carefully weighing wage differentials between the manufacturing facility and the product's end destination, as well as the distance involved in delivery.”⁴⁶⁵

Besonders relevant ist der Parameter Transport beim Rückbau. Es sollten keine weiteren Emissionen für die Zerkleinerung und den Transport von Bauschutt in Kauf genommen werden. Vielmehr sollten Bauteile in Gänze Wiederverwendung finden. Beim Transport dieser Elemente werden zwar auch Emissionen verursacht, jedoch entfallen die kompletten negativen Einträge bei der Herstellung. An dieser Stelle ist der Transport demnach anders zu rechtfertigen.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Es kann geschlussfolgert werden, dass durch die geforderte Kreislauffähigkeit der Faktor Transport an unterschiedlichen Stellen im Stoffkreislauf von Betonkonstruktionen eine entscheidende Rolle spielt, den es mit abzuwägen gilt. Die Emissionen durch Transport sind demnach an mehreren Schnittstellen innerhalb der Pyramidalen Zirkularität verortet und zu beeinflussen.

⁴⁶⁵ Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 15.

4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität

Die geforderte Produktivitätssteigerung im Bauwesen kann gemäß Bertram et al. durch eine Vorfertigung und Automatisierung erreicht werden: “Automation is lined up as a next step, and will aim to offer an exponential boost to productivity—moving manufacturing on from being twice as productive compared to traditional construction methods today, towards what they see as a future ten-fold advantage.”⁴⁶⁶ Biermann et al. fassen die Vorteile der Vorfertigung wie folgt zusammen: „Bei der Bemessung und Herstellung von Betonfertigteilen können eine Reihe von Vorteilen genutzt werden, weil die Fertigung unter werksmäßigen Bedingungen mit hoher Qualität und ohne direkte Witterungseinflüsse stattfinden kann. Vor der Auslieferung der Fertigteile erfolgt die Qualitätskontrolle der Bauteile. Bei entsprechender werkseitiger Qualitätskontrolle können beispielsweise die Betondeckung und bei Fertigteilstützen der notwendige Querschnitt reduziert werden. In vielen Fällen werden für Betonfertigteile Betone einer höheren Festigkeitsklasse verwendet. Auch wenn Betone höherer Festigkeitsklassen mehr CO₂ pro m³ Beton bedeuten, kann durch die Reduzierung des Bauteilquerschnitts sowie bessere Ausnutzung der Druckfestigkeit der absolute CO₂-Fußabdruck des Bauteils häufig gesenkt werden.“⁴⁶⁷ Um diese individuellen Anpassungen der Druckfestigkeiten zu ermöglichen, müssen Materialmatrix und Anlagen kontrolliert flexibilisiert werden können. Mit Blick auf die Herstellung von Betonfertigteilen bietet die Vorfertigung eine effiziente und vereinfachte Möglichkeit zur Herstellung funktionsoptimierter Bauteile und damit auch zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen.

Zusammenhang zu Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Fertigung im Werk begünstigt erstens eine komplementäre, automatisierte Fertigung. Eine solche kontrollierte Fertigung erlaubt präzise Konstruktionen mit geringer Fehlerquote (→3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil). Zweitens ermöglicht die Vorfertigung darüber hinaus eine flexible und effiziente Anpassung der Anlagentechnik zur Realisierung adaptiver Bauteile. Drittens können durch die digitale Ansteuerung der Werkzeuge kontinuierliche Prozesse im kompletten Kreislauf geschaffen (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug) werden. Es ergeben sich hierdurch an vielen der dargelegten Schnittstellen Vorteile.

⁴⁶⁶ Ebd., S. 13.

⁴⁶⁷ Biermann u. a. (wie Anm. 427), S. 18.

4.1.2.12 Zeit und Prozess

Die vielfältigen Anforderungen an eine nachhaltige Bauweise müssen schon in einer frühen Planungsphase abgewogen werden und verlangen eine detaillierte und zeitaufwändige Bewertung. Die Umsetzung einer kreislaufgerechten Betonwirtschaft erfordert daher (aktuell noch) einen erhöhten Aufwand. Rosen beschreibt die Phasenverschiebung in dem Maße, dass die Ausführungsplanung vor der Ausschreibung gelöst werden muss: „Die Planung für zirkuläres Bauens benötigt mehr Zeit. Insbesondere in der Ausführungsplanung müssen die Details sorgfältig geplant werden, bevor die Ausschreibung beginnt. Aufgrund von Zeit- und Kostendruck ist es heute üblich, diese beiden Leistungsphasen zu überlagern. Dies führt dazu, dass mit dem Rohbau Fakten geschaffen werden, die beispielsweise eine Anpassung von Bodenaufbauhöhen an zirkuläre Konstruktionen erschweren.“⁴⁶⁸ Der erhöhte Zeitaufwand in der Planung kann durch die erläuterten Vorteile der digitalen Unterstützung beim Einsatz digitaler Werkzeuge, der Umsetzung eines Systems sowie der Einbindung automatisierter Fertigungstechnologien minimiert werden. Allgemein betrachtet werden laut einer Studie von McKinsey aus dem Jahr 2019 „Modular construction: From projects to products“ die Kosten für den erhöhten Aufwand in Phase Null durch Einsparungen durch die Wiederverwendung kompensiert: „While prefabrication increases the onus on getting the design right first time, it offers an opportunity for cost savings; the vast majority of rework costs can typically be avoided, and they are easier to roll out in standardized units.“⁴⁶⁹ Ferner prognostiziert die Studie eine Zeitersparnis in der Herstellung durch die Anwendung modularer Bauweisen im Werk von bis zu 50 % und eine Kostenersparnis von bis zu 20 %.⁴⁷⁰

Mit Blick auf den Werkstoff Beton ist seine Herstellung eng an die Produktionszyklen gekoppelt. Eine wirtschaftliche Fertigung nutzt die Maschinenauslastung optimal aus. Hierbei gibt die notwendige Abbundzeit den Fertigungsrythmus vor. Nach Rückkopplung mit Protagonisten der Betonfertigteilindustrie könnte die Produktionszeit von Betonbauteilen signifikant erhöht werden. Beispielsweise könne mit der Umstellung der Vorspanntechnik auf eine Fertigung mittels einer Umlaufanlage in Abgrenzung zu heutigen Fertigungszyklen im Mehrschichtbetrieb produziert werden. Vor diesem Hintergrund könne die aktuell aufwendige Vorspanntechnologie durch eine neuentwickelte serielle Fertigung verschiedene automatisierte Schritte kombinieren.⁴⁷¹

⁴⁶⁸ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 91.

⁴⁶⁹ Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 15.

⁴⁷⁰ Vgl. ebd., S. 1.

⁴⁷¹ Interview bei der Fa. Bremer AG mit Herr Dr. Molter im Mai 2022 in Paderborn.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Wie innerhalb des Résumés der Pyramidalen Zirkularität kann eine Kreislauffähigkeit von Betonbauteilen maßgeblich durch die Umsetzung eines Systemansatzes sowie die Einbindung digitaler und automatisierter Werkzeuge gelingen (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse). Vor diesem Hintergrund spielen die Faktoren Zeit, Produktivität und Materialeinsatz zusammen.

4.2 Betontechnologie: Infraleichtbeton

Die Infraleichtbeton-Technologie, im Folgenden als ILC (Infra Lightweight Concrete) abgekürzt, wird bereits seit über 15 Jahren durch Forschungsaktivitäten an der TU Berlin im Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau unter Prof. Dr. Mike Schlaich, Prof. Regine Leibinger sowie von der Ingenieurgesellschaft Schlaich Bergermann Partner vorangebracht. Bisher wurden mehrere Gebäude mit Infraleichtbeton als Ortbetonkonstruktionen realisiert, wobei jedoch immer eine Zulassung im Einzelfall erforderlich war. Im Jahr 2023 hat die Ausarbeitung einer DAfStb Richtlinie für Ortbeton sowie Fertigteile aus Infraleichtbeton begonnen. Auf spezifische Anforderungen hin kann bereits eine Infraleichtbetonmischung bei Industriepartnern bezogen werden.⁴⁷² Die ILC-Technologie versucht wie die beiden Vergleichstechnologien, einen monolithischen Materialquerschnitt zu erzielen, der unter Verwendung von Leichtzuschlägen einen leichten, porösen Baustoff mit wärmedämmenden Eigenschaften und gleichzeitig einer ausreichenden Druckfestigkeit von bis zu 20 MPa bietet. Der Infraleichtbeton ordnet sich mit einer Trockenrohdichte zwischen 550-800 kg/m³ ein. Durch die integrierte Wärmedämmung bietet dieser monolithische Werkstoff ein großes Gestaltungspotenzial. Mit dem ausführlichen Beitrag im „Betonkalender 2022“⁴⁷³ sowie der Publikation „Infraleichtbeton – Entwurf | Konstruktion | Bau“⁴⁷⁴ liegen für ILC umfassende Veröffentlichungen. Im Fokus des folgenden Vergleichs steht die Anwendung des ILC in der Vorfertigung. Innerhalb der von der DBU geförderten Forschung „Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau (ILVO)“⁴⁷⁵ wurden hierzu detaillierte Ergebnisse erzielt, die als Grundlage für die durchgeführte Synopse herangezogen wurden.⁴⁷⁶ Ebenso bilden die Studie „Bauen mit großformatigen Elementen aus Infraleichtbeton (ILC) – Drei konstruktive Entwurfsvarianten für den Geschosswohnungsbau“⁴⁷⁷ sowie der Schlussbericht „Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften“⁴⁷⁸ eine Datengrundlage.

⁴⁷² Heidelberg Materials AG, »Heidelberger Infraleichtbeton: Der Beton für monolithische Bauweise«, 9. April 2024, <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/spezialbetone/infraleichtbeton>.

⁴⁷³ Bergmeister/Fingerloos/Wörner 2022 (wie Anm. 121).

⁴⁷⁴ Claudia Lösch und Philip Rieseberg, »Infraleichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau«, hg. von Mike Schlaich und Regine Leibinger, Stuttgart 2018.

⁴⁷⁵ Deutsche Bundesstiftung Umwelt, »Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau«, 3. April 2024, https://www.dbu.de/projekt_32997/01_db_2848.html.

⁴⁷⁶ Aktenzeichen 32997/01; Laufzeit 01.10.2018 - 30.09.2025.

⁴⁷⁷ Anna Mendgen, »Bauen mit großformatigen Elementen aus Infraleichtbeton (ILC) – Drei konstruktive Entwurfsvarianten für den Geschosswohnungsbau«, in: *Bautechnik*, 99 (2022), Nr. 6, S. 441–451, hier S. 442.

⁴⁷⁸ Technische Universität Berlin u. a., *MultiLC - Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften; Mechanische, Bauchemische und Bauphysikalische Untersuchungen. Ausführlicher Sachbericht*, Berlin 2019.

4.2.1 Materialtechnologie

In den aufgeführten Forschungsleistungen werden ein homogener Wandquerschnitt (Abb. 52) und zudem ein inhomogener Wandquerschnitt (Abb. 53) mit zwei tragenden Schalen von 10 cm und einem Kern von 25 cm entwickelt.

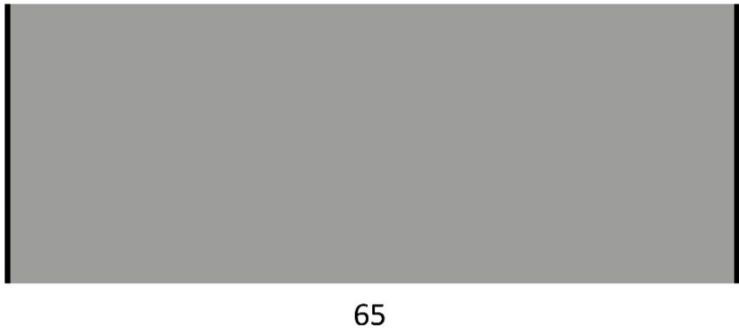


Abb. 52: Schematische Darstellung eines homogenen Bauteilquerschnitts von 65 cm.
Eigene Darstellung

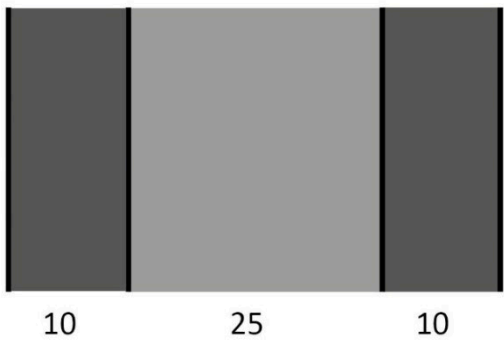


Abb. 53: Schematische Darstellung eines inhomogenen Bauteilquerschnitts 45 cm.
Eigene Darstellung

	Homogen ILC11	Inhomogen ILC12 _{shell}	Inhomogen ILC2 _{core}
Zusammensetzung	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser, Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub
Zement	CEM III/A N – 32,5 LH/NA	CEM III A 42,5 N	CEM III A 42,5 N
Leichtzuschlag	Blähton	Blähton (Liapor) + Blähglas (Liaver)	Blähton (Liapor) + Blähglas (Liaver)
Rohdichte (ofentrocken)	800 kg/m ³	810 kg/m ³	500 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,18 W/mK	0,163 W/mK	0,085 W/mK
Druckfestigkeit	> 13 MPa	> 15 MPa	> 6 MPa

Rahmenbedingungen:
Entwicklung von 2 Referenzmischungen, den homogenen und inhomogenen ILC
Homogene Wand 65 cm, maximaler U-Wert von 0,28 W/m²K Inhomogene MultiLC-Wand 45 cm (10 cm+25 cm+10 cm), maximaler U-Wert von 0,23 W/m²K.
Erreichte Rohdichte:
Im Betonkalender 2022 werden im untenstehenden Schaubild Druckfestigkeit und Trockenrohddichte bisher mit ILC realisierter Objekte ins Verhältnis gesetzt und damit die Leistungsfähigkeit abgebildet. Die Rohddichte wird maßgeblich durch den verwendeten Leichtzuschlag gesteuert. Es wird konstatiert, dass industriell hergestelltes Blähglas eine höhere Kornfestigkeit aufweist im Vergleich zu der natürlichen Ressource Blähton oder dem Recyclingmaterial Schaumglasschotter. ⁴⁷⁹ Der ILC ordnet sich mit einer Trockenrohddichte zwischen 550 und 800 kg/m³ zu den Vergleichstechnologien Gradientenbeton und Aeroleichtbeton im Mittelfeld ein. Ebenso verhält es sich bei der Druckfestigkeit kleiner 13 MPa. Hier erzielt der Gradientenbeton mit 19,5 MPa eine höhere Druckfestigkeit und der Aeroleichtbeton eine geringere Druckfestigkeit von 2,43 MPa. ⁴⁸⁰
Wärmeleitfähigkeit
Mit einer Wärmeleitfähigkeit des Materials von λ 0,18 [W/(m·K)] kann bei einer Schichtdicke von 65 cm ein U-Wert von 0,28 W/(m²·K) erreicht werden. Der nach GEG geforderte Richtwert für Außenwände von 0,24 W/(m²·K) wird dabei überschritten und kann nach dem Ausgleichsprinzip durch die Anlagentechnik oder eine verbesserte Dämmwirkung anderer Bauteile kompensiert werden um die geltenden Anforderungen an den Primärenergieverbrauch und die Transmissionswärmeverluste einzuhalten. ⁴⁸¹ In der Anschlussforschung wurde mit dem MultiLC ein inhomogener Wandaufbau entwickelt um den Anforderungen nach GEG für Außenwände zu genügen. Mit diesem wurde bei einer Wandstärke von 45 cm der U-Wert kleiner 0,24 W/(m²·K) eingehalten.
Zementanteil:
ILC verwendet im Vergleich der drei Betontechnologien als einziger einen klinkerarmen Zement (CEM III B), im Gegensatz zum Gradientenbeton (CEM II) und Aeroleichtbeton (CEM I). Der gefügedichte Beton hat einen geringen Zementanteil von ca. 250 kg/m³. > Es besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Ökobilanzierung. Um eine Vergleichbarkeit der Technologien zu erreichen, wäre eine Bilanzierung mit gleichen Zementen zielführend, um die direkten Auswirkungen der unterschiedlichen Zemente auf die jeweiligen Ökobilanzen der Betontechnologien aufzuzeigen.

⁴⁷⁹ Mike Schlaich, Alex Hückler und Claudia Lösch, »Infraleichtbeton«, in: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann Dietrich Wörner (Hg.), *Beton-Kalender 2021. Schwerpunkte: Fertigteile, Integrale Bauwerke (2 Teile)*, Berlin 2021 (*Beton-Kalender 2021*), S. 908–952, hier S. 914–916.

⁴⁸⁰ Abb. aus ebd., S. 916

⁴⁸¹ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 917.

Leichtzuschlag:
Anstelle von Schotter oder Kies werden bei der Produktion dieses Betons Blähton oder der Recyclingstoff Blähglas eingesetzt, so dass ein geringes Gewicht und eine hohe Porosität mit einem hohen Luftanteil erreicht werden. Eine Einbindung von Aerogel wurde nur in den ersten Anfängen im Jahr 2010 erprobt, jedoch nicht weiterverfolgt.
Wasser:
Die Wahl des Zements hat Auswirkungen auf den Hydrationsprozess und die dabei freiwerdende Reaktionsenergie (in [J/g]). Für Leichtbetone gilt, dass durch die geringe Wärmeleitfähigkeit die Hydrationswärme schlechter abgeleitet werden kann, was insbesondere bei einer hohen Abbindegeschwindigkeit eine Rissbildung begünstigt. Um die Anforderungen an das GEG einzuhalten, hat Infraleichtbeton einen relativ großen Wandquerschnitt und somit ein großes Volumen, das abbinden muss. Daher ist die Wahl eines Zements mit geringer Wärmeentwicklung relevant. „Ein Portlandzement (CEM I) entwickelt eine Hydrationswärme von bis zu 525 J/g, wohingegen ein Hochofenzement mit besonders geringer Wärmeentwicklung (CEM III/ A – LH/ NA) nur 235 J/ g erreicht.“ ⁴⁸²

4.2.2 Fertigungstechnologie

Die ILC-Technologie basiert bisher auf einem klassischen Betoniervorgang, bei dem ein Zwangsmischer mit Schaufel zum Einsatz kommt. Bei der Verarbeitung sind aufgrund der spezifischen Materialmatrix gesonderte Parameter zu beachten. Der Beton wird in Kübeln eingebracht, wobei zu beachten ist, dass der Abstand zur Einbaustelle nicht größer als 1,5 Meter sein darf, um Rückstände an der Oberfläche zu vermeiden. Der Beton wird nicht gepumpt, da dies den Effekt begünstigt, dass Wasser von den Leichtzuschlägen (Blähglas) aufgenommen wird, was negative Auswirkungen auf die Konsistenz und Festigkeit hat.⁴⁸³ „Weder bei Blähton- noch bei Blähglasmischungen empfiehlt es sich nach heutigem Kenntnisstand ILC zu pumpen [...]. Zudem sollten unter Verwendung eines Zwangsmischers die Schaufeln mit einer Kunststoffauskleidung versehen werden, um eine Zerkleinerung der LWA zu vermeiden. Andernfalls erhöht sich mit zunehmender Mischdauer der Feinkornanteil, was die Betoneigenschaften negativ beeinflusst.“⁴⁸⁴ Da die Verwendung von Innenrüttlern das Entmischen bewirkt, wird das Verdichten mit Außenrüttlern oder Stochern empfohlen. Die Verarbeitungszeit bei Vor-Ort Betonagen wird mit 90 Minuten und die Ausschalzeit nach 2-3/1-2 Tagen angegeben.

Die ILC-Technologie ermöglicht durch das klassische Verfahren, auch komplexere Schalungsgeometrien zu nutzen, die zum Beispiel beim Co-Extrusionsprozess der Aeroleichtbeton-Technologie nicht möglich sind. Die Technologie ist bisher nur auf

⁴⁸² Ebd., S. 913.

⁴⁸³ Vgl. ebd., S. 916.

⁴⁸⁴ Ebd., S. 914.

eine Vorfertigung abgestimmt, jedoch noch nicht optimal auf eine Automatisierung der Fertigung ausgerichtet.

4.2.3 Konstruktion

Der Infraleichtbeton verfolgt neben der Entwicklung eines homogenes Wandquerschnitts das Prinzip der Schichtung innerhalb des Wandquerschnitts durch zwei verschiedene Mischungen, auch als inhomogener Wandquerschnitt bezeichnet.⁴⁸⁵ Neben der Dämmfunktion werden dabei zudem eine aktive Dämmung und Kühlung (durch integrierte Kapillarrohrmatten) sowie photokatalytische Deckschichten zum Abbau von Luftschadstoffen angedacht. Diese aktiven Bestandteile sind nicht weiter Gegenstand der Betrachtung. Primär wird der in **Abbildung 53** dargestellte geschichtete Wandaufbau als MultiLC Wand bezeichnet, von 10 cm äußerer Schale, 25 cm innerer Kern und nochmals einer 10 cm äußeren Schale, innerhalb des Vergleichs der drei Betontechnologien herangezogen. „Die speziell entwickelten Rezepturen für Schalen- und Kernbeton ILC12 – D0,80_{shell} und ILC2 – D0,45_{core} weisen Wärmeleitfähigkeiten von 0,163 W/(m·K) und 0,085 W/(m·K) (Messwerte λ_{20°,tr}) bzw. 0,175 W/(m·K) und 0,098 W/(m·K) (Messwerte, λ_{23°,80} %) auf. Hieraus ergibt sich für eine insgesamt 45 cm dicke MultiLC-Wand ein U-Wert von 0,23 W/(m²·K) bzw. 0,26 W/(m²·K).“⁴⁸⁶ Der Lastabtrag erfolgt vorrangig über die Außenschalen, die kraftübertragend ausgebildet sind und die Wärmedämmung über den leichten Kern.

Bewehrung
Als Bewehrung kommt eine konventionelle Stahl-Bewehrung mit einer Überdeckung von 3,5 cm zum Einsatz. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bewehrung negative Auswirkungen auf das Recycling und auf den Grad der Automation beziehungsweise die Produktionsgeschwindigkeit hat. Alternative Bewehrungstechnologien wie GFK-Bewehrungen und Carbon- oder Basaltbewehrungen wurden erprobt, da diese korrosionsbeständig sind. ⁴⁸⁷ Vollständig unbewehrte Bauteile waren bisher nicht Gegenstand der Forschungen. ⁴⁸⁸
Schalungstechnologie
In Relation zur gewünschten Oberflächenqualität wurde detailliert das geeignete Schalmaterial untersucht. Dabei kamen unterschiedliche Materialien beispielsweise eine Birkensperrholzplatte mit einer Spezialbeschichtung zum Einsatz. Somit kann die Oberfläche von lunkerfrei und porenarm, aber auch leicht rau bis glatt mit gleichmäßigem Porenbild eingestellt werden. ⁴⁸⁹

⁴⁸⁵ Technische Universität Berlin u. a. 2019 (wie Anm. 478).
⁴⁸⁶ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 918.
⁴⁸⁷ Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 121.
⁴⁸⁸ Alexander Hückler, *Forschungsaustausch Infraleichtbeton*, unter Mitw. von Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter 2024, 8. April 2024.
⁴⁸⁹ Vgl. Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 146.

Wie auch bei den anderen beiden untersuchten Betontechnologien, wird durch den dämmenden, einschichtigen Materialquerschnitt die konstruktive Ausbildung vereinfacht und eine Fehleranfälligkeit verringert. Zusätzlich ist es bei der Realisierung großformatiger Bauteile forschungsleitend, den Fugenteil und damit auch die Wärmebrücken zu reduzieren und zudem Aufwand, Kosten und Wartung zu minimieren (Abb. 54-56).⁴⁹⁰ Dabei wurden klassische konstruktive Verbindungen mit Mörtelfuge sowie Schraubverbindungen mit BT-Spannschloss erprobt. Mendgen sieht darüber hinaus die Vorteile der geometrischen Verzahnung und stellt die Applikation von Verbindungstechniken aus dem Ingenieurbau in Aussicht. Sie führt beispielsweise das Nut-Feder-Prinzip mit Neoprendichtungsband in Anlehnung an den Tunnelbau an.⁴⁹¹ Im Rahmen der Forschung konnte geschlussfolgert werden, dass im Bereich der Fügung eine Bauteilstärke von 10 cm nicht unterschritten werden sollte, um ein Brechen der Kanten zu vermeiden.⁴⁹² Mendgen schlussfolgert: „Es macht Sinn, Fertigteile aus ILC möglichst ohne Verbindungsmittel zu planen, da ILC nicht ausreichend Zugkraft aufnehmen kann. Standardverbindungselemente für Fertigteile aus Normalbeton lassen sich nicht auf den Werkstoff ILC übertragen.“⁴⁹³ Im Folgenden wird ein Auszug der baukonstruktiven Leitdetails abgebildet, die sich primär auf Ortbetonkonstruktionen beziehen, jedoch auch in Teilen auf vorgefertigte Systeme übertragbar sind:

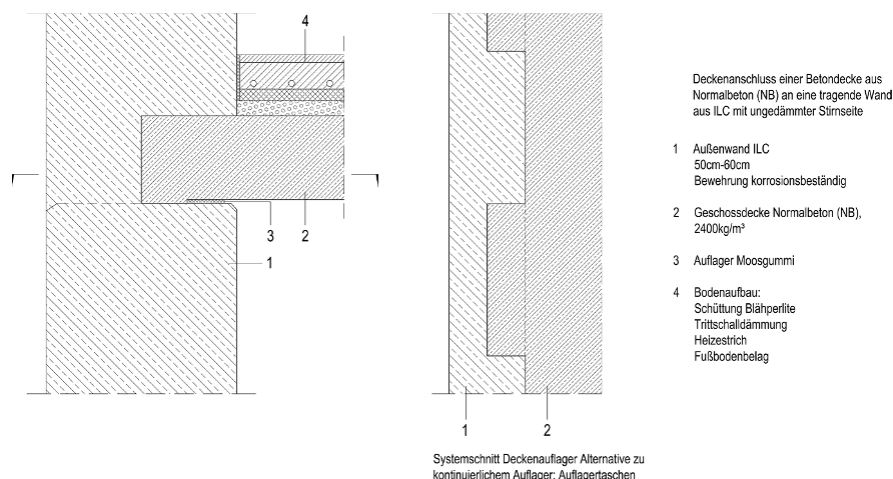


Abb. 54: Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit ungedämmter Stirnseite © ILC⁴⁹⁴

⁴⁹⁰ Vgl. Anna Mendgen, »Entwicklung von Prototypen für Balkone und Loggien aus Infraleichtbeton (ILC) unter Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte und der Anforderungen aus der Fertigung«, in: *Bautechnik*, 100 (2023), Nr. 5, S. 239–249, hier S. 241.

⁴⁹¹ Vgl. ebd., S. 245.

⁴⁹² Vgl. Hückler 2024 (wie Anm. 488).

⁴⁹³ Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 244.

⁴⁹⁴ Die baukonstruktiven Leitdetails der Abbildungen 54-56 sind in der Monografie *Infraleichtbeton* veröffentlicht (Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 55–88.

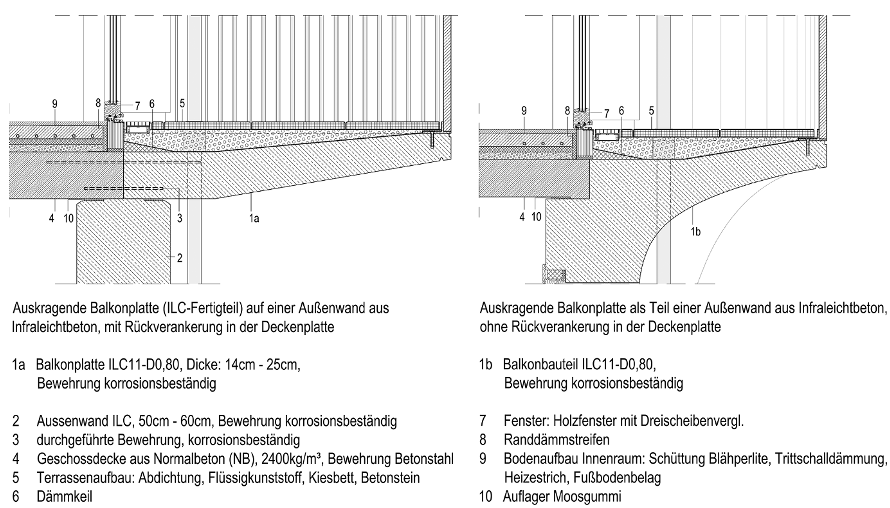


Abb. 55: ILC-Balkonplatte mit Rückverankerung in der Deckenplatte links und ohne Rückverankerung rechts © ILC

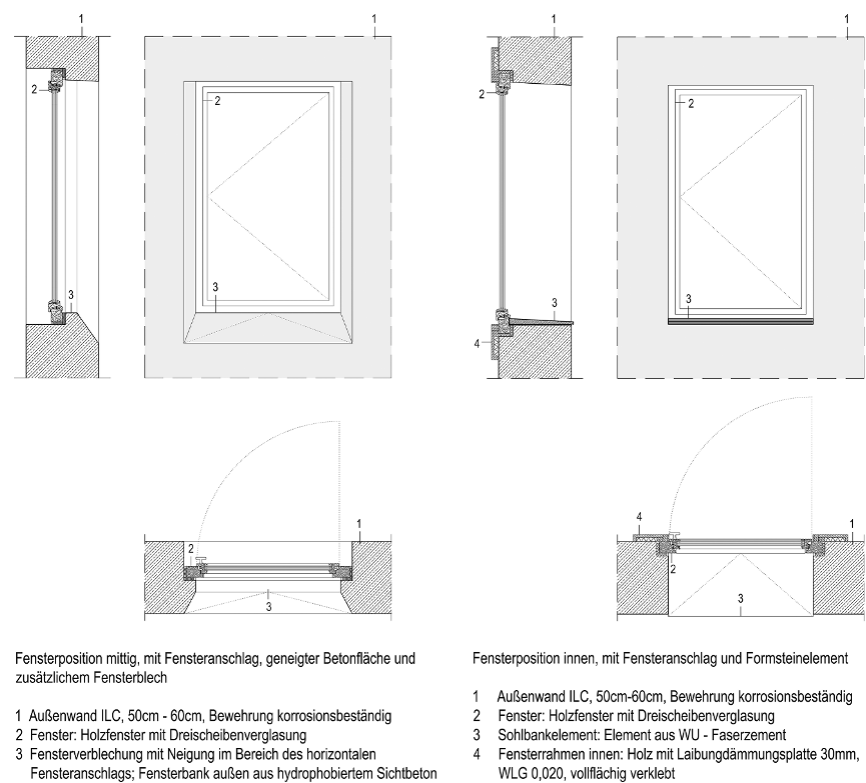


Abb. 56: ILC-Fensterdetails mit Fensterposition mittig und Fensterposition innen © ILC

4.2.4 Digitales Gestalten

Der Forschungsansatz fußt darauf, die Varianz durch die neuen konstruktiven Möglichkeiten zu verbessern. Dies geschieht nicht nur mit Blick auf die Gestaltung der Bauteile, sondern darüber hinaus in der Gestaltung der Räume und deren Funktionen, die daran angrenzen. Hierbei wird eine neue Art des Entwerfens, nämlich das „bottom-up“ Prinzip verfolgt. „Bei dem hier vorgestellten Forschungsprojekt wurde der Entwurfsprozess umgekehrt. Basierend auf der Idee, dass ein Produkt benötigt wird, bei dem nicht Einschränkung die Gestaltung bestimmt, sondern durch Flexibilität und Modularität individuelle Gestaltung erst ermöglicht wird, wurden verschiedene Elemente entwickelt [...]“⁴⁹⁵ Infralichtbeton vereint dämmende sowie tragende Funktionen innerhalb einer Bauteilschicht. Dies Prinzip wurde genutzt, indem die Geometrie der Fassadenelemente an den Lastenverlauf angepasst wurde (Abb. 57). Das digitale Gestalten wird etabliert, indem das Material, aber auch die Geometrien (der Öffnungen und der Stege) entsprechend der tragkonstruktiven Anforderungen angepasst werden.⁴⁹⁶ Über die verschiedenen Geschosse kam ILC mit unterschiedlichen ILC-Rohdichten von unten nach oben zum Einsatz (ILC 800, 700, 600). Dadurch wurde die Konstruktion in den oberen Geschossen leichter, was reduzierte Lasten sowie einen reduzierten Materialeinsatz bedingt. Dies spiegelt eine Umsetzung des Prinzips der Individualisierten Standardisierung wieder, indem nicht nur ein Bauteil projektspezifisch auf die Anforderungen abgestimmt wird und zum Einsatz kommt, sondern unterschiedliche vorgefertigte Komponenten angepasst an die spezifischen Lasten pro Geschoss kombiniert werden.

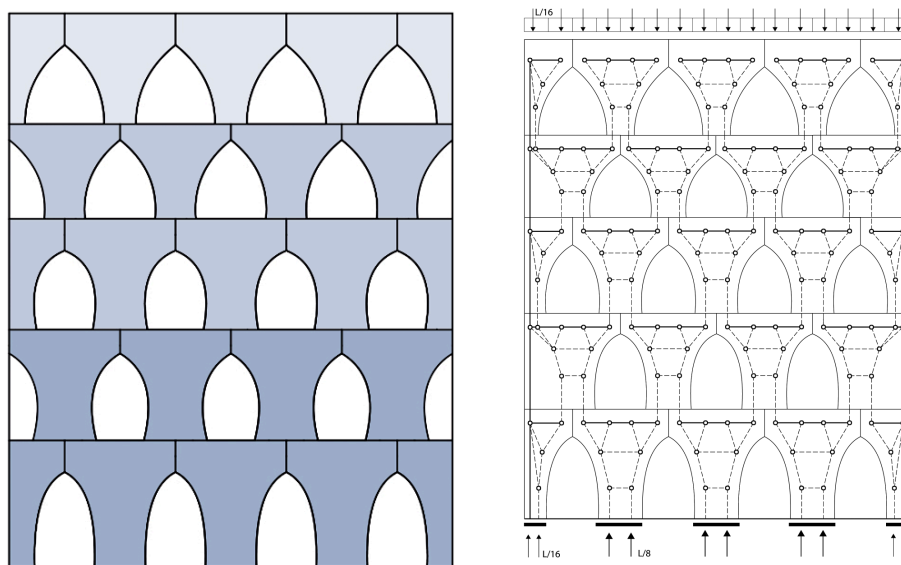


Abb. 57: Stafflung der ILC-Rohdichten nach Geschossigkeit, Stabwerksmodell zur Verdeutlichung des Lastabtrags © ILC⁴⁹⁷

⁴⁹⁵ Mendgen 2022 (wie Anm. 477), S. 442.

⁴⁹⁶ Vgl. ebd., S. 444.

⁴⁹⁷ Die Prinzip Zeichnungen der Abbildungen 56-58 sind in der Monografie *Bauen mit großformatigen Elementen* veröffentlicht.

Als weitere konstruktive Lösung wurden U-Bauteile untersucht (Abb.58). Hierbei wurden die Vorteile des dämmenden Materials genutzt um Vor- und Rücksprünge zu ermöglichen. So können Balkone und Überstände entstehen, ohne Wärmebrücken zu erzeugen. Der Entwurf lässt eine Staffelung und eine Addition zu und generiert damit ein hohes Maß an gestalterischer Varianz. Der Entwurf geht so weit, dass mit einem U-Element ein Entwurf für ein Punkthaus konzipiert wurde. Die Gestaltung greift dabei auf konventionelle Deckenbauteile sowie Glasfassaden zurück.

Kritisch ist anzumerken, dass die homogenen Bauteile so ausgelegt sind, dass sie durchgängig mit einer Wandstärke und aus einem Material konzipiert sind. Dies impliziert eine gewisse Überdimensionierung und damit einen erhöhten Materialeinsatz, da das Bauteil auf den ungünstigsten Lastfall ebenso wie den schlechtesten U-Wert ausgelegt ist. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf in Richtung einer differenzierteren Auslegung der Bauteile.

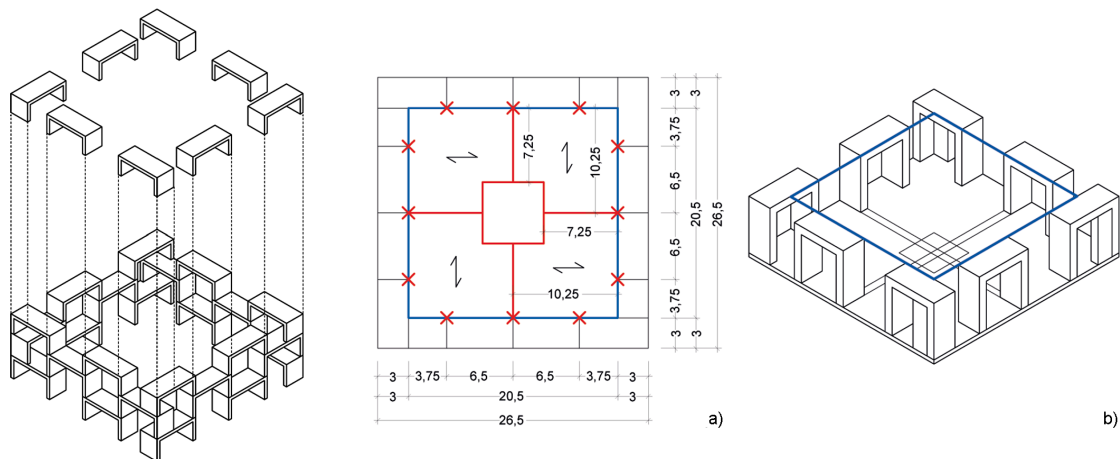


Abb. 58: Punkthaus mit tragender Fassade aus U-Elementen aus ILC © ILC

Ein dritter Ansatz bietet eine komplette Raumzelle aus ILC an, die in Anlehnung an das Prinzip „Habitat 67“ von Architekt Safdie entwickelt wurde. Die Module werden zueinander gedreht und gestapelt und dann ineinander verzahnt. Die Dimensionen und das Gewicht von ungefähr 80 Tonnen entsprechen massiven Raummodulen aus Beton von 10 Zentimetern Stärke. Eine Zerlegung der Raumzellen in einzelne Bauteile wurde angedacht, jedoch wegen der Auswirkungen auf das Ausbaumaß beziehungsweise das Maß der Vorfertigung der Raumzellen nicht weiterverfolgt.

Zwar entfallen aufwendige Konstruktionsdetails und es kann wärmebrückenfrei konstruiert werden. Es zeigt sich jedoch ein äußerst hohes Gewicht und ein erheblicher Materialeinsatz. Es ist anwendungsspezifisch zu prüfen, ob der Ressourceneinsatz optimal zu seiner Leistungsfähigkeit ausgelegt ist. Bei einer Anwendung für reine Außenbauteile ist das Material optimal auf die Anforderungen abgestimmt. Dies zeigt sich im Bereich der Außenwände, Dachkonstruktionen, aber auch bei Auskragungen. Bei einer Addition der Module jedoch bilden die Außenwandkonstruktionen häufig Innenbauteile ab. Dies entspricht nicht den innerhalb der Dissertation vorgestellten Aspekten funktionsoptimierter Bauteile. Die entsprechend den Bauteilanforderungen vorgeschlagene Anpassung der Rohdichte

oder der Materialstärke, die bei den T-Bauteilen vorgenommen wird, könnte auch bei den Raumzellen zielführend sein. Diese Differenzierung würde dann nicht in Abhängigkeit der Geschosse erfolgen, sondern zwischen Innen- und Außenbauteilen unterscheiden. Alternativ könnte eine Kombination aus ILC für fassadenberührende Bauteile und konventionellen Bauteilen im Innern eine ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Lösung abbilden. Der Vergleich von drei Fassadentypen „französischer Balkon/T-Element“, „Balkon/T-Element mit Auskragung“ und „Loggia/U-Element“ (Abb. 59) liefert erste Aussagen zum Verhältnis von Konstruktion, Wirtschaftlichkeit und Funktionalität bei gleichzeitiger Umsetzung eines Gestaltungsanspruchs.⁴⁹⁸

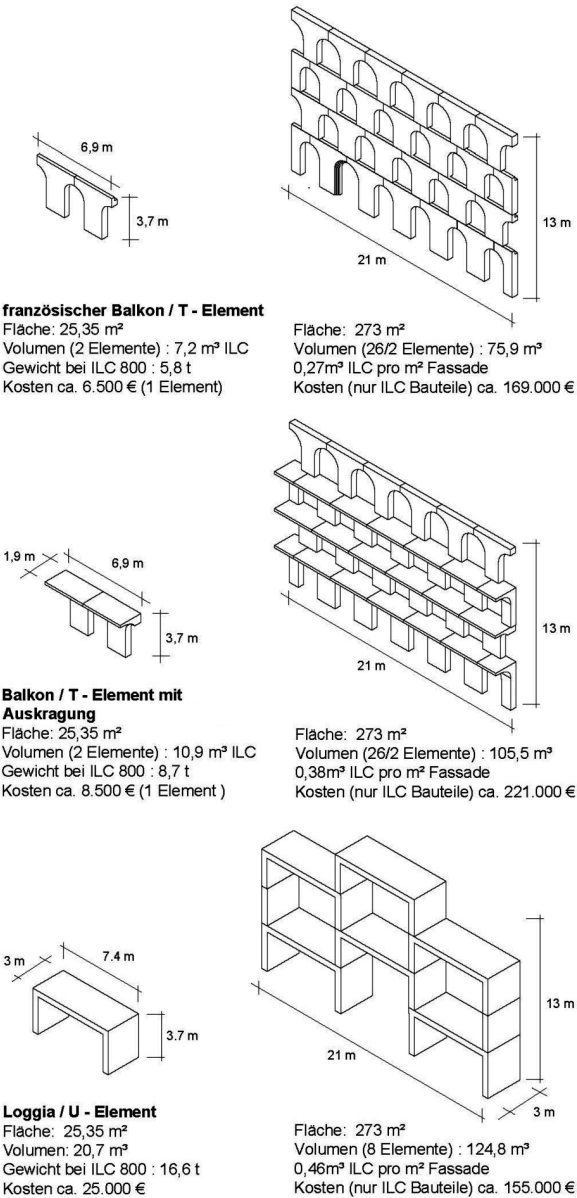


Abb. 59: Vergleich dreier ILC Bauteile (Volumen und Kosten)

© GBJ Geithner Betonmanufaktur Joachimsthal GmbH, ILC⁴⁹⁹

⁴⁹⁸ Vgl. Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 246.

⁴⁹⁹ Abbildung 14 aus ebd., Originalquelle in: Lösch, C. u a. (2023) Abschlussbericht DBU Forschungsprojekt – ILVO – Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton (in Vorb.).

4.2.5 Abgleich der Infraleichtbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese allesamt adressiert werden können. Zwei Kriterien davon erfordern weiteren Forschungsbedarf und zwei Kriterien davon werden nur angedacht.

Auf der Grundlage der eigenen wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen der Dissertation und der Veröffentlichungen Dritter wie beispielsweise zur Ökobilanzierungen kann festgestellt werden, dass Infraleichtbeton wettbewerbsfähig zu konventionellen Wandkonstruktionen ist.⁵⁰⁰ Ein wichtiger Faktor ist dabei die Lebensdauer (→4.1.2.1 *Nutzungsdauer*). Im Betonkalender 2021 wird referenziert, dass sich Infraleichtbeton über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren vergleichbar mit konventionellen Bauweisen wie Porenbeton oder Kalksandstein mit Dämmschicht darstellt. Bei einer Verlängerung des Betrachtungszeitraums auf 100 Jahre werden darüber hinaus deutliche Vorteile erkennbar.⁵⁰¹

„Eine exemplarische Bilanzierung des GWPs⁵⁰² von verschiedenen Außenwandkonstruktionen eines achtgeschossigen Referenzgebäudes zeigte, dass eine inhomogene Infraleichtbetonwand [...] bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren in vergleichbaren Größenordnungen liegt wie konventionelle Bauweisen. Bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren liegt sie günstiger [...], insbesondere aufgrund des nicht notwendigen Austauschs von Dämmsystemen.“⁵⁰³

Der massive Bauteilquerschnitt und damit die Menge an benötigten Ressourcen sticht trotz des leichten Materialgewichts hervor (→4.1.2.2 *Reduktion von Masse*) und könnte teils optimiert werden beziehungsweise gezielter zum Einsatz kommen. Da sowohl bei der Rohdichte (→4.1.2.3 *Reduktion Zementanteil*) als auch bei der Druckfestigkeit (→4.1.2.5 *Einfluss der Druckfestigkeit*) die Technologie vergleichsweise im Mittelfeld liegt, könnten hier weitere Ansätze gefunden werden, um zusätzlich Ressourcen zu schonen. Diese Forderung adressieren die Forschenden durch eine Weiterentwicklung des ILC in Form eines inhomogenen Bauteilquerschnitts (MultiLC), um gezielt höhere Spannungen aufnehmen zu können.⁵⁰⁴ Positiv hervorzuheben ist, dass bereits der klimaeffiziente CEM III zum Einsatz kommt (→4.1.2.4 *Substitution Zement*).

Ein weiteres Potenzial wird im Upcycling von Abfallstoffen gesehen, indem RC-Anteile wieder als Ressourcen in die Erstellung neuer Betonbauteile einfließen.⁵⁰⁵ Darüber hinaus kann der Infraleichtbeton selbst aufgrund seiner Monomaterialität in einer zweiten Lebensphase als „leicht recycelte Gesteinskörnung in hochwertigen Stoffen“ eingesetzt werden (→4.1.2.6 *Recyclinganteil*).⁵⁰⁶ Zudem reduziert die

⁵⁰⁰ Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 337–339.

⁵⁰¹ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 923.

⁵⁰² Die Abkürzung GWP, Global Warming Potential entspricht der deutschen Übersetzung Treibhauspotenzial.

⁵⁰³ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 923.

⁵⁰⁴ Vgl. Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 244.

⁵⁰⁵ Vgl. Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 340.

⁵⁰⁶ Ebd., S. 336.

Wiederverwendung ganzer ILC-Komponenten die Abfallmenge zu nahezu 100 Prozent. (→4.1.2.9 Abfallreduktion). Der Faktor Emissionen durch Transport wird in dem Sinne begünstigt, dass die Technologie bereits von Betonherstellern angeboten wird und sich mit der Zulassung der DAfStb-Richtlinie die lokale Verfügbarkeit erhöhen wird (→4.1.2.10 Transport und Regionalität).

Die Wiederverwendung ganzer modular erstellter Bauteile wird von Mengden in Aussicht gestellt,⁵⁰⁷ allerdings besteht hier weiterer Forschungsbedarf (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten). Die Forschung zum ILC legt konstruktiv drei Ansätze zur Vorfertigung vor, die den Ausblick geben, dass diese Materialtechnologie einen Beitrag zum vorgefertigten, seriellen Bauen mit großformatigen Elementen für den Gebäudesektor geben kann (→4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität).⁵⁰⁸ Dabei ergeben sich unterschiedliche Potenziale bei den verschiedenen Bauteilgrößen und Funktionen. Die Abstimmung des T-Elementes an den Lastenverlauf und damit die Anpassung der Geometrie sowie der Materialzusammensetzung zeigt in besonderem Maße eine Anwendung des Prinzips der Individualisierten Standardisierung (→4.1.2.2 Reduktion von Masse). Auch die Kombination der U-Elemente mit spezifischen, auf dem Markt bereits verfügbaren, vorgefertigten Bauteilen zeigt einen gewinnbringenden Ansatz. Die U-Elemente werden auseinandergezogen und beispielsweise durch Glasbauteile ergänzt. Dadurch kommt jedes Bauteil entsprechend seiner Leistungsfähigkeit zum Einsatz. Dieses Prinzip verliert bei der dritten Lösung seine Stärke. Bei dem Versuch ein komplettes Raummodul mit ILC zu realisieren, wird zwar eine konstruktiv funktionierende Lösung vorgelegt. Ein Gleichgewicht aus Leistungsfähigkeit und Materialeinsatz wird jedoch noch nicht ausreichend erreicht. Die Forschung könnte durch eine angepasste und überdies differenzierte Vorfertigung optimiert werden. Die ILC-Technologie bietet dafür bereits verschiedene Materialtypen mit unterschiedlichen Festigkeiten und U-Werten an. Im Anwendungsfall Raummodul wäre eine bereits im Forschungsbericht angedachte Zerlegung in verschiedene, vorgefertigte Bauteile mit angepassten Qualitäten zielführend. So könnte zum einen das Gewicht reduziert und zum anderen die Nachhaltigkeit verbessert werden. Die aktuell durch die DBU geförderte Forschung mit dem Titel „Prototyp einer neuartigen, modularen und nachhaltigen Schnellbauschule“⁵⁰⁹ vertieft die Leistung der Kombination verschiedener Fertigteile aus ILC.⁵¹⁰

Die modulare Entwicklung ist abgebildet, es werden reversible Füge-Techniken im Sinne einer Kreislaufwirtschaft in den Anfängen erforscht (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Füge-Technik) und Anstrengungen zur Wiederverwendung von Komponenten getätigt (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten). Die Vorfertigungstechnologie und mit ihr die Produktivität sind entsprechend weiterzuentwickeln (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). Es ist zu erwarten, dass in Abhängigkeit vom Verfahren die Betonmatrix angepasst

⁵⁰⁷ Vgl. Mengden 2023 (wie Anm. 490), S. 246.

⁵⁰⁸ Vgl. ebd., S. 247.

⁵⁰⁹ Projektnummer Projekt 37068/01; Förderzeitraum 27.09.2022 - 27.09.2027.

⁵¹⁰ Vgl. Hückler 2024 (wie Anm. 488).

werden muss und sich darüber hinaus Herausforderungen auf Materialebene ergeben werden, die infolgedessen eine Anpassung der Anlagentechnik erfordern.

4.2.6 Résumé: Infraleichtbeton

Für die Betontechnologie Infraleichtbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund einer Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden:

Die Forschung zum Infraleichtbeton wurde aus dem Leitfaktor **Konstruktion** heraus entwickelt. So waren die konstruktiven Details zum wärmebrückenminimierten Anschluss forschungsleitend. Die Materialentwicklung ist durch die Bereitstellung verschiedener Betonrezepturen mit unterschiedlicher Rohdichte weit entwickelt und erlaubt einen projektspezifischen Materialeinsatz. Eine Individualisierte Standardisierung beim Infraleichtbeton kann demnach durch Kombination verschiedener Komponenten mit unterschiedlichen ILC-Rohdichten erreicht werden.

Darüber hinaus zeigt sich der Leitfaktor **Gestaltung** in der Geometrie der ILC-Bauteile, die eine Standardisierung und zugleich Individualisierung erlauben. Durch die Studien zur Modularisierung wird ein hoher/anspruchsvoller Gestaltungsansatz in Abhängigkeit der konstruktiven Anforderungen konzipiert. In diesem Zusammenhang wurde das „bottom-up“ Entwurfsprinzip erläutert. Dabei wird mithilfe digitaler Planungswerkzeuge der Lastenverlauf, die Materialeigenschaften sowie die Gestaltung in Einklang gebracht.

Der Leitfaktor **Technik** mit Umsetzung einer automatisierten Fertigung ist am wenigsten präsent. Die Vorfertigung von Komponenten in Form von Prototypen befindet sich in der Erprobung und könnte in einem nächsten Schritt in Richtung einer automatisierten Fertigung weiterverfolgt werden.

4.3 Betontechnologie: Gradientenbeton

Die Forschung zum Gradientenbeton⁵¹¹ wird bereits seit dem Jahr 2006 am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren an der Universität Stuttgart erforscht, initiiert unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek und weitergeführt unter Prof. Dr.-Ing. M. Arch. Lucio Blandini. Das Forschungsfeld variiert in der Technologie der Gradierung und unterscheidet in Mikrogradierung (1 – 10 mm) (Abb. 60) und Mesogradierung (10 – 250 mm). Diese Bezeichnung definiert den Maßstab eingebrachter Hohlkörper. Des Weiteren wird die Technologie auf funktioneller Ebene für Schalen- und Raumtragwerke entwickelt, aber auch für Bauteile wie Träger, Decken und Wände erforscht. Unter der Gradierung von Betonbauteilen wird eine „kontinuierliche Änderung der Porosität der Betonmatrix innerhalb des Bauteils“ verstanden (Abb. 61).⁵¹² Dadurch werden die Materialeigenschaften an die spezifische Beanspruchung, den Lastenverlauf im Bauteil und eine definierte Dämmwirkung angepasst. Damit beschreibt es „eine Werkstofftechnologie, bei der gezielt Kavitäten im Inneren der Betonbauteile platziert werden“, was in einer optimierten Materialeffizienz und damit verbesserten Nachhaltigkeit resultiert.⁵¹³ Durch das Prinzip der Gradierung erfolgt eine Individualisierung der Materialität über den Bauteilquerschnitt, in der Forschungsleistung als „multifunktional gradierte Bauteile“ bezeichnet. „Die Gradientenbetontechnologie verspricht, rein mineralische Außenwandbauteile zu realisieren, die alle Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Wärmeschutz erfüllen und dies mit geringeren Wandstärken als bei vergleichbaren leistungsfähigen wärmedämmenden Wandsystemen aus Beton. Die Vorteile liegen in der guten Rezyklierbarkeit, der Massen- und CO₂-Reduktion, dem Gewinn an Nutzfläche und in der Energieeinsparung in allen Phasen des Produktlebenszyklus.“⁵¹⁴

Die Inhalte zum Forschungsprojekt „Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton“ bilden bei der Synopse die Betrachtungsgrundlage.⁵¹⁵

⁵¹¹ Der Begriff Gradientenbeton[®] ist markenrechtlich geschützt. In der weiteren Textausführung wird auf das Lizenzsymbol verzichtet.

⁵¹² Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 10.

⁵¹³ Vgl. ebd., S. 13.

⁵¹⁴ Ebd., S. 12.

⁵¹⁵ Vgl. ebd.



Abb. 60: Geschichteter Porositätsgradient⁵¹⁶ © Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

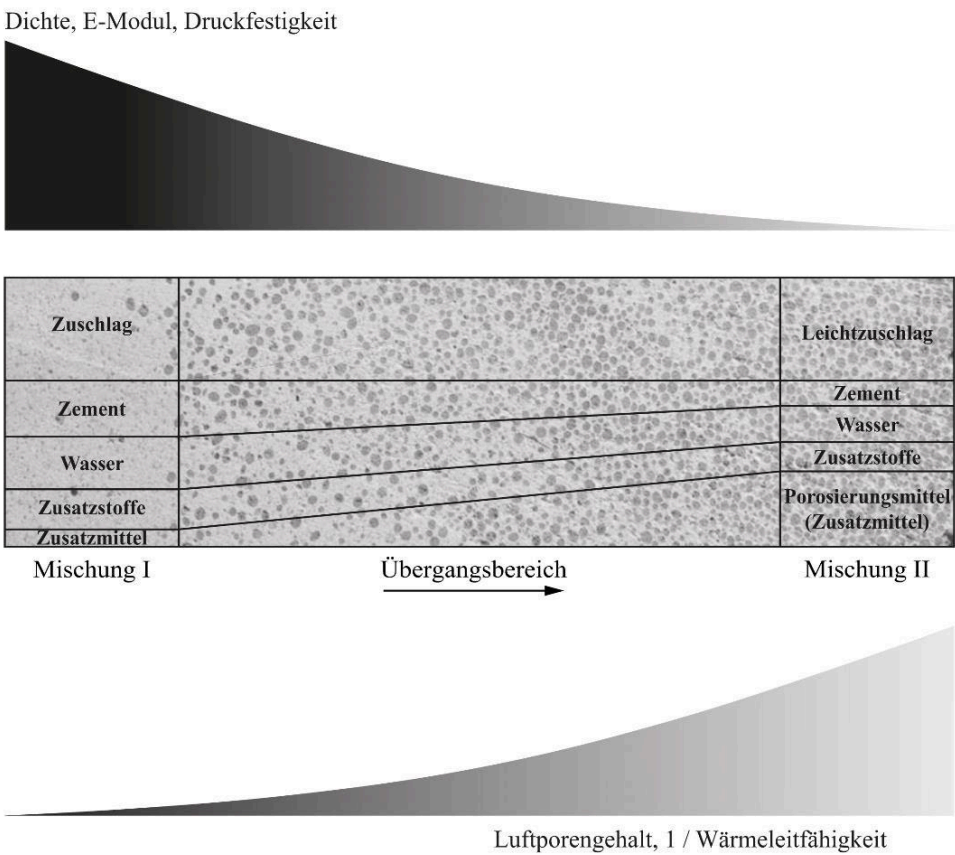


Abb. 61: Eigenschaftsänderungen der Betongemische durch Dichteanpassung⁵¹⁷ © ILEK

⁵¹⁶ Originalquelle in:
Pascal Heinz, Michael Herrmann und Werner Sobek, *Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen*, Stuttgart 2012 (Forschungsinitiative ZukunftBau F 2811), S. 81.

⁵¹⁷ Originalquelle in:
Mark Wörner u. a., »Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 111 (2016), Nr. 12, S. 794–805.

4.3.1 Materialtechnologie

Die Gradierung wurde vor dem Prinzip der Grenzbetrachtung durchgeführt, indem Basismischungen mit unterschiedlichen Eigenschaften für drei Verfahren, das schichtweise Gießen, das Trocken- sowie Nassspritzverfahren entwickelt wurden. Hierbei wurde in zwei Mischungen differenziert, die jeweils verschiedene Anforderungen erfüllen. Während die Betonmatrix MI hochfest ist, ist die andere MII dämmend. Die Zielvorstellung war es, in einem Wandbauteil von 3 Meter Höhe auf 1 Meter Breite einen Wandquerschnitt von kleiner 36,5 Zentimeter mit einem gemittelten Lambda-Wert kleiner 0,07 W/mK zu realisieren, um die Anforderungen an die damals geltende Energieeinsparverordnung EnEV einzuhalten. Schlussendlich wurde das Wandbauteil durch den geschichteten Aufbau mit einer Wandstärke von 26 cm konzipiert werden (Abb. 62).

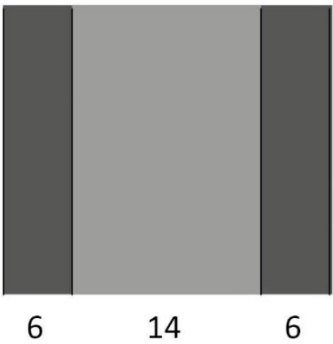


Abb. 62: Schematische Darstellung des geschichteten Bauteilquerschnitts 26 cm. Eigene Darstellung

Verfahren	Nassspritzverfahren		Schichtenweise Gießen	
	Laborproben		Demonstrator	
	MI _{NS} (IWB)-3.1	MI _{NS} (IWB)-4.2	MI _{SG}	MI _{SG} (AM)
Zusammensetzung	Wasser, Fließmittel, 56,0V-% Sand, 44,0V-% Bindemittel	Wasser, Fließmittel, 62,0V-% Sand, 38,0V-% Bindemittel, Porosierungsmittel (Mikrohohlkugeln, Sika-Aer Solid)		
Zement	CEM II	CEM II		
Leichtzuschlag	Blähglas	Blähglas		Aerogel
Rohdichte (ofentrocken)	2.133 kg/m³ (v. Pumpen) 2.205kg/m³ (n. Pumpen)	784 kg/m³ (v. Pumpen) 953kg/m³ (n. Pumpen)	2080 kg/m³	210 kg/m³
Wärmeleitfähigkeit	1,6 W/mK	0,330 W/mK	1,6 W/mK	0,03 W/mK
Druckfestigkeit	69,0 MPa (7d) 90,0 MPa (28d)	19,5 MPa (7d) 26,2 MPa (28d)	57,46 MPa	0,26 MPa

Rahmenbedingungen
Entwicklung von 2 Referenzmischungen MI (tragend) und MII (dämmend) nach dem Prinzip der Grenzbetrachtung. Zielvorgabe: max. Wandquerschnitt 36,5 bei max. U-Wert von 0,21 W/m²K
Tatsächlich ermittelter Wandquerschnitt 26 cm (6 cm + 14 cm + 6 cm), Abmessungen 3 m hoch, 1 m breit. U-Wert von 1,17 W/m²K
Erreichte Rohdichte
Im Nassspritzverfahren konnte eine minimale Rohdichte von 900kg/m³ im ofentrockenen festen Zustand und 1200Kg/m³ im frischen Zustand erreicht werden, daher wurden weiteren Mischungen für das schichtenweise Gießen entwickelt. Die Mischung MII _{SG} (AM) konnte die Anforderungen mit einer Rohdichte von 210 kg/m³ erfüllen unter der Verwendung von Aerogel.
Wärmeleitfähigkeit
Für die Probekörper, die für das Nassspritzverfahren entwickelt wurden, wurde für das Wandbauteil ein Wärmeleitkoeffizient von Lambda 0,351 W/mK ermittelt und damit die Vorgabe des maximal zulässigen U-Werts < 0,21 W/m²K von Wandbauteilen nicht eingehalten. Wie beim Infralichtbeton wären Kompensationsmaßnahmen erforderlich. „Im Bereich der Wärmedämmung konnte durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Betone leider kein zufriedenstellender U-Wert für das Nassspritzverfahren erreicht werden. Ein gradiertes Bauteil mit einem nass gespritzten Leichtbetonkern würde somit nicht den gültigen energetischen Anforderungen entsprechen. Auch bei anderen untersuchten leichten Betonen [...], die durch das Gießen einbaubar sind, wäre eine Ausführung mit den Abmessungen 6 cm – 14 cm – 6 cm kritisch zu hinterfragen. Die Mischung MIII, IWB(AP) hat zwar eine Wärmeleitfähigkeit von 0,090 W/mK [...], in Kombination mit dem entwickelten Normalbeton MI wäre bei gleichbleibender Stärke der MI-Schichten von 6 cm eine Kernschicht von 40 cm notwendig. Dies würde in einem Wandaufbau von 52 cm resultieren (6+40+6=52).“ ⁵¹⁸ Aus diesem Grund wurde die Materialentwicklung MII _{SG} (AM) nach dem Verfahren des schichtenweisen Gießens weiterentwickelt.
Zementanteil
Durch die Porosierung des Betons, zum einen durch die Verwendung von Leichtzuschlägen und zum anderen durch das Einbringen von Luftporen in die Betonmatrix, kann der Zementanteil CEM II merklich reduziert werden. „Zudem wurde aus ökologischen Gründen der Zementgehalt in den Gemischen reduziert. Um eine gute Förderbarkeit sicherzustellen, wurden alle zementreduzierten Leichtbetonmischungen mit einem hohen Anteil an Flugasche hergestellt. Flugasche hat eine nahezu perfekte runde Kornform und ermöglicht dem erhärtenden Beton infolge der sich einstellenden puzzolanischen Reaktion eine stete zeitliche Zunahme der Festigkeit. Die kugelförmige Form und die hohe Feinheit

⁵¹⁸ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 95.

der Flugasche sind zudem vorteilhaft für die Pumpförderung im Hinblick auf das Nassspritzverfahren.“ ⁵¹⁹
Leichtzuschlag
Während der Forschungstätigkeit wurde die Einbindung verschiedener natürlicher und industriell hergestellter Leichtzuschläge in die Betonrezepturen getestet. Natürliche Leichtzuschläge haben höhere Dichten, bedürfen jedoch keiner weiteren Energiezufuhr. „Erfolgversprechender ist die Verwendung von Blähglas. Bei einem Wasserzementwert von 0,63 und einem volumenspezifischen Einsatz von 85 V-% Blähglas werden Rohdichten zwischen 550 kg/m³ und 750 kg/m³ erreicht [...]. Der Wert der Dichte ist abhängig vom Einsatz und der Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Der große Vorteil von Blähglas ist die Oberfläche der einzelnen Partikel. Diese ist durch den Herstellungsprozess geschlossen, wodurch die Wasseraufnahme praktisch ausgeschlossen werden kann. Zudem weist Blähglas die größte Festigkeit im Vergleich zu den anderen vorgestellten Materialien auf. Hierdurch lassen sich Festigkeitswerte von mehr als 8 N/mm² bei einer Dichte von 750 kg/m³ erreichen.“⁵²⁰
Aerogel
Auch die Forschung zum Gradientenbeton erprobte die Einbindung von Aerogel. Aufgrund unterschiedlicher Hemmnisse, wie einer großen Schwindverformung sowie des Effekts der Entmischung, wurde die Einbindung des Aerogels jedoch nicht weiterverfolgt. „Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Verarbeitung von Aerogelen. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung von Aerogel in Höhe von 21 M-% bezogen auf die Bindemittelmenge eine Trockenrohichte von ca. 250 kg/m³ erreicht werden kann (MIIL, IWB(A)). Jedoch weist der erhärtete Leichtbeton kaum messbare Festigkeiten auf. Zudem neigt der Leichtbeton zu starker Schwindverformung. Auch hier ist ein Wasserzementwert von mehr als 1 nötig, um eine streichfähige und gefügedichte Struktur zu erhalten. Zudem kommt es zur Entmischung des Aerogelbetons. Um den w/b-Wert zu reduzieren und eine bessere Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, müssen mehrere Maßnahmen ergriffen werden. Zum einen wird eine Beimischung eines formbeständigeren Leichtzuschlags wie Perlit oder Blähglas empfohlen. Zum anderen ist auch hier der Einsatz von Luftporenbildner von Vorteil. Zwar sind Luftporen wärmeleittechnisch ungünstiger als Aerogel, der Luftporenbildner erhöht aber die Verarbeitbarkeit des aerogelbasierten Betons. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz einer solchen Betonmischung beim Nassspritzen auszuschließen. Aerogel ist ein derart fragiles Leichtkornmaterial, das händisch dem Zementleim untergemischt werden muss. Die Förderung im Pumpschlauch führte aufgrund der hohen Partikelreibung und der daraus resultierenden Zerstörung des Aerogelgranulats am Versuchsstand zu keinem zielführenden Ergebnis für die geprüften Rezepturen.“⁵²¹ Es wurde das Aerogelpulver der Firma Cabot mit einem vergleichsweise groben Korn gewählt. Ein kleineres Korn könnte

⁵¹⁹ Ebd., S. 33.

⁵²⁰ Ebd., S. 34.

⁵²¹ Ebd.

der Zerstörung während des Mischens entgegenwirken. Die Ausführungen zeigen, dass Aerogel im Nassspritzverfahren nicht erfolgreich eingebracht werden konnte. Daher wurde für die Erstellung des Demonstrators im Verfahren des schichtenweisen Gießens mit der Mischung MII_{SG}(AM) weitergearbeitet.

Wasseranteil

Die wasserresistente Oberflächenstruktur des Blähglases hat direkte Auswirkungen auf den erforderlichen Wasseranteil, der während des Anmachprozesses erforderlich ist und damit auf die Druckfestigkeit des Materials. „Im Vergleich zur natürlich gewonnenen und gebrochenen Gesteinskörnung bietet das geblähte Granulat (Blähglas und Blähthon) den Vorteil, dass die Außenhaut prozessbedingt gesintert und somit wasserresistent ist. Dies hat den Vorteil, dass bei der Herstellung von Leichtbeton auf zusätzliches Anmachwasser verzichtet werden kann und nur der wirksame Teil zur Benetzung des Bindemittels und der Leichtkornoberfläche hinzugegeben werden muss. Dadurch muss nur eine geringe Wassermenge bei der Trocknung entweichen und es können höhere Druckfestigkeiten erzielt werden.“⁵²²

⁵²² Ebd., S. 32.

4.3.2 Fertigungstechnologie

Bei der Entwicklung der Fertigungstechnologie wurden zunächst zwei unterschiedliche Verfahren erprobt, zum einen das geschichtete Gießen und zum andern das Sprühverfahren (Abb. 63). Bei letzterem handelt es sich um ein robotisch gestütztes Mehrdüsen-Spritzverfahren, beim dem wiederum ein Trockenspritzverfahren sowie ein Nassspritzverfahren vergleichsweise betrachtet wurden.⁵²³

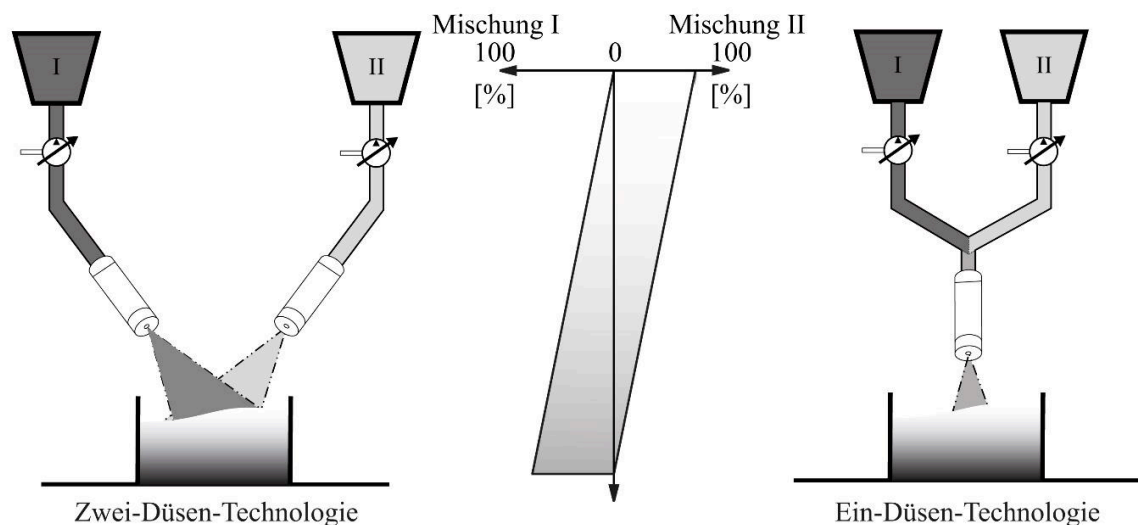


Abb. 63: Gradientes Sprühen mit der 1- und 2-Düsen-Technologie⁵²⁴ © ILEK

„Beim Trockenspritzverfahren werden zwei Basismischungen MI und MII in je einem Zwangsmischer trocken vorgemischt und den Rotortrockenspritzmaschinen über Fallrohre zugeführt. Der gewünschte Materialstrom wird durch eine Drehzahlregelung der Maschinen und einen definierten Luftvolumenstrom pneumatisch zum Düsensystem gefördert. Vor dem Austritt des Materials an der Düse wird die trockene Ausgangsmischung in Abhängigkeit vom Massestrom und vom w/z-Wert mittels einer Vor- und Hauptbenetzung unter Verwendung eines Flüssigdosiergeräts benetzt. Die Gradierung erfolgt hierbei auf Basis der ‚Zwei-Düsen-Technologie‘. Beim Nassspritzverfahren wird der Frischbeton direkt in den Herstellungsprozess zugeführt, die rheologischen Eigenschaften können in einem vorgelagerten Mischprozess mit hoher Güte eingestellt werden. Über die Regelung der Drehzahl der Schneckenradpumpen wird der Frischbeton im Dichtstrom zu der vorgelagerten Mischeinheit der „Ein-Düsen-Technologie“ gefördert. Zur Manipulation der Betoneigenschaften können den jeweiligen Materialströmen vor der Zusammenführung mittels Hydropumpen Additive zugeführt werden.“⁵²⁵

⁵²³ Die Verfahren wurden innerhalb des SPP 1542 – Leicht Bauen mit Beton „Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen“ und „Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierten Bauteile mit mineralisierten Hohlkörpern“ vorangetrieben.

⁵²⁴ Original Bildquelle in:

Wörner u. a. 2016 (wie Anm. 517), S. 17.

⁵²⁵ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 16.

Beide Techniken haben unterschiedlichen Einfluss auf die Betoneigenschaften, im Besonderen die Rohdichte. Während des Forschungsrahmens konnte geschlussfolgert werden, dass während des Trockenspritzverfahrens der hohe Luftdruck den Beton stark verdichtet und somit negativen Einfluss auf die Rohdichte hat und sich somit nicht für die wärmedämmende Mischung MII eignet. Bei der Nassspritztechnologie ergeben sich hier Vorteile. „Mit einer geeigneten Betonrezeptur können die hochfesten Deckschichten der Wandbauteile erstellt werden. In welcher Form eine zerstörungsfreie Applikation der oberen Deckschicht auf eine hochporöse Kernschicht erfolgen kann, bleibt in den Untersuchungen zu ermitteln. In der Verwendung einer Leichtbetonmischung ohne Aerogel oder Schaumstrukturen für die Herstellung der hochporösen Kernzone bzw. der gradierten Übergangszonen wird weiteres Potenzial gesehen.“⁵²⁶ Da der Beton bereits innerhalb 10-15 Minuten erhärtet, können die Schichten innerhalb kurzer Abfolgen appliziert werden. Durch den Einsatz der Maschinenteknologie kann ein sehr hohes Maß der Automation erreicht werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Maschinen sensibel reagieren und einen hohen Reinigungsaufwand mit sich bringen. Dieser muss beim Vergleich der Maschinenteknologien mitberücksichtigt werden.

Das Trockenspritzverfahren wurde aufgrund des hohen Energieaufwandes und der negativen Auswirkungen des erforderlichen Drucks auf die Dichte nicht weiterverfolgt. Auch Aerogel konnte bisher nicht zerstörungsfrei innerhalb beider Spritzverfahrens appliziert werden.

Neben der Materialmischung besteht die Herausforderung in der gezielten Aufbringung (dreidimensionale Orientierung) des Materials. Dazu wurde ein „Mehrachslensystem mit drei translatorischen Freiheitsgraden zur Ausführung der Düsenführungsbewegung und einer Parallelkinematik mit sechs Freiheitsgraden zur Umsetzung der Düseneigenbewegung“ entwickelt (Abb. 64).⁵²⁷

⁵²⁶ Ebd., S. 41.

⁵²⁷ Vgl. ebd., S. 17.



Abb. 64: Applikationssystem mit Stewart-Gough-Plattform © ILEK⁵²⁸

Die drei Verfahren werden hinsichtlich der erreichten Eigenschaften (Rohdichte) und des Automatisierungsgrades bewertet. Dabei wird geschlussfolgert, dass sich das Nassspritzverfahren sehr gut zur automatisierten Fertigung eignet. Mit diesem Verfahren können jedoch nur Rohdichten im Bereich von 1500-2200 kg/m³ erzielt werden. Das schichtenweise Gießen dagegen ermöglicht die gewünschten leichten Rohdichten im Bereich von 300-2300 kg/m³, stellt jedoch keinen automatisierten Prozess dar. Die Kernschicht des Demonstrators wurde daher nicht automatisiert nach dem Prinzip des schichtenweisen Gießens erstellt. Dies verdeutlicht, wie schwierig es ist, die Materialeigenschaften mit den Ansprüchen an eine automatisierte Fertigung in Einklang zu bringen.

⁵²⁸ Original Bildquelle in:
Wörner u. a. 2016 (wie Anm. 517).

4.3.3 Konstruktion

Der Gradientenbeton verfolgt das Prinzip eines geschichteten Querschnitts. Dabei ist der Wandaufbau wie folgt konzipiert: Auf eine 6 cm starke äußere Schale folgen ein 12 cm innerer Kern und nochmals eine 6 cm äußere Schale. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit wirken vorrangig die äußeren Schichten lastabtragend. Dazu wurden erste konstruktive Detailausbildungen während der Forschungsleistung erprobt. Um die Leistungsfähigkeit des Wandquerschnitts zu optimieren, wurde, wie in **Abbildung 65** dargestellt, das Prinzip der zwei Außenschalen zu einem T-Querschnitt modifiziert.

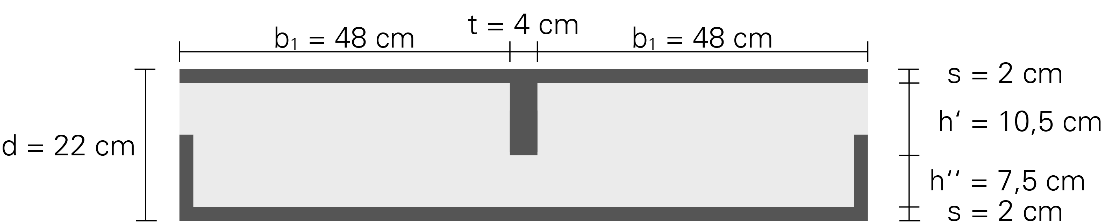


Abb. 65: optimierter Wandquerschnitt © ILEK⁵²⁹

Mit dieser Geometrie verbundene Nachteile bezüglich des Wärmedurchgangs könnten durch eine angepasste Materialmatrix im Stegbereich kompensiert werden. Dieser Forschungsansatz wurde jedoch innerhalb des Forschungsberichts nicht weiter spezifiziert. Grundsätzlich entspricht das Prinzip der funktionsoptimierten Anpassung des Querschnitts über eine unterschiedliche Materialansteuerung der Strategie der Individualisierten Standardisierung.

Bewehrung:
Um die bei Wandbauteilen verhältnismäßig geringen Zugkräfte aufzunehmen, wurde auf eine textile Bewehrung zurückgegriffen. Diese hat den Vorteil, dass sie nicht korrodiert und aufgrund der geringeren erforderlichen Überdeckung ein kleinerer Betonquerschnitt möglich ist. Zudem vermeiden Deckschichtbewehrungen und Schubbewehrungen eine Rissbildung des Materials und stellen einen Verbund der beiden Deckschichten sicher (Abb. 69). Als Alternative zur Faserbewehrung wurde eine metallische Mikrobewehrung aus Edelstahl erprobt, die bessere Eigenschaften beim Recycling aufweist. Es wurde angestrebt, die Deckschichtbewehrung und vorgeformte Schubbewehrung innerhalb eines automatisierten Verfahrens einzubringen.
Es ist zu beachten, dass die Bewehrung negative Auswirkungen auf das Recycling und auf den Grad der Automation beziehungsweise die Produktionsgeschwindigkeit hat. Zudem ist damit die Vergleichbarkeit der drei Betontechnologien reduziert, da die Thematik der Bewehrung unterschiedlich umgesetzt wird. Die beim Gradientenbeton verwendete Mattenbewehrung setzt funktionale Anforderungen an die Tragfunktion optimal um. Jedoch wird an dieser Stelle das Prinzip des Monomaterials aufgeweicht, was Einfluss auf das Ziel einer

⁵²⁹ Original Bildquelle in Ebd.

sortenreinen Trennung hat. Aus diesen Erkenntnissen heraus könnte die Entwicklung des Gradientenbetons ohne den Einsatz von Bewehrung erforscht werden.
Schalungstechnologie:
Aktuell wird eine konventionelle Betonschalung für die Probekörper verwendet. Eine Kombination mit dem Prinzip der adaptiven Schalung für Fließfertigung, die am ILEK erforscht wird, wäre mit Blick auf eine automatisierte Herstellung von Gradientenbeton zu prüfen. ⁵³⁰

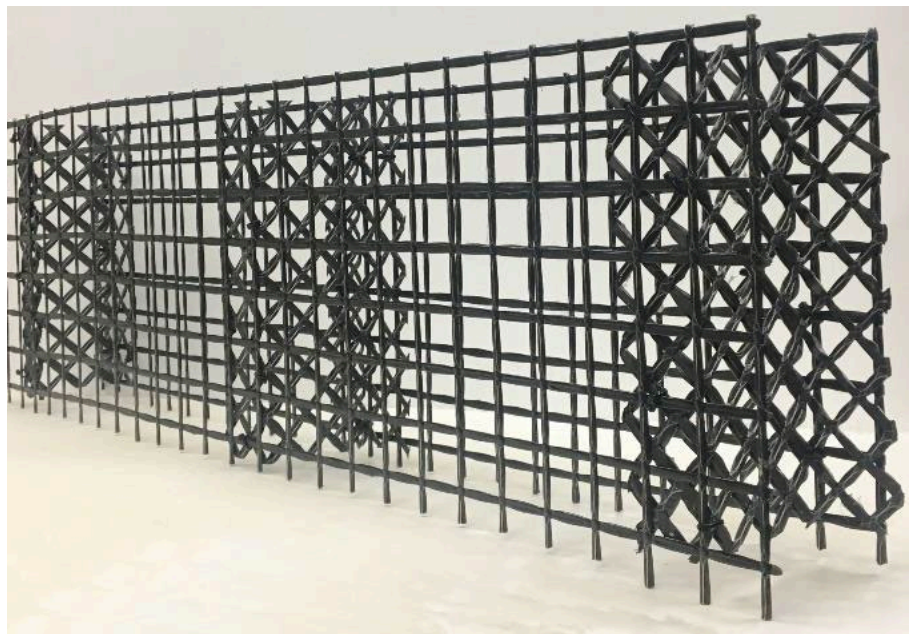


Abb. 66: Kombination von Schub- und Deckschichtbewehrung © ILEK

Über die bisher aufgeführten Aspekte hinaus, gibt die Forschungsleistung einen umfassenden Einblick in die Verbindungstechnik der Tafелеlemente. Teilweise werden in den Forschungsergebnissen bereits Lösungen für reversible Verbindungstechniken erprobt. Allgemein wird unterschieden in eine geometrische Ausbildung der Verbindung, wie punktuelle und linienförmige Verbindung, sowie in eine konstruktive Ausbildung wie die Nassfuge und die Trockenfuge (Abb. 67).

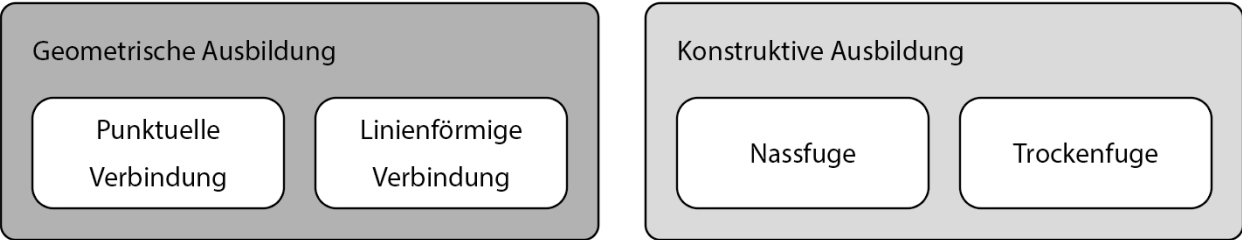


Abb. 67: Einordnung der Verbindungstechniken © ILEK

⁵³⁰ Vgl. Daria Kovaleva u. a., »Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 117 (2022), Nr. 5, S. 333–342.

„Die punktuelle Fügung führt aufgrund der konzentrierten Einleitung von Lasten meist zu Spannungskonzentration im Bauteil, ermöglicht jedoch den Einsatz einfach zu montierender, lösbarer Verbindungsmittel. Linienförmige Verbindungen übertragen Lasten, vornehmlich Normal- und Schubkräfte, kontinuierlich über die gesamte Fuge. Dies gewährleistet einen homogenen Spannungs-transfer, ergibt jedoch kleinere Toleranzen. In vertikalen Fugen treten vornehmlich Schubkräfte infolge horizontaler Wind- oder Aussteifungslasten auf. In horizontalen Fugen überwiegen Zug- und Druckkräfte aus den Aussteifungslasten oder vertikale Belastungen durch Decken oder Wände. Exzentrisch an eine Wand angeschlossene Bauteile induzieren zusätzlich Biegemomente in die Wand. Für resultierende Zugkräfte im Beton muss eine zusätzliche Bewehrung vorgesehen werden. Daher liegt das Ziel im Entwurf von Anschlüssen an Wände darin, Lasten möglichst gleichmäßig in Bauteile einzuleiten, so dass diese eine reine Druckbeanspruchungen erfahren. Eine werkstoffgerechte und ressourceneffiziente Ausnutzung des Betons wird so möglich.“⁵³¹

Decke-Wand Anschluss

Erprobt wird die Integration einer von Sobek et al. entwickelten Implantat-Technologie⁵³², die Kräfte punktuell ohne Spannungsspitzen in ein Verbindungselement einleitet (Abb. 68). Die Metallbauteile sitzen in der druckfesteren Außenschale. Die Verbindung kann geringe Zugkräfte aufnehmen. Erprobt wird die Kopplung der Implantate mit der Bauteilbewehrung um die Zugkräfte abzuleiten. Die neuartige Verbindungstechnik konzentriert die Lastübertragung innerhalb weniger Punkte, aber darüber hinaus werden auch die Stellen zum Toleranzausgleich reduziert. Dabei kann der Montageprozess maßgeblich vereinfacht werden.⁵³³

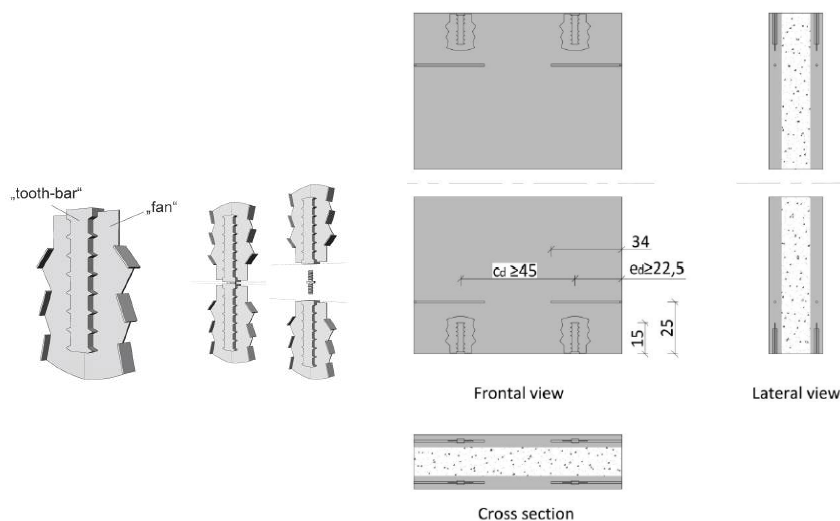


Abb. 68: Weiterentwickelte Implantat-Technologie für Gradientenbauteile © ILEK

⁵³¹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), 96–97.

⁵³² Vgl. Jan Mittelstädt, »Zur Einleitung lokaler Lasten in dünnwandige Bauteile aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton mittels Implantaten«.

⁵³³ Vgl. Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 99.

Horizontaler Wand-Wand- oder Wand-Fundament-Anschluss

Zudem wurde die Einbindung eines klassischen Wandschuh-Verbinders erprobt (Abb. 69). Dieser kann mit einer Ankerlänge von 30 cm, die entstehenden Zug-Kräfte auch in der Fuge aufnehmen. Die Bauteile werden bereits im Herstellungsprozess in die äußere Deckschicht eingelegt.

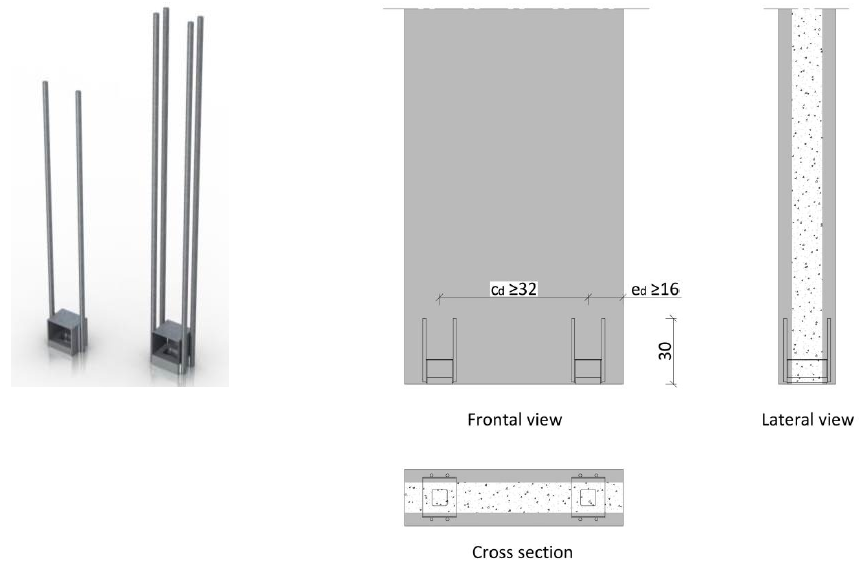


Abb. 69: weiterentwickelter Wandschuh für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH

Vertikaler Wand-Wand-Anschluss

Für die vertikale Verbindung der Wandtafeln wurde das Schwalbenschwanz-Prinzip erprobt (Abb. 70). Hier liefert die Firma H-BAU Technik unter dem Produktnamen POWERCON ein Produkt, das über eine Schraubverbindung mittig am Betonbauteil befestigt werden kann. Aufgrund der geringen Rohdichte des Materials ist diese Verbindung jedoch nicht ausreichend stabil. Daher wurde das Bauteil weiterentwickelt, indem eine direkte Verbindung des Metallbauteils mit der Bewehrung erfolgte.

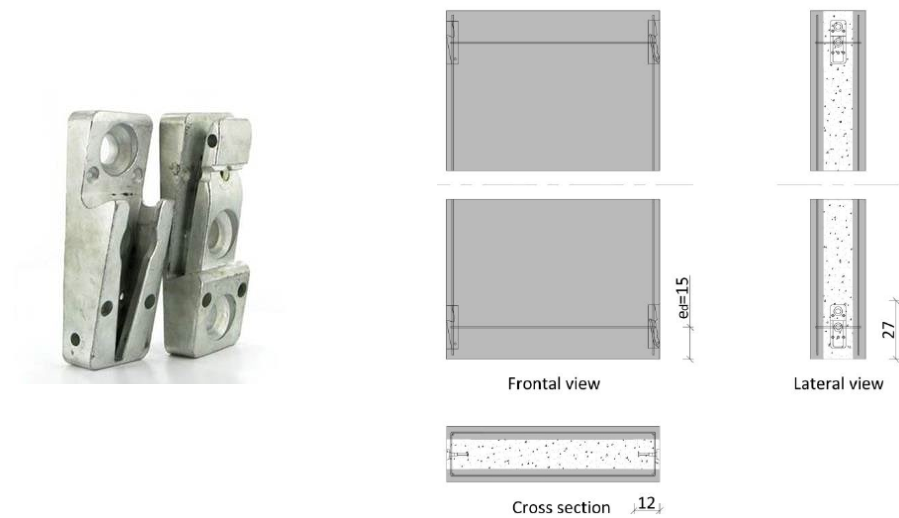


Abb. 70: weiterentwickelte Schwalbenschwanzverbindung POWERCON für Gradientenbauteile © ILEK, H-Bau Technik GmbH

Parallel wurde das für Betonfertigteile zertifizierte System TENLOC^{®534}, das mittels Schlüssel-Schloss Prinzip die Wandelemente aneinanderbindet, erprobt (Abb. 71). Beide Systeme bieten Vorteile für den Montageprozess und die Rezyklierbarkeit.

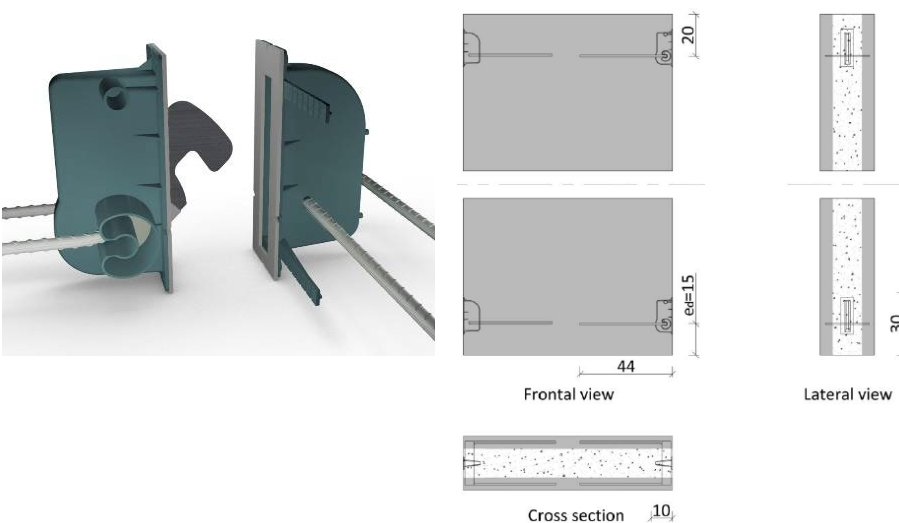


Abb. 71: weiterentwickeltes Schlüssel-Schloss Prinzip TENLOC für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH

⁵³⁴ Der Begriff Tenloc[®] ist markenrechtlich geschützt.

Demonstrator:

Auf Basis der konstruktiven Analyse hin wurde ein Demonstrator mit den Abmessungen von 3,00 m Höhe, 1,25 m Breite und 25 cm Dicke realisiert, der auf ein konventionelles Schalungssystem⁵³⁵ abgestimmt wurde (Abb. 72). Für die 5 cm dicken Außenschalen wurde die Mischung MINS(HC)⁵³⁶ verwendet, für den Betonkern von 14 cm Dicke kam die Mischung MIISG(AM) mit Aerogel Anteilen⁵³⁷ und Leichtzuschlägen⁵³⁸ zur Anwendung. „Zur Sicherstellung des Schichtverbundes wurden TZ-Schubgitter aus Glasfaser (Q121/121-AAE-38) der Firma Solidian eingesetzt, welche die schwind- und temperaturabhängigen Dehnungen aufnehmen. Über die Bauteilhöhe wurden vier dieser Gitter im Abstand von 75 cm angeordnet [...], sodass der entsprechende Nachweis [...] eingehalten ist. Die beiden Deckschichten wurden mit je einer Lage des textilen Glasfasergeleges bewehrt, um die Schubkräfte flächig in die Deckschichten einzuleiten.“⁵³⁹ Zur Erprobung der konstruktiven Fügung kamen eine Wandschuhe sowie das TENLOC®-Verriegelungssystem⁵⁴⁰ und Sandwichtransportanker zum Einsatz.



Abb. 72: Demonstrator der Gradientenbetonwand © ILEK

⁵³⁵ Schalungssystems StarTec der Firma Mev.

⁵³⁶ Hochfester Beton der HeidelbergCement AG.

⁵³⁷ Granulat P300 der Firma Cabot.

⁵³⁸ Mikrohohlkugeln der Firma Sika.

⁵³⁹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 118.

⁵⁴⁰ Produkte der Firma Peikko.

4.3.4 Digitales Gestalten

Der Begriff der Gestaltung kann in dem Sinne erweitert werden, als dass der Gradientenbeton stark auf eine Funktionsoptimierung entwickelt wurde und daher Material sowie Bauteil mit Hilfe digitaler Planungstools gestaltet werden. Unter dem Konzept der funktionalen Gradierung wird die Eigenschaft verstanden, mehrere Funktionen innerhalb eines rein mineralischen Bauteils zu vereinen, auch als Ein-Material-Technologie bezeichnet (Abb. 73). Beim Gradientenbeton fungieren die äußeren Deckschichten als tragende Schicht, sie bieten zudem den Witterungsschutz und dienen ebenso als Gestaltungsmittel. Der innere Kern übernimmt die Dämmfunktion. Eine Bewehrung zwischen beiden Schichten dient zur Herstellung des Verbundes untereinander.⁵⁴¹

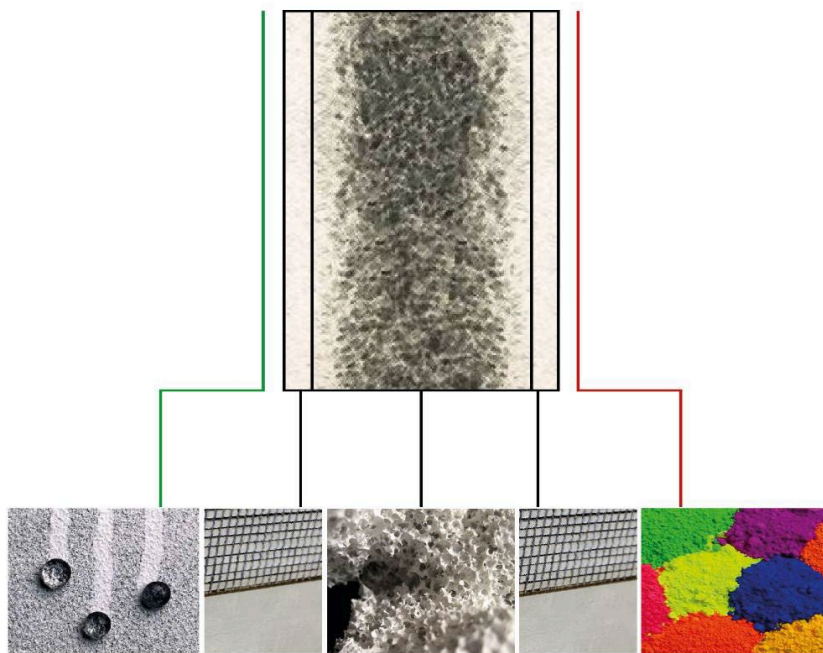


Abb. 73: Konzeptioneller Aufbau einer multifunktionalen Gradientenwand © ILEK

Die Auslegung der Bauteile erfolgt nach der „Pareto-Optimierung“⁵⁴². „Der Bauteilentwurf und damit verbunden die Materialverteilung kann als mathematisches Optimierungsproblem formuliert werden. Die Zielfunktion der Massenreduktion kann als die zu minimierende Wandstärke bzw. das zu minimierende Bauteilgewicht definiert werden. Dieses Optimierungsproblem ist unter Einhaltung der Nebenbedingungen in Form der Gewährleistung von Tragfähigkeit, Wärmeschutz sowie Feuchteschutz etc. zu lösen. Die Lösung dieses mehrkriteriellen Problems kann mit Hilfe der Pareto-Optimierung erfolgen. Hierzu sind allerdings den einzelnen Zielen bzw. Anforderungen Gewichtungsfaktoren zuzuordnen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen, das nicht zwingendermaßen dem Optimum für einzelne Aspekte entspricht. Zur Reduktion der Komplexität erfolgt

⁵⁴¹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 19.

⁵⁴² Benannt nach dem Ökonomen und Soziologen Vilfredo Pareto versteht die Verbesserung eines multikriteriellen Problems, ohne eine Eigenschaft zu verschlechtern.

Vgl. auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Pareto-Optimum>

der Entwurf nur für die beiden Hauptzielgrößen Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Vereinfachend kann dadurch der Entwurf einer multifunktional gradierten Wand in zwei separate Optimierungsprobleme aufgeteilt werden: die Ermittlung der minimalen Wanddicken zum einen zur Einhaltung der Tragfähigkeit und zum anderen zur Wärmedämmung [...]. In einem nachgelagerten Entwurfsschritt werden die sekundären Ziele wie Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz überprüft und die Materialverteilung gegebenenfalls angepasst.“⁵⁴³ Diese Form der iterativen Analyse, Gewichtung und Optimierung kann idealerweise mithilfe digitaler Werkzeuge und innerhalb einer digitalen Prozesskette erfolgen, um die Komplexität der multifaktoriellen Anforderungen für die Planerinnen und Planer handhabbar zu gestalten.

4.3.5 Abgleich der Gradientenbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese allesamt adressiert werden können. Zwei Kriterien davon erfordern weiteren Forschungsbedarf und zwei Kriterien werden nur angedacht.

Gradientenbeton bietet im Vergleich der drei Betontechnologien die höchste Druckfestigkeit und durch die Bewehrung insgesamt ein hohes Leistungsvermögen. Wenngleich dies einen relativ höheren Zementeinsatz bedingt, wird dieser in absoluten Werten durch die Einsparung von 60-70 Prozent Masse aufgrund des geringeren Materialquerschnitts kompensiert (→4.1.2.2 Reduktion von Masse).⁵⁴⁴ Wie sich dieser Sachverhalt in der Ökobilanz detailliert darstellt, sollte weiter untersucht werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Aspekte hervorzuheben. Zum einen wird bereits klimaeffizienter CEM II Zement verwendet (→4.1.2.4 Substitution Zement). Zum anderen könnten in Abhängigkeit von der Nutzung auch Wandquerschnitte mit einer geringeren Rohdichte und Druckfestigkeit entwickelt werden, vergleichbar mit den Systemen Infraleichtbeton und Aerogelbeton, um Überdimensionierungen zu vermeiden (→4.1.2.3 Reduktion Zementanteil und →4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit). Bisher konnten die erforderlichen U-Werte für Wandbauteile im automatisierten Nassspritzverfahren nicht eingehalten werden. Im Forschungsbericht wird bereits darauf hingewiesen, dass die Entwicklung sehr leichter mineralischer Schäume „mit hinreichender Festigkeit“ und „minimalem Schwinden“ zielführend sein könnte.⁵⁴⁵ Hier gibt es einen Querverweis zu der erprobten Forschung im Feld des Aeroleichtbetons.

Anteile von Rezyklat entsprechend des Kriteriums wurden bisher noch nicht in die Materialmatrix des Gradientenbetons integriert (→4.1.2.6 Recyclinganteil). Dies könnte in einer Anschlussforschung erprobt werden. Ein Potenzial hinsichtlich des Kriteriums Rückbaubarkeit stellt die Entwicklung reversibler Fügeverfahren dar. Dies wird aktuell in Ansätzen erforscht, beispielsweise mittels Spannschlössern

⁵⁴³ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 63.

⁵⁴⁴ Vgl. ebd., S. 9.

⁵⁴⁵ Ebd., S. 37.

(→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Füge­technik). Eine Wiederverwendung ganzer Komponenten wird damit in Aussicht gestellt (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und könnte die beschriebenen Möglichkeiten zur Abfallreduktion bieten (→4.1.2.9 Abfallreduktion). Da es sich in der aktuellen Forschung um eine prototypische Entwicklung handelt, wurde bisher auf konstruktiver Ebene noch keine Aussage getroffen, inwiefern die Bauteile nach ihrer Nutzung als ganze Komponenten in einen weiteren Lebenszyklus geführt werden könnten (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten).

Der Gradientenbeton erprobt im Vergleich der drei Betontechnologien die automatisierte Fertigung am weitesten und stellt diese in Relation zur Materialmatrix. Materialzusammensetzungen und Verfahren bedingen sich direkt. Die Versuche zeigen, wie wichtig es ist, die beiden Einflussfaktoren zusammen zu betrachten, da sie sich gegenseitig stark beeinflussen oder auch teils nicht kompatibel sind. Dies zeigt sich beim Gradientenbeton besonders bei der Herstellung Betone geringerer Rohdichte, die bisher nur im Verfahren des schichtenweisen Gießens erstellt werden konnten.

Generell können die Prozesskette und damit auch der Faktor Zeit durch die Fertigungstechnologie des Spritzverfahrens optimiert werden (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). Ebenso kann durch das Prinzip der Gradierung die Vorfertigung von Wandbauteilen umgesetzt werden, was die Produktivität im Bauwesen steigern kann (→4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität). Insgesamt zeigen sich nachweislich die Vorteile der digital gestützten Nachhaltigkeit (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse).

Offen bleibt zum jetzigen Zeitpunkt, wie eine Marktreife für diese Hochleistungsbauteile erreicht werden kann. Aufgrund der maximalen Individualisierung der Bauteilstruktur lässt sich aktuell nur eine Zulassung im Einzelfall erwirken. Ein möglicher Weg könnte die Zertifizierung von Typenbauteilen sein. Diese Herangehensweise begrenzt jedoch wiederum die Möglichkeit zum Unikat. An dieser Stelle wird erneut deutlich, welche Herausforderungen sich beim Versuch ergeben, Individualisierung und Standardisierung optimal austariert ins Verhältnis zu setzen. Um die Möglichkeiten der neuen Technologie vollumfänglich nutzen zu können bedarf es der Etablierung neuartiger Zulassungsverfahren.

4.3.6 Résumé: Gradientenbeton

Für die Betontechnologie Gradientenbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund der Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden: Es wird deutlich, dass sich die Forschung aus den gestalterischen und technischen Anforderungen heraus entwickelt hat, somit aus den Leitfaktoren **Technik** und **Konstruktion**. Ziel war es durch eine Fertigungstechnologie auf konstruktive Anforderungen hin multifunktional gradierte Querschnitte digital zu konzipieren und daraufhin zu realisieren. Digitale Planungswerkzeuge und automatisierte Fertigungsverfahren wirken hier integral zusammen. Das Mehrdüsen-Spritzverfahren erlaubt die Zuführung von Materialzusammensetzungen mit unterschiedlichen Dichten. Diese gezielte, funktionsoptimierte Materialansteuerung und die Applikation im dreidimensionalen Raum stellen eine Form des individualisierten Materialauftrags dar, bei dem gezielt Ressourcen eingespart werden können. Das Verfahren setzt einen hohen Automatisierungsgrad um und lässt die Integration weiterer Komponenten zur Fügung innerhalb des Fertigungsprozesses zu, so dass es ein Beispiel für die unter →2.2.4 geforderte komplementäre Fertigung darstellt. Mit Bezug auf den Leitfaktor **Konstruktion** erlaubt das Prinzip der Gradierung eine maximale Anpassung an konstruktive Anforderungen und damit die Erstellung adaptiver Komponenten. So können verschiedene Bauteile wie Träger, Platten oder Schalen gradiert werden. Im Forschungsprojekt zur Herstellung der Gradientenbetonwand erfolgte die Materialverteilung mittels „Pareto-Optimierung“ mit den Hauptzielgrößen Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Die Art der Gradierung variiert in Abhängigkeit von den aufgestellten Anforderungen und ist je nach Bauaufgabe neu zu definieren.

Es wurde ein digital gesteuertes automatisiertes Verfahren entwickelt, mit dem individuelle Bauteilquerschnitte, die auf spezifische Basismaterialien zurückgreifen, komponiert werden können. Auch dieses Vorgehen kann als eine Art des digitalen **Gestaltens** von Material und Bauteil bezeichnet werden. Es geht dabei nicht primär um das Erlangen einer ablesbaren gestalterischen Varianz mit Blick auf die Umsetzung einer architektonischen Qualität, sondern eher um die Gestaltung von individuellen Bauteilquerschnitten innerhalb des Produktionsprozesses zur Steigerung der konstruktiven Qualität. Das Prinzip der Gradierung könnte jedoch auch ähnlich des Rosenstein Pavillons⁵⁴⁶ genutzt werden, um eine ablesbare gestalterische Varianz zu realisieren. Diese bedarf eines innovativen Schalungssystems. Die Forschung zur Sandschalung am ILEK könnte hier in Kombination einen Lösungsansatz bieten, die anvisierte Individualisierte Standardisierung vollumfänglich abzubilden.⁵⁴⁷

⁵⁴⁶ Werner Sobek, Daria Kovaleva und Oliver Gericke, »Perforierte Betonschalen«, in: *ce/papers*, 3 (2019), Nr. 2, S. 89–93, hier S. 91.

⁵⁴⁷ Vgl. Kovaleva u. a. 2022 (wie Anm. 530).

4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton

Im Folgenden wird das Forschungsprojekt „Aerogel – Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern“⁵⁴⁸ dargestellt. Die Entwicklung erfolgte in Kooperation der Firma Housefabrik GmbH⁵⁴⁹, Kassel und des Lehrstuhls Baukonstruktion der TU Dortmund⁵⁵⁰, der zum Zeitpunkt der Projektdurchführung durch Prof. Ansgar Schulz und Benedikt Schulz geleitet wurde. Nach deren Ruf an die TU Dresden wurde das Forschungsprojekt durch die Juniorprofessur REB (zum Zeitpunkt der Projektdurchführung geleitet durch Jun. Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus) übernommen. Die Autorin war maßgeblich für die Antragstellung verantwortlich und bei der Durchführung des Forschungsprojektes als Projektleiterin tätig. Die Forschungsergebnisse wurden durch die Autorin gemeinsam mit Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus in mehreren Veröffentlichungen publiziert.^{551, 552, 553, 554, 555}

⁵⁴⁸ Forschungsprojekt beim BMWi im Zeitraum vom 1. November 2017 bis zum 31. März 2020.

⁵⁴⁹ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes wurden die Arbeitspakete des Kooperationspartner von der Firma G.tecz Engineering GmbH in Kassel übernommen.

⁵⁵⁰ An dem Forschungsprojekt waren über die Autorin hinaus am Lehrstuhl Baukonstruktion die Mitarbeiterin Dr.-Ing. Tanja Skottke sowie der Mitarbeiter Dipl.-Ing. Felix Lowin über die komplette Laufzeit beschäftigt. Die beschriebenen Inhalte, zu denen die Autorin selbst beigetragen hat, stammen zu großen Teilen aus dem Abschlussbericht.

⁵⁵¹ Vgl. Jutta Albus und Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter, »Prototypical approach for an individualized standardization process in the context of intelligent construction and automation«, in: *Architecture, Structures and Construction*, 3 (2023), Nr. 2, S. 275–287.

⁵⁵² Vgl. Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156).

⁵⁵³ Jutta Albus und Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Innovative Aerogel-Technologie zur energetischen Optimierung von Betonbauten und Effizienzsteigerung von Bauabläufen: Hybrid-Betonsystem für den Wohnungsbau«, in: *BWI - BetonWerk International*, 04 (2020), S. 32–50.

⁵⁵⁴ Dies., »Aeroleichtbetontechnologie – Implementierung eines Systemgedankens für den Wohnungsbau«, in: *punktum.betonbauteile*, 06 (2020), S. 29–31.

⁵⁵⁵ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 171–172.

4.4.1 Materialtechnologie

„Das modulare System basiert auf der Entwicklung einer spezifischen Materialzusammensetzung und deren Materialschichtung in Form von zwei dünnen nano-optimierten UHPC-Deckschichten mit eine wasserdichten Sichtbetonoberfläche und einem hochisolierenden und trotzdem tragfähigen Leichtbetonkern (Abb.74). Als Zuschlag wird erstmals Aerogel als Pulver in den schnellhärtenden Leichtbetonkern eingemischt. Mit der Einbindung der Aerogel-Technologie in den Fertigungsprozess ist es möglich, Hybridbeton-Paneele in einem Endlosprozess herstellen zu können und gleichzeitig in einem monolithischen Element alle Anforderungen an Statik, Brandschutz, Dichtigkeit und Wärmedämmung zu vereinen. Die entwickelte Fügetechnik ermöglicht es, die vorgefertigten Wand-, Boden- und Decken-Paneele zu geschosshohen Räumen zu verbinden.“⁵⁵⁶

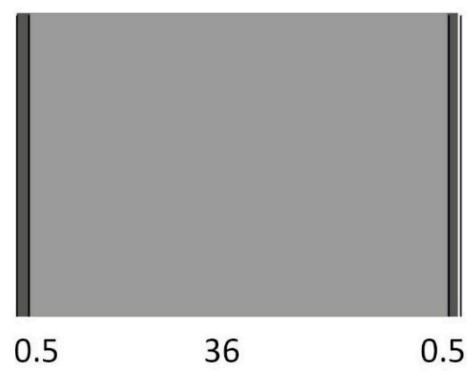


Abb. 74: Schematische Darstellung des hybriden Bauteils mit einem Querschnitt von 37 cm.
Eigene Darstellung

	PM12 A+L ⁵⁵⁷
Zusammensetzung	Zement, Gesteinsmehl, Aerogel, Leichtzuschlag, spezifischer Fasern, Wasser, Fließmittel, Schaum, Sand, Bindemittel
Zement	CEM I
Leichtzuschlag	Blähglas, Aerogel
Rohdichte (ofentrocken)	550kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,088 W/mK
Druckfestigkeit	0,67 MPa (nach 15 Min) 1,75 MPa (7d) 2,43 MPa (28)

⁵⁵⁶ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 171.
⁵⁵⁷ Die genaue Materialzusammensetzung fällt unter die Geheimhaltungserklärung.

Rahmenbedingungen
5 mm UHPC-Deckschicht, 36 cm Aeroleichtbetonkern, 5 mm UHPC-Deckschicht. Zielvorgabe: max. U-Wert von 0,24 W/m²K nach GEG einhalten.
Erreichte Rohdichte
Im Projekt konnte mit einer Trockenrohichte von 550 kg/m³ und einer Druckfestigkeit von 2,43 MPa (nach 28 Tagen) eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu bisher untersuchten pumpfähigen Leichtbetonen erzielt werden. Ein wesentlicher Vorteil der Matrix ist die schnelle Aushärungszeit von 0,67 MPa nach 15 Minuten und 1 MPa nach 60 Minuten. Die durch die verringerte Dichte erreichte Reduktion von Masse führt zur Reduktion von Emissionen beim Transport sowohl der Rohstoffe als auch fertiger Bauteile.
Wärmeleitfähigkeit
Mit der endgültigen Materialzusammensetzung wird die erforderliche Wärmeleitfähigkeit von 0,088 W/mK bei einer Druckfestigkeit von 2,43 MPa erreicht. Das Monomaterial erfüllt damit die aktuellen europäischen Normen für Wandkonstruktionen bei einer Dicke von 37 cm. Dabei wird der maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizient von 0,24 W/(m²K) unterschritten.
Zementanteil
Beim Schaumbeton war die Strategie, den Zementanteil zu reduzieren und durch Luft, Aerogel und leichte Zuschlagstoffe zu ersetzen. In den Testreihen kam noch der klimaintensivere CEM I Portlandzement zum Einsatz. Hier erscheint eine alternative Entwicklung mit CEM II möglich und zielführend. Es besteht weiterer Forschungsbedarf in der Durchführung einer einheitlichen Ökobilanzierung der drei Systeme, um den Einfluss der unterschiedlichen Zemente zu eruieren.
Aerogel und Wasseranteil
Aerogel ⁵⁵⁸ ist ein hochdämmendes Material. Die verwendeten Leichtzuschläge (Blähglas) unterstützen die Isolationseigenschaften sowie die statischen Eigenschaften zusätzlich (Abb. 75). Eine der Herausforderungen der Produkt- und Prozessentwicklung war es, die hydrophoben Eigenschaften des Aerogels mit den Standardbestandteilen einer Betonmischung zu kontrollieren. Der inhärente Eigenschaftskonflikt verschärft sich bei der Entwicklung von Schaumbeton im Vergleich zu herkömmlichem Betonen, da die schaubildenden Zusatzmittel, Aerogel und Leichtzuschläge, interagieren aufgrund des Wasserbedarfs und der mechanischen Auswirkungen im Produktionsprozess. Sie beeinflussen direkt die Dichte, die Fließfähigkeit und schließlich die Festigkeit des Betons. Mittels einer Vielzahl von Probekörpern wurde die optimale Materialmischung definiert. ⁵⁵⁹ Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Einbindung alternativer Aerocele

⁵⁵⁸ In diesem Anwendungsfall ist das Aerogelpulver ein hochporöser Festkörper auf Silicat-Basis der Firma Cabot.

⁵⁵⁹ Die genaue Materialzusammensetzung ist Teil der Geheimhaltungserklärung des Forschungstätigkeit und kann daher an dieser Stelle nicht veröffentlicht werden. Bei Bedarf bitte Rücksprache mit der Firma G.tecz Engineering GmbH aufnehmen.

beispielsweise auf Ligninbasis, wie sie an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) erforscht werden. ^{560,561,562}
Schrumpfen
Ein problematisches Verhalten des Materials äußert sich darin, dass die Matrix die unterschiedlichen Eigenspannungen nicht aufnehmen kann und es durch das Schrumpfen zur Rissbildung kommt. Schnellerhärtende Betone, aber auch Temperaturunterschiede bei Bauwerken jungen Alters, begünstigen dieses Verhalten und somit muss bei der Aeroleichtbetonentwicklung darauf besonderes Augenmerk gelegt werden.



Abb. 75: Hybridbeton-Elemente mit UHPC-Deckschicht und Aerogel-Schaumbeton © G.tecz Eneineering GmbH

⁵⁶⁰ Lignin basierte Aerogele werden in der Forschungsgruppe „Nanoporöser Materialien“ um Jun. Prof. Dr.-Ing. Pavel Gurikov erforscht und von der Firma Aerogel-it GmbH vertrieben.
⁵⁶¹ Vgl. Hamburg University of Technology, Institute of Thermal Separation Processes, »Tailor Made Nanoporous Material for Advanced Applications«, <https://www.tuhh.de/v8/research/fields-of-research/nanoporous-materials> (abgerufen am 13. April 2025).
⁵⁶² Vgl. Marc Fricke, »Bioaerogele«, <https://www.aerogel-it.de/> (abgerufen am 13. April 2024).

4.4.2 Fertigungstechnologie

„Die komplette Fertigungseinheit ist in mobilen Containern (Abb. 76) untergebracht und erlaubt so, wenn erforderlich, eine lokale Produktion und darüber hinaus die Nutzung regional verfügbarer Ressourcen. Dies wird besonders relevant bei der Einbindung von Rezyklaten. Das Herstellungsverfahren ist als linearer, endloser Produktionsprozess konzipiert, der vollständig automatisiert ausgeführt wird.“⁵⁶³ Die Produktionsmaschine passt anhand der zuvor eingespeisten digitalen Informationen mit einer verstellbaren Schalung die Plattengeometrie in allen drei Dimensionen - Länge, Breite und Materialstärke - an, so dass Parameter aus Entwurf, Bauphysik und Konstruktion zusammengebracht werden können.

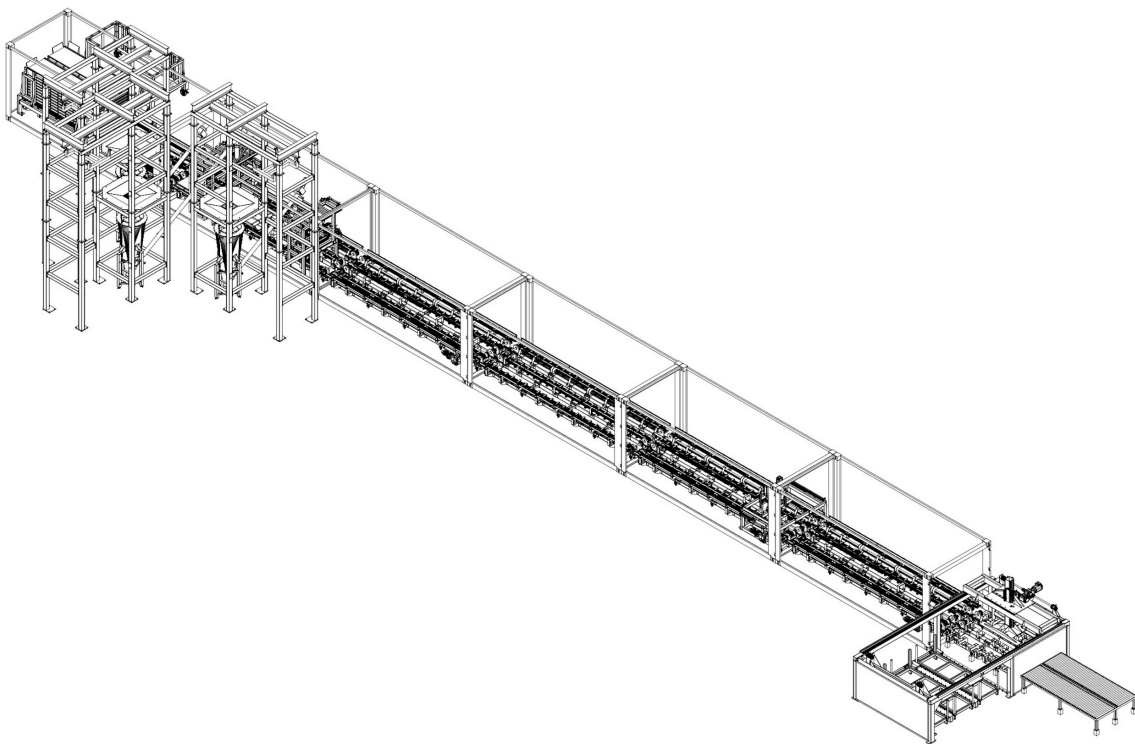


Abb. 76: Mobiles Produktionslayout in Containern © Gtec Engineering GmbH

Der Wandquerschnitt mit erheblich reduzierter Elementdicke wird in einem horizontal ausgeführten Co-Extrusionsverfahren geschichtet erstellt (Abb. 77). Die Maschine ist so konzipiert, dass die Schalungen mit offener Oberseite, auf einem Förderband gefügt werden (Abb. 78). Magnetische Kontakte dienen zur Ausrichtung der Schalungselemente in einer Endlosschleife. Da der Aeroleichtbeton für die maschinelle Verarbeitung auf diesen Anlagen der Extrusionseinheit automatisiert zugeführt werden soll, sind bestimmte Vorgaben an die Materialeigenschaften wie Konsistenz, Fließverhalten, Viskosität (Abb. 79) und Abbindegeschwindigkeit maßgebend, wobei eine gewisse Variabilität bei der Synchronisation der Materialkonsistenz besteht. Die einzelnen Materialbestandteile sind mit einer Mischeinheit verbunden, die in den Extrusionsformprozess integriert ist und welche

⁵⁶³ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 171.

je nach Bedarf automatisch betrieben werden kann. Eine spezifische Materialkonsistenz und die schnelle Aushärtung ermöglichen eine Aufbringung der unterschiedlichen Schichten in einem Nass-in-Nass-Verfahren.

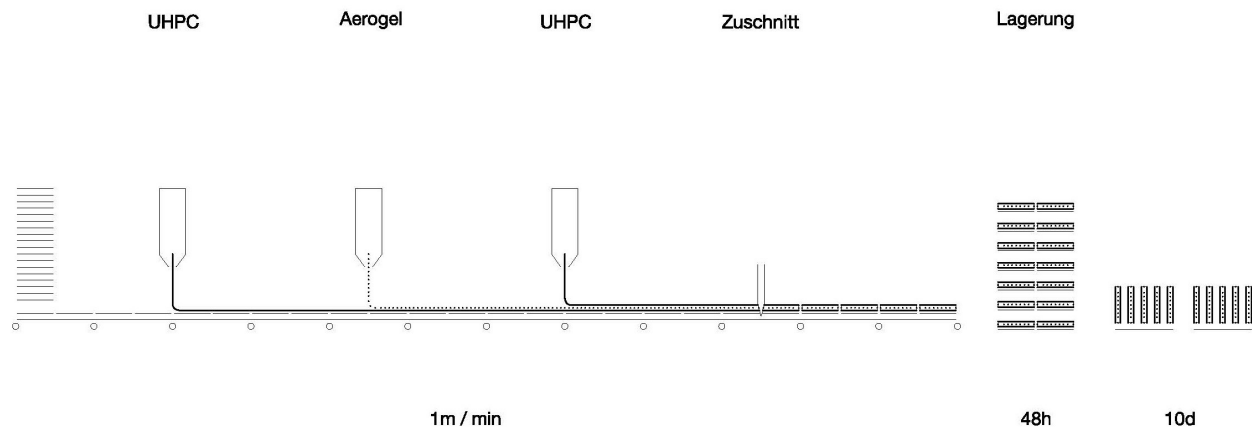


Abb. 77: Schichtenweises Aufbringen der Materialmatrix © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

Somit kann bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 1m/min und einer beispielhaften Paneelbreite von 1,4 m eine Größenordnung von 84 m² in einer Stunde gefertigt werden. Nachdem die Materialschichtung abgeschlossen ist, werden die Betontafeln nach einem in Bezug zur Aushärtung stehenden Vorschub durch eine Säge automatisiert in gewünschte Elementlängen getrennt. Nach nur 15 Minuten ist der Aeroleichtbeton durch die schnell aushärtende Materialzusammensetzung ausreichend fest und kann ausgeschalt werden. Eine Kennzeichnung mit RFID-Codes gekennzeichnet erlaubt eine Identifikation und intelligente Logistik im gesamten Lebenszyklus.

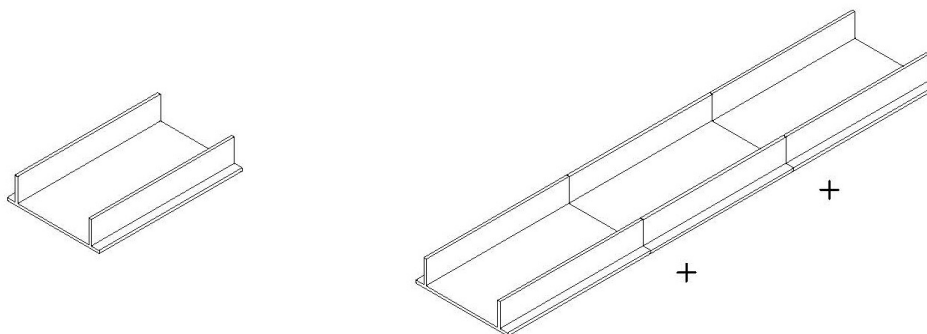


Abb. 78: Kopplung der offenen Schalungen über Magnetkontakte
© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)



Abb. 79: Materialmatrix © G.tecz Engineering GmbH

4.4.3 Konstruktion

Die Forschungsleistung visiert mit einem Baukasten aus Wand-, Decken- und Bodentafeln (Abb. 80) eine systematisierte, wirtschaftliche Lösung an, die für den mehrgeschossigen Wohnungsbau ebenso wie den Bürosektor geeignet ist. Vor dem Hintergrund, dass ein hoher Vorfertigungsgrad schnellere Planungs- und Bauprozessen ermöglicht, war darüber hinaus die Anpassbarkeit des Systems besonderer Forschungsgegenstand. Die Paneeldimensionen sollten den Projektanforderungen entsprechend konzipiert werden können – ganz im Sinne einer Individualisierten Standardisierung.⁵⁶⁴ In diesem Fall bedeutet das, dass der Produktionsprozess konstant bleibt, jedoch Paneeldimensionen, Materialbeschaffenheit sowie gestalterische Parameter flexibel automatisiert zusammengestellt werden können. So wird ein adaptives System geschaffen, das sich konstruktiv, bauphysikalisch und gestalterisch variabel darstellt.

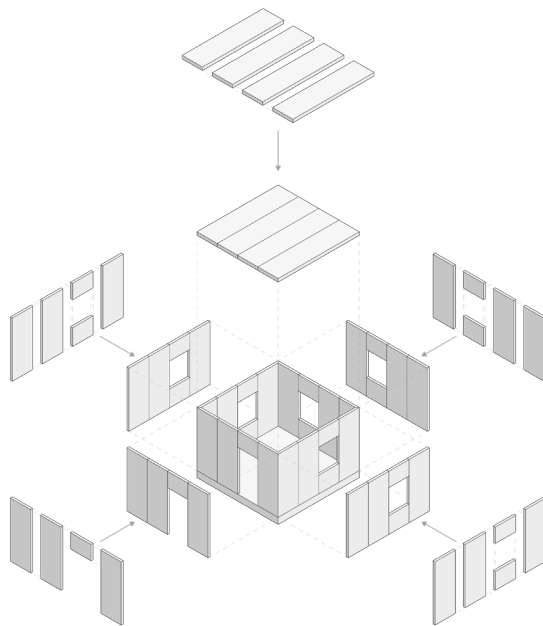


Abb. 80: Systembaukasten mit individuellen Gestaltungsmerkmalen

© G.tecz Engineering GmbH

Konform zur Individualisierten Standardisierung können ebenso die Fügepunkte an die unterschiedlichen konstruktiven sowie bauphysikalischen Anforderungen angepasst werden (Abb. 81). Im Laufe des Forschungsprojektes wurde das Prinzip der hybriden Betontafelbauweise zu einem systematisierten offenen Systembaukasten erweitert, wobei die Aeroleichtbeton-Wände mit üblichen vorgefertigten Betonbauteilen, wie präfabrizierten Deckenkonstruktionen, kombiniert wurden.

In der gewählten Kombination aus Aeroleichtbetonkomponenten und Fertigteilen können Nachhaltigkeitspotenziale und wirtschaftliche Aspekte besser berücksichtigt werden, da die verschiedenen Fertigteilsysteme ihren Eigenschaften entsprechend

⁵⁶⁴ Vgl. Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156).

optimal eingesetzt werden. Letztlich führt ein hoher Vorfertigungsgrad zu schnelleren Planungs- und Bauprozessen. Mit der neuen Technologie können Materialeigenschaften, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, projektspezifisch eingestellt werden - dies kann als digitale Materialeigenschaft bezeichnet werden (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material). „Durch seine homogene Dämmwirkung über den gesamten Elementquerschnitt ermöglicht der Aeroleichtbeton vereinfachte Anschlüsse, die Wärmebrücken verhindern (Abb. 82).“⁵⁶⁵

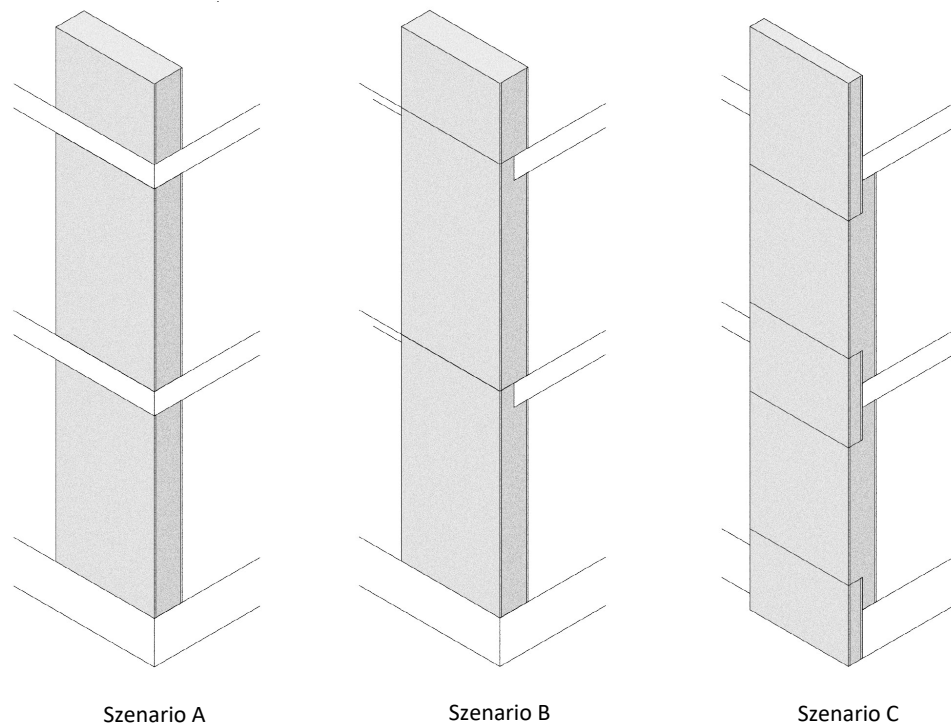


Abb. 81: Varianz in den Konstruktionsprinzipien

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

Die Abbildung 81 zeigt drei verschiedene Verbindungsprinzipien im Bereich der Wand-Boden- und Wand-Decken-Anschlüsse:

Das Szenario A zeigt Wandpaneele und Deckenplatten jeweils aus Aeroleichtbeton. Da beide Bauteile ähnliche Dämmeigenschaften haben, können die Deckenplatten mit ungedämmter Stirnseite ausgeführt werden. So werden Wärmebrücken eliminiert und die Detaillierung erheblich vereinfacht.

Szenario B kombiniert Wandpaneele aus Aeroleichtbeton mit konventionellen Betonfertigteildecken. Der Falzanschluss wird durch das Einlegen von Formteilen in die Schalung im automatisierten Prozess realisiert. Der Anteil des Aerogels ist auf die geringste Bauteilqualität im Bereich des Deckensturzes abgestimmt, um Kondensation im Bereich dieser Wärmebrücke zu verhindern. Dies impliziert wiederum bezogen auf das gesamte Wandbauteil eine überdimensionierte Menge an Aerogel im Wandbereich.

⁵⁶⁵ Ebd., S. 3.

Szenario C verwendet die Kombination aus Aeroleichtbeton mit konventionellen Fertigteildecken und separaten Bauteilen mit verbesserten Dämmeigenschaften an der Außenseite des Deckenanschlusses. In diesem Fall ist der höhere Aerogelanteil auf dieses Bauteil beschränkt. Diese Ausführung stellt somit eine mineralische stirnseitige Dämmung der Deckenplatte mit der gleichen Oberflächenqualität wie die Wandpaneele selbst dar. Dieses Prinzip zeigt die Möglichkeit, maßgeschneiderte Materialien bedarfsorientiert zu produzieren, in diesem Fall ein Wandbauteil und ein Sonderbauteil mit höheren Dämmeigenschaften und geringeren statischen Anforderungen.

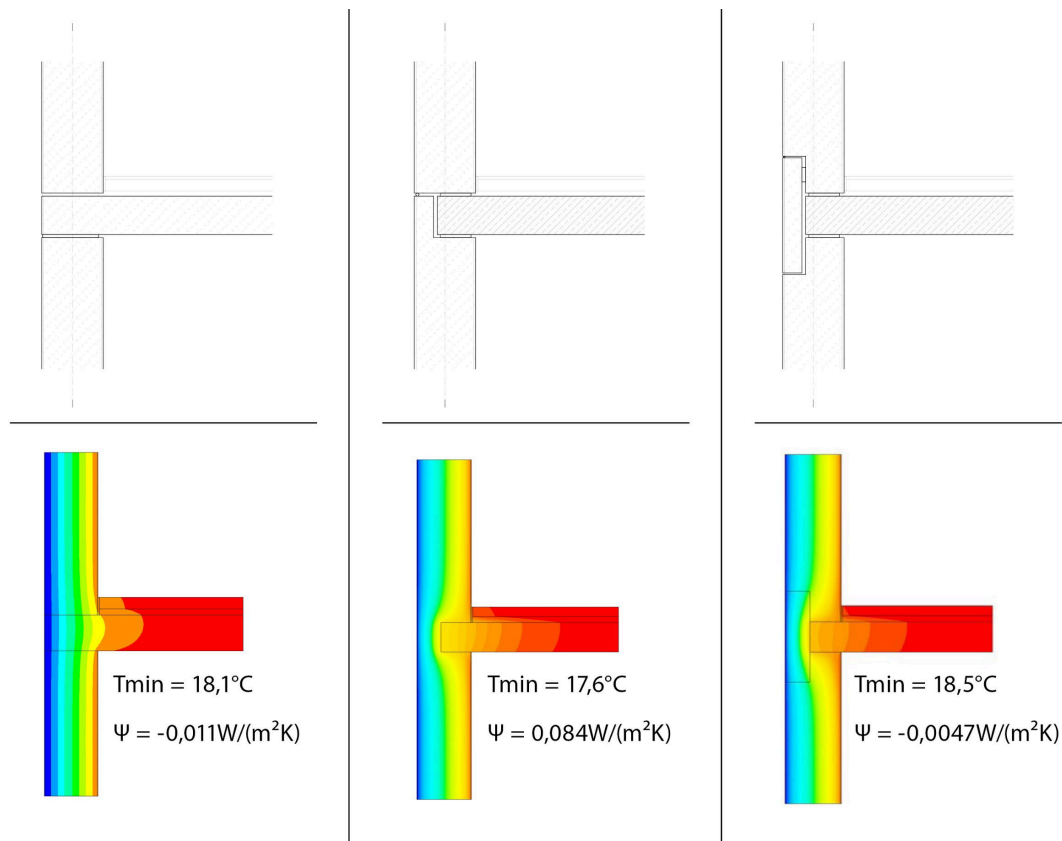


Abb. 82: Gegenüberstellung der Anschlussdetails unter Berücksichtigung der thermografischen Darstellung

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)

Im Rahmen der Forschung wurden verschiedene Verbindungsprinzipien entwickelt, an einem Demonstrator (Abb. 83) realisiert und in einem Langzeit-Monitoring bezüglich bauphysikalischer und konstruktiver Aspekte überwacht. Außerdem wurden an diesem Versuchsstand verschiedene Klebstoffe, ein Zweikomponentenkleber und ein UHPC-Kleber, getestet und bewertet (Abb. 84).

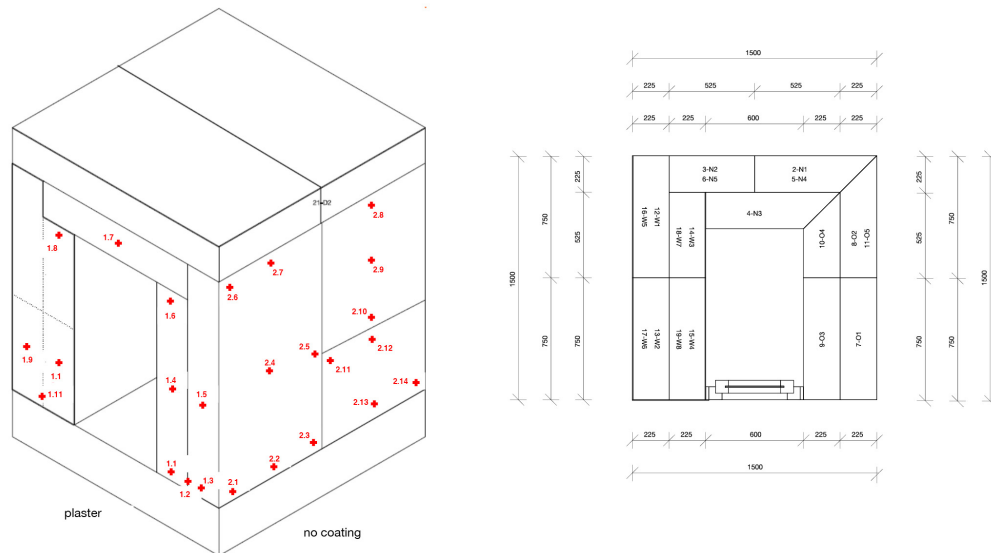


Abb. 83 Konzipierung des Demonstrators © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)



Abb. 84: Demonstrator zum Langzeit-Monitoring der Bauphysik, Statik und Verbindungstechnik © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion. Eigene Darstellung

4.4.4 Digitales Gestalten

Neben den aufgrund seiner Formfreiheit großen gestalterischen Möglichkeiten von Beton erlaubt genau diese Formbarkeit des Monomaterials mit zusätzlicher Funktionalität eine projektspezifische Anpassung. Diese Aspekte wurden durch die automatisierte Fertigung zusammengeführt. „Durch intelligente Konstruktionsprinzipien und Füge-Techniken, die zwar modular, aber nicht als monotone Repetition ablesbar sind, kann hochwertige Architektur generiert werden. Die Forschung zielt darauf ab, durch die Einbindung digitalisierter Entwurfsprinzipien und einer automatisierten Fertigung die Probleme bisheriger Standardisierungsprozesse zu überwinden.“⁵⁶⁶

Eine Einbindung digitaler Werkzeuge wurde beispielsweise für die Bilanzierung der Wärmebrücken genutzt, um damit die spezifischen Materialanforderungen zu definieren. Darauf aufbauend wurden die Materialmatrix unter Berücksichtigung des Aerogelanteils und der Schichtenaufbau aufeinander abgestimmt. Projektspezifisch können durch die Forschungstätigkeit sowohl Wanddicke, Schichtenaufbau als auch Paneel-Dimensionen innerhalb des Produktionsprozesses definiert werden. Ebenso können im Fertigungsprozess Schalungsmatrizen eingelegt werden oder diese mit zusätzlichen Leisten und Formteilen ergänzt werden, um projektspezifische Oberflächen zu erzeugen (Abb. 85). Die Möglichkeiten, individuelle Oberflächenmuster und -reliefs zu generieren, kann eine architektonische Qualität und kreative Umsetzung fördern.

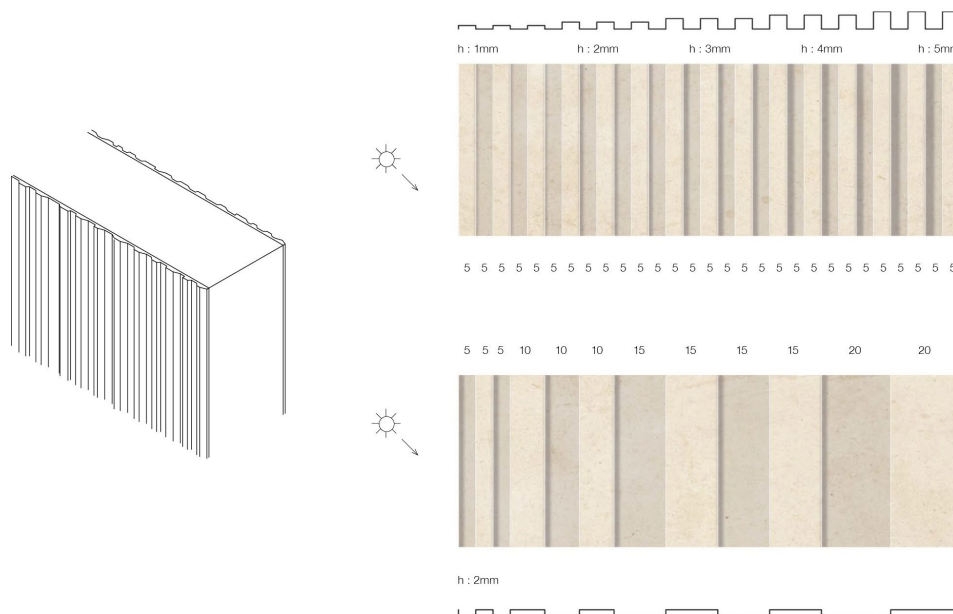


Abb. 85: Individualisierte Oberflächengestaltung des mehrschichtigen Wandaufbaus

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

⁵⁶⁶ Vgl. Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 173.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die automatisierte Integration projektspezifisch angepasster Schalungen und Bewehrungselemente in die Fertigungsumgebung konzeptionell angedacht.⁵⁶⁷ Eine entsprechende Umsetzung wäre Gegenstand einer Anschlussforschung, um durch eine verlustfreie Überführung des digitalen Gestaltens in die Produktion Systemlösungen mit individuellen Gestaltungsmerkmalen zu realisieren. Das System könnte so weiterentwickelt werden, sodass auch bewehrte Lösungen je nach statischen Anforderungen in den Prozess integriert werden. Eine projektbezogene Farbcodierung kann mithilfe digitaler Steuerungssysteme umgesetzt werden. Durch eine verlustfreie Überführung des digitalen Gestaltens in die Produktion können so Systemlösungen mit individuellen Gestaltungsmerkmalen realisiert werden. Ein weiterer Faktor, den die Individualisierte Standardisierung begünstigt, ist eine gestalterische Varianz, die die Dauerhaftigkeit steigert.

4.4.5 Abgleich der Aeroleichtbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese grundsätzlich adressiert werden können. Davon werden acht bereits umfassend berücksichtigt, vier erfordern weiteren Forschungsbedarf.

Das Konzept der synchronen Abstimmung von Konstruktion, Fertigung und Gestaltung zielt darauf ab, die Nachhaltigkeit übergreifend zu verbessern.

Bei der Entwicklung des Monomaterials standen die Reduktion des Rohstoff- und Energieverbrauchs sowie eine hohe Leistungsfähigkeit in Bezug auf Wartung und Recyclingfähigkeit im Vordergrund. Das hochresistente Wandmaterial gewährleistet eine sehr lange Lebensdauer und bietet eine dauerhafte und solide Konstruktion. Aufgrund der wasserbeständigen und dichten UHPC-Oberfläche werden die Kosten für die Instandhaltung reduziert (→4.1.2.1 Nutzungsdauer). Wegen der konsequenten Sortenreinheit ist eine Kreislauffähigkeit gegeben. Die Betonmatrix wurde explizit ohne die Verwendung von Bewehrungsstahl konzipiert, um ein effizientes Recycling zu gewährleisten (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Füge-technik). Wegen seines hybriden Schichtaufbaus aus einer UHPC-Deckschicht und einem isolierenden Aerogel-Schaumbetonkern trägt der Aeroleichtbeton zu einer deutlichen Reduzierung des Materialeinsatzes bei und damit zu einem um circa ein Drittel verminderter Zementanteil im Vergleich zu Normalbeton. So kann ein gutes Gleichgewicht aus geringer Rohdichte (→4.1.2.3 Reduktion Zementanteil) und Druckfestigkeit (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit) hergestellt werden. Darüber hinaus könnte die Ökobilanz der Bauteilmatrix durch die Einbindung eines klinkereffizienten Zementes (→4.1.2.4 Substitution Zement) und durch die Integration von Recyclinganteilen (→4.1.2.5 Recyclinganteil) deutlich verbessert

⁵⁶⁷ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes konnte die Anlagentechnik im Verlauf der Forschung nicht weiterentwickelt werden. Aus diesem Grund konnte weder die Schalungstechnik erprobt noch Prototypen der Oberflächengestaltung realisiert werden.

werden- An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf. Auf Bauteilebene ist kritisch anzumerken, dass die zunächst angedachte nasse, irreversible Fügung der Komponenten untereinander einer zirkulären Bauweise nicht gerecht wird. Dieser Tatsache ist zudem geschuldet, dass die Wiederverwendung ganzer Bauteile bisher nicht abbildbar ist. Somit ergeben sich sowohl mit Blick auf eine reversible Fügetechnik (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik) als auch darauf aufbauend eine Bauteilweiterverwertung (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) weitere Forschungsbedarfe. Entsprechend ist die Abfallreduktion durch Wiederverwendung bisher nur konzipiert, aber nicht weiter erforscht. (→4.1.2.9 Abfallreduktion).

Mit Blick auf die Nachhaltigkeitskriterien im Zusammenhang mit der Fertigung ist die gewählte Verfahrenstechnologie positiv zu bewerten. Durch eine echte Vor-Ort-Produktion innerhalb einer mobilen Produktionslinie können circa 90 Prozent lokaler Rohstoffe verwendet werden und eine optimierte Logistik sichergestellt werden, dies insbesondere dann, wenn Abbruchmaterial lokal vorhanden ist (→4.1.2.10 Transport und Regionalität). Gleichwohl wird durch die Vorfertigung und hochwertige Materialverarbeitung die notwendige Präzision einer Fertigteilbauweise erreicht, die eine effiziente Montage vor Ort unterstützt.

Forschungsgegenstand war die Entwicklung eines automatisierten Co-Extrusionsverfahrens. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergänzung mit robotergestützter Prozesstechnik darüber hinaus zu einem höheren Automatisierungsgrad und einer Steigerung der Produktivität führen könnte. (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). So könnten, wie eingangs erläutert, beispielsweise Montageanker oder Elemente, die eine reversible Fügetechnik erlauben, direkt in den Fertigungsprozess automatisiert integriert werden (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik), wie auch eine Nachbearbeitung der Platten innerhalb des Produktionsprozesses automatisiert erfolgen.

4.4.6 Résumé: Aeroleichtbeton

Für die Betontechnologie Aeroleichtbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund der Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden: Es wird deutlich, dass sich die Forschung aus den Leitfaktoren **Technik** und **Konstruktion** heraus entwickelt hat. Die Einbindung des Aeroleichtbetons in ein automatisiertes, kontinuierliches Herstellungsverfahren kann einen hohen Serienfaktor erreichen. Das Verfahren ermöglicht eine effiziente Produktion, Montage und Installation der geschosshohen Betonplatten, die den vielfältigen Anforderungen an leistungsfähige und rezyklierbare Bauteile gerecht werden. Die Forderung nach einer komplementären Fertigung (→2.2.4 Résumé: *Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie*) wird in dem Sinne umgesetzt, als dass durch Kombination der Mischmodule ein individualisierter Materialauftrag in unterschiedlichen Schichten erfolgen kann. Des Weiteren wird die Integration weiterer Schritte in den Fertigungsprozess, wie das Einlegen von Transportankern, oder von Bewehrung in Aussicht gestellt. Auch das automatisierte Schneiden ist konzipiert und in das Verfahren integriert.

Die Relevanz des Leitfaktors **Konstruktion** zeigt sich maßgeblich in der Umsetzung adaptiver Komponenten (→2.3.4 Résumé: *Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*). Die Strategie der Individualisierte Standardisierung wird durch die Anpassbarkeit von Wanddicke, Schichtenaufbau und Paneel-Dimensionen innerhalb des entwickelten Konstruktionssystems abgebildet. Dies kann durch die Variation der Schalungsgeometrien innerhalb des Fertigungsprozesses realisiert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung liegt in der Einbindung des Leitfaktors **Gestaltung** in Form der digitalen Konzeption von Materialanforderungen und konstruktiver Umsetzung. Die individualisierten Wandaufbauten werden in Abhängigkeit von den konstruktiven und bauphysikalischen Anforderungen mithilfe digitaler Werkzeuge komponiert und erlauben eine direkte Überführung digitaler Daten in die Fertigung (→2.4.4 Résumé: *Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit*). An der Schnittstelle Gestaltung und Technik wird somit ebenfalls eine Form der Individualisierung ermöglicht. Die dafür erforderliche Kopplung der Maschine an die digitalen Werkzeuge ist im Forschungsprojekt nur konzeptionell angelegt. Dadurch ist die Schnittstelle Gestaltung und Konstruktion und damit die Anbindung eines digitalen Planungstools an den Produktionsprozess bisher nur projektiert.

Die automatisierte Materialeinstellung durch eine Variation der Zuschlagstoffe wie des Aerogelanteils wird ebenso in Aussicht gestellt, jedoch noch nicht innerhalb der Forschung maschinell im Fertigungslayout, sondern als Prototyp getestet.

Einen weiteren wesentlichen Aspekt einer Individualisierung innerhalb des Systems bietet die Möglichkeit der visuellen Gestaltbarkeit der Oberflächen und Farbigkeit der Wandpaneele.

Durch den Ansatz der Zusammenführung von Prozessen und Leitfaktoren werden allgemein gesprochen funktionsoptimierte Betonbauteile geschaffen, die

zudem eine gestalterische Varianz implementieren. Es zeigen sich auch bei der Aeroleichtbetontechnologie nachweislich die Vorteile der digital gestützten Nachhaltigkeit (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse). Damit werden Strategien und Methoden für einen individuelleren und dennoch ökologisch und ökonomisch orientierten Bauprozess generiert.

4.5 Zusammenfassung Synopse

Im Anschluss an die separate Betrachtung der Systeme nach den aufgestellten Kriterien kann nun eine wertvolle Synthese erfolgen. Das zu Beginn aufgezeigte Defizit, dass Forschungen meist aus lediglich einem Schwerpunkt der drei Leitfaktoren heraus initiiert werden, bestätigt sich auch bei den analysierten Betontechnologien. Die Zielstellung, dass die Systeme durch die Gegenüberstellung voneinander lernen können, kann bestätigt werden und wird im Folgenden ausgeführt. Die Synopse zeigt, dass sich jeder Forschungsansatz durch individuelle Stärken auszeichnet. Es soll dabei als Chance begriffen werden, diese jeweiligen Vorteile auf die anderen Systeme übertragen zu können. Anhand der entsprechenden Analyse der Leitfaktoren kann aufgezeigt werden, dass die Strategie der Individualisierten Standardisierung und damit das bewusste ins Verhältnis setzen der drei Leitfaktoren gewinnbringend für die allgemeine Forschung sein kann.

Projektspezifische Gewichtung der Kriterien

Anhand der dargestellten Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen wurden die untersuchten Betontechnologien mit jeweils 1 bis 3 Punkten bewertet (→ 4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen). In den Abbildungen 86-88 ist im direkten Vergleich der drei Technologien die Bandbreite zum Erreichen der Punkte ausgewiesen und eine Bewertung vorgenommen. Daraus ist ablesbar, welches der drei betrachteten Systeme gemäß Analyse der Autorin den definierten Nachhaltigkeitsanforderungen des jeweiligen Kriteriums am meisten entspricht.

Kriteriengruppe Materialtechnologie (Abb.86):

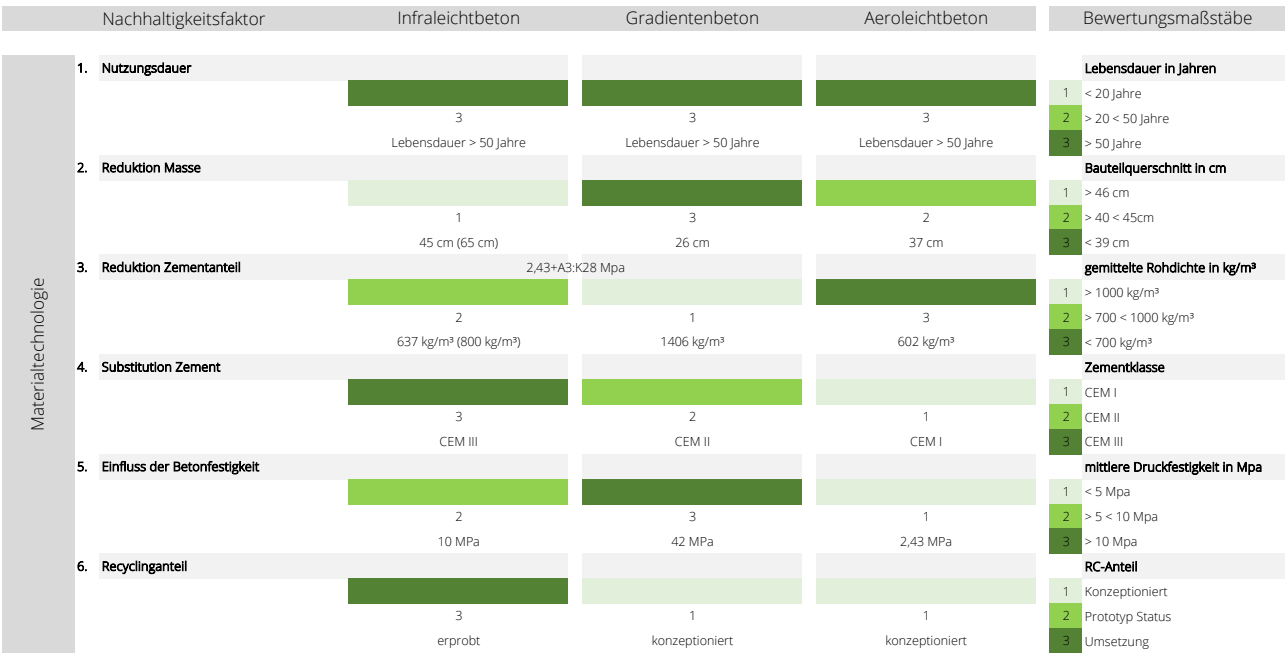


Abb. 86: Synopse der Kriterien 1-6 mit Schwerpunkt auf die Materialtechnologie. Eigene Darstellung

Allen drei Betontechnologien haben den Vorteil der integrierten Wärmedämmung innerhalb der Monomaterialität gemein und können mit einer Lebensdauer von mehr als 50 Jahren in die Bewertung einfließen. Die drei monolithischen Betontechnologien grenzen sich daher von anderen Materialien, aber auch von mehrschichtigen Betonkonstruktionen mit separater Dämmschicht positiv ab. Ein exakter Vergleich der drei Betontechnologien ist schon aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Zielsetzungen nicht deckungsgleich möglich. Die Forschung zum **Gradientenbeton** verfolgt das unter (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit) dargelegte Prinzip, den Wandquerschnitt stark zu minimieren, also die Masse eingesetzter Ressourcen zu reduzieren, und dafür einen Beton mit hoher Druckfestigkeit unter Verwendung eines höheren Zementanteils einzusetzen. Im Vergleich der Systeme ist der Materialquerschnitt mit 26cm am geringsten. Die funktionale Schichtung in zwei 6 cm starke Schalen und einen 14 cm dicken Kern unterstützt das Prinzip der Gradierung und weist dadurch einen gezielten Materialeinsatz auf. Zudem begünstigt die Bauteilschichtung den Lastabtrag, so dass sehr hohe Druckfestigkeiten von gemittelt 42 MPa erzielt werden können. Die gemittelte Rohdichte⁵⁶⁸ liegt mit 1406 kg/m³ relativ hoch und erfüllt mit der daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit nicht die Anforderungen an Außenwandbauteile nach GEG⁵⁶⁹. Die Forschung zum **Aeroleichtbeton** versucht konträr dazu, in Anlehnung an unbewehrte Systemwandelemente aus Porenbeton, einen mit bestehenden klassischen Wandsystemen vergleichbaren Materialquerschnitt zu realisieren. Die Druckfestigkeit liegt bei diesen Vergleichssystemen bei einer Rohdichte von nur 350 kg/m³ bei 1,8 MPa in der Anwendung als ungedämmte Außenwand.⁵⁷⁰ Der Aeroleichtbeton erreicht mit seiner gemittelten Rohdichte von 602 kg/m³ eine Druckfestigkeit von 2,43 MPa. Die Deckschichten dienen als Oberflächenveredelung und übernehmen eine Schutzfunktion, sie tragen jedoch keine Lasten ab. Die Forschungsleistung des **Infraleichtbetons** verfolgt das gleiche Ziel, mittels einer geringen gemittelten Rohdichte von 637 kg/m³ beim inhomogenen und 800 kg/m³ beim homogenen Querschnitt den Zementanteil zu reduzieren. Dies impliziert, dass der Zementeintrag durch die relativ geringe Trockenrohddichte niedriger ist, die Materialmatrix jedoch einen größeren Wandquerschnitt bedingt und damit insgesamt einen erhöhten Ressourceneinsatz und entsprechend auch Zementinsatz zur Folge hat. Infolgedessen ist beim Infraleichtbeton positiv hervorzuheben, dass bereits der klinkereffiziente CEM III zum Einsatz kommt und ebenso Rezyklat-Anteile eingebunden werden. Auch Infraleichtbeton ist mit einer gemittelten Druckfestigkeit von bis zu 10 MPa im Vergleich zum Aeroleichtbeton relativ hoch ausgelegt. Infraleichtbeton ist bereits in unterschiedlichen

⁵⁶⁸ Die Rohdichte eines C25/30 beträgt 2400kg/m³. Ein Beton mit einer Rohdichte kleiner 800 kg/m³ gilt als Infraleichtbeton.

⁵⁶⁹ Nach Gebäude-Energie-Gesetz ist für Außenwandflächen nach Modernisierungsmaßnahmen ein U-Wert von 0,24 W/m²K einzuhalten. Nach dem Vereinfachten Nachweisverfahren für zu errichtende Wohngebäude ist ein U-Wert von 0,20 W/m²K für Außenwandflächen einzuhalten (§ 31 Absatz 1, Anlage 5).

⁵⁷⁰ Xella Porenbeton Schweiz AG, »Ytong Systemwand: Elementierte Massivbauweise in Bestzeit«, https://baustein.xella.ch/media/ressources/Ytong_Systemwandelemente_CH.pdf (abgerufen am 8. Mai 2024).

Rohdichteklassen erhältlich und kann dadurch auch an die Bauaufgabe angepasst werden.

Dieses Spannungsfeld zeigt, dass die Entwicklungen der verschiedenen Verfahrenstechniken aus unterschiedlichen Anforderungen heraus entstanden sind. Materialentwicklung und Fertigungsverfahren sind dabei eng miteinander verknüpft. Das Spritzverfahren der Gradientenbeton-Technologie schränkt beispielsweise die Herstellung einer geringeren Rohdichte ein, ist dafür aber zur effizienten und zielgerichteten Materialapplikation einer weniger leichten Betonmatrix geeignet. Die Einbindung eines Aerogels in den Fertigungsprozess konnte beim Spritzverfahren nicht realisiert werden. Die Aeroleichtbetontechnologie wurde entgegen der Herangehensweise beim Gradientenbeton dagegen genau aus der Zielsetzung heraus entwickelt, einen besonders leichten Schaumbeton innerhalb eines Endlosverfahrens zu extrudieren.

Es kann geschlussfolgert werden, dass die Materialentwicklung und damit die Festlegung des Verhältnisses aus Druckfestigkeit, Zementeinsatz und Masse in direkter Abstimmung mit der konkreten Bauaufgabe erfolgen sollte. Aus Sicht der Autorin wäre es ein interessanter Forschungsansatz, mit den spezifischen Stärken der jeweiligen Forschungsleistungen in den Austausch zu gehen. Entsprechend der von der Autorin geforderten komplementären Fertigung (→2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie) könnte beispielsweise der Co-Extrusionsprozess mit dem Spritzbetonverfahren des Gradientenbetons kombiniert werden, um so Lastabtrag und gleichermaßen Dämmfunktion optimal zu kombinieren. Ferner könnte die Materialmatrix der Schaum- und Deckschichten hinsichtlich der Einbindung von R-Anteilen und bezüglich des Zementeinsatzes verbessert werden. Die innerhalb der Aeroleichtbeton-Technologie erprobte Einbindung des Aerogels könnte vertieft werden mit Blick auf die Integration von Lignin basierten Aerogelen. Es ist zu prüfen, ob sich dadurch die Materialquerschnitte der Technologien optimieren lassen. So wie der Gradientenbeton und Infraleichtbeton ohne den Einsatz von Bewehrung erforscht werden könnten, wäre auch die automatisierte Implementierung einer Bewehrung beim Aeroleichtbeton weiterzuverfolgen. Die Darstellung weist auf, dass es im Bauwesen nicht nur einen Lösungsweg gibt. Vielmehr stehen vielfältige Mittel bereit, um Bauteile den spezifischen Anforderungen entsprechend zu konstruieren. Hierbei sind stets die verschiedenen multifaktoriellen Anforderungen gegeneinander abzuwägen, um eine maßgeschneiderte Lösung anzubieten.

Kriteriengruppe Konstruktion (Abb.87):

Nachhaltigkeitsfaktor		Infraleichtbeton	Gradientenbeton	Aeroleichtbeton	Bewertungsmaßstäbe
Konstruktion	7. Wiederverwendung von Komponenten	1 angedacht	1 angedacht	1 angedacht	Wiederverwendung 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung
	8. Rückbaubarkeit/rev. Fügetechnik	1 Modular-über Fügung keine Aussage	3 Einlegeanker	1 irreversibel Prototyp	Reversibilität 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung
	9. Abfallreduktion	1 konzipiert	1 konzipiert	1 konzipiert	Abfallreduktion 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung

Abb. 87: Synopse der Kriterien 7-9 mit Schwerpunkt auf die Konstruktion. Eigene Darstellung

Die konstruktive Fügung ist im Forschungsgebiet der **Gradientenbeton-Technologie** am weitesten entwickelt. Hier wurden bereits unterschiedliche Prinzipien getestet und in das Bauteil integriert und erprobt. Der Gradientenbeton betrachtet in unterschiedlichen Forschungen auch unterschiedliche Bauteile, wie Träger, Decken oder Schalen. Die Forschung zum Wandbauteil variiert bisher jedoch noch nicht in der Geometrie. Dies liegt darin begründet, dass die Fertigung auf einem vordefinierten Schaltisch ausgeführt wird. Dies impliziert, dass der Materialauftrag in hohem Maße automatisiert erfolgt und die Materialanordnung innerhalb des Bauteils entsprechend individualisiert wird. Die Paneeldimensionen dagegen sind jedoch bisher noch nicht adaptiv ausgebildet. Die Wandtafeln sind so konzipiert, dass sie jedoch als ganze Bauteile wiederverwendet werden könnten. Die **Infraleichtbeton-Technologie** ist sehr weit entwickelt mit Blick auf klassische Fügepunkte und setzt dabei durch das dämmende Monomaterial einen den wärmebrückenminimierten Anschluss um. Eine reversible Fügetechnik wird innerhalb eines Forschungsprojektes weiterentwickelt, ist jedoch noch nicht veröffentlicht. Eine Stärke dieses Verfahrens liegt sicherlich in der Konzeptionierung unterschiedlicher Bauteilgeometrien in der Fassadengestaltung, die auf den Lastverlauf abgestimmt sind. In diesem Bereich wird eine Varianz in der Modulerstellung abgebildet, die sich von den beiden anderen Systemen abhebt und Übertragungspotenzial bietet. Die **Aeroleichtbeton-Technologie** ist aufgrund der Fokussierung auf eine irreversible Fügung hinsichtlich einer Rückbaubarkeit im Prototypbau am wenigsten weit entwickelt. Hier besteht wie im Forschungsbericht bereits ausgewiesen weiterer Entwicklungsbedarf. Eine Stärke wird darin gesehen, zusätzliche Komponenten oder auch Schalelemente in den Fertigungsprozess zu integrieren, um eine Trockenfügung zu ermöglichen. Diese Potenziale sollten weiter ausgearbeitet werden, um eine Bauteilwiederverwendung zu ermöglichen.

Kriteriengruppe Fertigungstechnologie (Abb.88):

Nachhaltigkeitsfaktor		Infraleichtbeton	Gradientenbeton	Aeroleichtbeton	Bewertungsmaßstäbe
Fertigung	10. Transport und Regionalität	2 Betonfertigteilwerke	1 Spezialfabrik	3 Produktion auf grüner Wiese	Produktionsstandort in km 1 > 70 km 2 < 20km > 70 km, regional 3 < 5km, vor-Ort
	11. Vorfertigung und Produktivität	1 keine automatisierte Fertigung/Modul	3 Trocken-Naßspritzverfahren	2 Co-Extrusionsanlage im Prototypstatus	Maschinentechologie 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung
	12. Zeit und Prozess	1 nach Tagen	2 nach Stunden	3 Endlosprozess, nach 15 Min.	Ausschalungszeitraum 1 nach Tagen 2 nach Stunden 3 nach Minuten

Abb. 88: Synopse der Kriterien 10-12 mit Schwerpunkt auf die Fertigung. Eigene Darstellung

Abschließend werden die drei Kriterien im Kontext der Fertigung betrachtet. Die Fertigungsanlage des **Aeroleichtbetons** ist so konzipiert, dass durch die mobile, in Container integrierte Anlagentechnik, in nächster Nähe zum Bauplatz gefertigt werden kann. Dazu wären temporär geeignete Flächen anzumieten. Zukünftig könnte auch eine Kooperation mit Betonfertigteilwerken anvisiert werden, die die Anlagentechnik nutzen und so die Logistik und den Transport abwickeln könnten. Die Anlagentechnik zum **Gradientenbeton** ist bisher noch an eine Werksumgebung gebunden. Es wurde im vorangehenden Vergleich eine Transportdistanz von mehr als 70 km angenommen, da die Technologie noch sehr spezifisch und wenig verbreitet ist. Einen wichtigen Faktor zur Nutzbarkeit des **Infraleichtbetons** stellt die Tatsache dar, dass das Material bereits auf dem Markt erhältlich und mit Zulassung im Einzelfall zum Einsatz kommen kann. Zudem befindet sich die DAfStb-Richtlinie zur Regelung der unterschiedlichen ILC-Mischungen in der Ausarbeitung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass zukünftig mehr Betonhersteller diesen Werkstoff in unterschiedlichen Rohdichten anbieten können. Damit minimieren sich auch die Transportwege und der lokale Ressourceneinsatz könnte erhöht werden.

Bei einem Vergleich des Maßes der Automatisierung, ist zu schließen, dass das Spritzverfahren zur Erstellung des **Gradientenbetons** am weitesten erprobt ist. Durch die Kombination der verschiedenen Düsen kann das Material äußerst zielgerichtet lokalisiert werden. Aufgrund des erforderlichen Drucks können jedoch nicht beliebige Mischungen erzeugt werden. Zudem ist die Technologie reinigungsintensiv. Die Anlagentechnik zur Fertigung des **Aeroleichtbetons** bietet ein hohes Maß an Automatisierung. Unterschiedliche Materialmischungen können automatisiert über die Mischmodule eingebracht werden. In der Forschung stand die Anlagentechnik nicht zur Weiterentwicklung zur Verfügung⁵⁷¹, und es besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Dennoch konnte die Aeroleichtbetonmatrix maschinell gefertigt und bemessen werden. Der **Infraleichtbeton** ist aktuell noch nicht an einen automatisierten Prozess gekoppelt, sondern wird als Betonfertigteil nach klassischen

⁵⁷¹ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes konnte die Anlagentechnik im Verlauf der Forschung nicht weiterentwickelt werden. Die Arbeitspakete des Kooperationspartner wurde von der Firma G.tecz Engineering GmbH übernommen.

Schalverfahren erstellt. Dies resultiert in Ausschalzeiten von mehreren Tagen. Der Fertigungsprozess bietet demnach beim Gradientenbeton mit einer Ausschalzeit von Stunden und dem Aeroleichtbeton mit einer Erhärtung nach bereits 15 Minuten erhebliche Vorteile durch die Produktionsgeschwindigkeit. Besonders die Aeroleichtbetontechnologie kann durch den Zeitgewinn eine erhebliche Produktivitätssteigerung bewirken⁵⁷².

Da die Kriterien untereinander und in Abhängigkeit der Bauaufgabe einen unterschiedlichen Einfluss haben, sollte jeweils projektspezifisch die Gewichtung der Kriterien festgelegt werden. Auch wenn es somit nicht zielführend erscheint, eine Gesamtaddition der vergebenen Punkte vorzunehmen, ist es interessant festzustellen, dass die Summe der erreichten Punkte bei jeder Technologie mit einer Gesamtpunktzahl von 20 bis 21 Punkten sehr nah beieinander liegt. Die ausgewogene Punkteverteilung belegt die Annahme, dass zwar jedes System Stärken und Schwächen aufweist (Abb. 89), insgesamt aber die geforderten Aspekte gewinnbringend in Relation gesetzt werden.

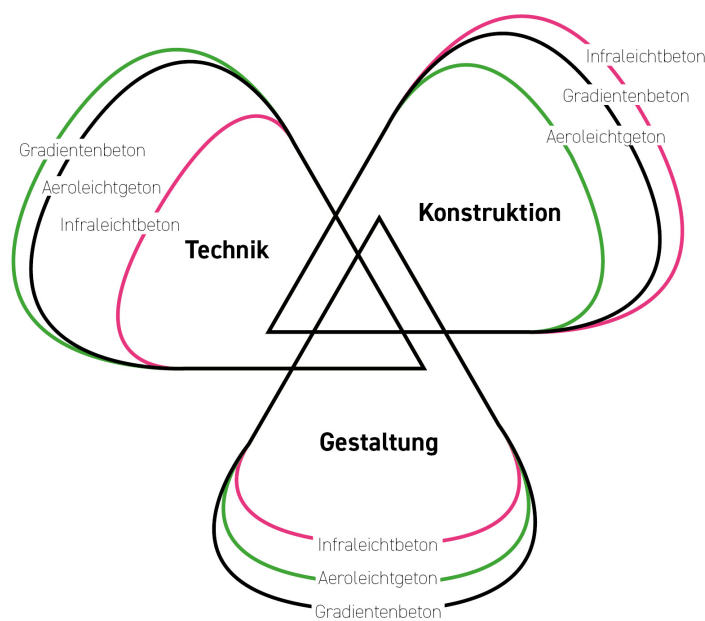


Abb. 89: Überlagerung der Betontechnologien nach Leitfaktoren. Eigene Darstellung

⁵⁷² Diese gesteigerte Produktivität kann nur umgesetzt werden, wenn damit ein der Fertigungsgeschwindigkeit entsprechendes logistisches Konzept verknüpft ist.

4.6 Annahmenkritik

Gewichtung der Kriterien

Die gleiche Gewichtung der sehr unterschiedlichen Kriterien wurde von der Autorin bewusst gewählt, um abzubilden, welche Forschung in welchem Bereich jeweils den Schwerpunkt legt oder bereits weit oder weniger weit entwickelt ist. Grundlegend zeigt sich, dass die Systeme die eingangs aufgestellten Kriterien für Wandsysteme abbilden. Da das gewählte Vorgehen einen großen Spielraum in der Anwendung lässt und damit einen möglichen Anlass zu Kritik bietet, sollte dies in einer anschließenden Forschungstätigkeit weiter ausdifferenziert werden. So bietet sich beispielsweise eine Diskussion im Rahmen einer Expertenkommission der drei Forschergruppen an, um Rückschlüsse zu diskutieren und Erfahrungen auszutauschen. Insbesondere bei der Gewichtung der Kriterien besteht weiterer Entwicklungsbedarf. Entsprechend wären Annahmen, die in einer solchen Kommission zu treffen wären, innerhalb eines notwendigen Aushandlungsprozesses abzusichern und die Vollständigkeit des Kriterien Bilds zu überprüfen. Die Kontakte zu den Forschenden wurden bereits im Vorfeld durch die Autorin initiiert und könnten in diesem Sinne intensiviert werden.

Ganzheitliche Bilanzierung

Die vorgeschaltete detaillierte Betrachtung zeigt, dass sich die Systeme in ihrer Wandstärke und Festigkeit und dem Einsatz von Bewehrung und Ressourcen unterscheiden. Eine vollumfängliche Bilanzierung aller Parameter ist im Umfang der Dissertation nicht gegeben und wird für die grundsätzliche Zielsetzung nicht als erforderlich betrachtet, wird jedoch als notwendig für eine vertiefende Forschungsleistung anvisiert. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich Materialverbrauch, Produktion und Transport, konnte durch die Forschung des Infraleichtbetons, aber auch der Aeroleichtbetontechnologie innerhalb der Bilanzierung bestätigt werden, dass sich die CO₂-Bilanz im Vergleich zu anderen Wandkonstruktionen erheblich verbessert. Die nachstehende **Abbildung 90** veranschaulicht beispielsweise, dass die Aeroleichtbetonwand im Vergleich zu alternativen Wandkonstruktionen eine geringere Umweltbelastung aufweist.⁵⁷³

⁵⁷³ Betrachtet man den abiotischen Verbrauch an fossilen Brennstoffen, der auf die Ressourcenschonung hinweist, so liegen die Werte für die Aeroleichtbetonmischung mit 223 MJ am niedrigsten im Vergleich mit den betrachteten Wandaufbauten.

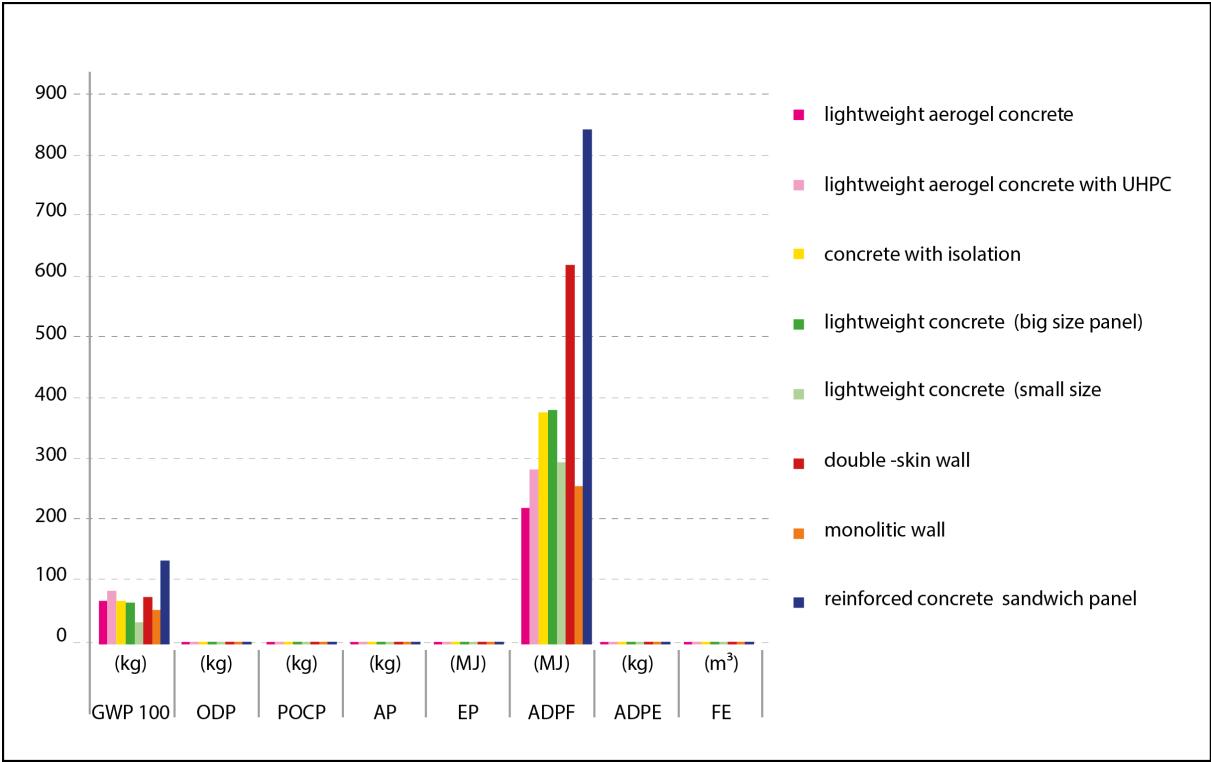


Abb. 90: Ökobilanzierung von Wandbauteilen im Vergleich im Rahmen der Aeroleichtbetonforschung
© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)

Die Ergebnisse der Dissertation stützen sich auf Bilanzierungsergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts zum Aeroleichtbeton sowie die veröffentlichten Forschungsergebnisse der verglichenen Technologien. Als weiterführender Forschungsschritt, und um eine bessere Vergleichbarkeit der Bilanzierungsergebnisse der drei Betontechnologien zu erhalten, wäre es wünschenswert, die Bilanzierungsmethodik zum Forschungsprojekt Aeroleichtbeton um die Bilanzierungsergebnisse des Infraleichtbetons und des Gradientenbetons zu erweitern. Im Rahmen der Dissertation konnte diese Leistung nicht erbracht werden, sie wird jedoch als weiterer notwendiger Forschungsschritt betrachtet.

Zum einen würde dadurch eine tatsächliche Vergleichbarkeit der Bilanzierungsergebnisse geschaffen, zum anderen könnten anhand dieser Ergebnisse direkte Rückschlüsse zu Materialtechnologie, Konstruktion und Fertigung erfolgen. Auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die bei der Forschung zum Gradientenbeton bereits vorliegt, würde die Vergleichbarkeit der Systeme erhöhen. Durch den übergeordneten Vergleich der Systeme werden nun Punkte offengelegt, die in der jeweiligen Forschung getestet oder optimiert werden könnten. Durch einen übergeordneten, interdisziplinären Austausch würde in einer Expertenkommission eine extreme Sensibilisierung für die einzelnen Faktoren der Verbesserung der Nachhaltigkeit geschaffen werden können.

Die unter Kapitel (→3.1.4 **Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse**) dargestellten theoretischen Potenziale zur Verbesserung der Nachhaltigkeit durch zirkuläre Bindung der neuartigen Schnittstellen entsprechend des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität wurden aufgezeigt. Eine Berechnung von CO₂-Äquivalenten aus den sich ergebenden Vorteilen ist aktuell nicht möglich, stellt jedoch einen wesentlichen weiteren Forschungsbedarf dar. Ein erster Schritt wäre es, die dargestellten Bausteine im Sinne der pyramidalen Zirkularität anhand der Synopse der drei Betontechnologien in dieser Hinsicht an realen Projekten zu ermitteln und zu vervollständigen.

Im anschließenden Kapitel wird ein weiterer Aspekt, nämlich der Zusammenhang aus Flexibilität, konstruktiver Masse und Lebensdauer, als weiteres Potenzial von Betonkonstruktionen bei der Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung vertieft.

