

# STAHLBETONLEICHTBAUDECKEN – VON DER FORSCHUNG IN DIE PRAXIS

## CONCRETE LIGHTWEIGHT CEILINGS – FROM RESEARCH TO PRACTICE

Christoph Holzinger (Engelsmann Peters GmbH),  
Georg Hansemann, Andreas Trummer & Stefan Peters (TU Graz)

### KEYWORDS

Beton-3D-Druck; additive Fertigung; Großversuch; Schalungsdruck; Hybridbauteile.

### KURZFASSUNG

Ausgehend von der Notwendigkeit der Reduktion der durch das Bauwesen verursachten Emissionen behandelt dieser Beitrag die *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* als Konzept zur Reduktion von eingesetzten Materialien im Massivbau. Als additives Fertigungsverfahren kommt dabei der Beton-3D-Druck zur Anwendung, der es ermöglicht, Schalelemente herzustellen, die als verlorene Schalung in die Stahlbetonbauteile eingebracht werden und damit den Materialverbrauch minimieren. Die präsentierten Ergebnisse unterschiedlicher Großversuche zeigen, wie eine normgemäße Anwendung der Bauweise gelingen kann. Schließlich wird die Praxistauglichkeit der *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* anhand von drei bereits umgesetzten Projekten belegt.

### ABSTRACT

Based on the necessity to reduce the emissions caused by the construction industry, this article discusses the *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* as a concept for reducing the uti-

lisation of materials in concrete construction. Additive manufacturing with concrete (3-D concrete printing) is used to produce formwork elements which are inserted into the reinforced concrete structure as lost formwork, thereby minimising material consumption. The results of various large-scale tests presented below demonstrate how a standardised application of the construction method can be achieved. Finally, three projects that have already been realized prove the method's practical application and feasibility in the construction industry.

### 1. EINLEITUNG

Kassetten- und Rippendecken sowie generell filigrane Stahlbetonelemente, wie sie von Ingenieuren wie *Pier Luigi Nervi* oder *Aldo Favini* und Architekten wie *Angelo Mangiarotti* in den 1960er- und 1970er-Jahren geplant wurden, waren nicht nur technische Innovationen hinsichtlich einer effizienten Ressourcennutzung, sondern gleichzeitig weithin sichtbare Konstruktionselemente hoher gestalterischer Qualität. Bis heute verstecken sich unzählige materialsparende Rippenkonstruktionen dieser Zeit von weniger bekannten Konstrukteuren und Ingenieuren hinter abgehängten Decken oder werden bei Revitalisierungen wieder freigelegt. Sie sind stumme, meist ästhetisch hochwertige Zeugen hoher Materialeffizienz.

Die Verschiebung von Kostenanteilen hin zu hohen Lohnkosten und immer noch vergleichsweise niedrigen Materialkosten hat das Erscheinungsbild der Stahlbetonkonstruktionen in den letzten 50 Jahren erkennbar verändert und zu einem höheren Ressourcenverbrauch geführt als technisch eigentlich notwendig.<sup>1</sup> In Zukunft werden Bauweisen, die einen ressourcenoptimierten Einsatz von Materialien in der Baubranche ermöglichen, jedoch wieder relevanter werden. Beton, als meistverwendeter Baustoff weltweit, spielt dabei eine übergeordnete Rolle.

Eine vielversprechende Perspektive, den konventionellen Stahlbetonbau dahingehend zu optimieren, bietet die additive Fertigung. Als innovative Fertigungstechnik entwickelt sich der 3D-Druck mit Beton zu einem Sinnbild für die Digitalisierung der Bauwirtschaft.<sup>2</sup> Ausgehend vom Forschungsprojekt „Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots“ (COEBRO) am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Graz wurde ein konzeptioneller Ansatz zur Herstellung von gewichts- und emissionsreduzierten tragenden Stahlbetonbauteilen entwickelt. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Forschung und praktischen Umsetzung der vergangenen Jahre als *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* zusammengefasst und diskutiert.<sup>3</sup>

## 2. METHODEN

### 2.1. Beton-3D-Druck

Die Vision, Häuser mit einem 3D-Drucker zu errichten, wurde bereits im Jahr 2004 vorgestellt.<sup>4</sup> Maßstabsunabhängig hat sich hierfür, zumindest bislang, ein Extrusionsverfahren für eine mörtelähnliche Masse durchgesetzt. Allerdings wird das Verfahren als „Drucken mit Beton“ und nicht als „Drucken mit Mörtel“ bezeichnet. Betondruckverfahren, die nach dem Binder-Jetting-Verfahren arbeiten, unterscheiden sich grundsätzlich und werden an dieser Stelle nicht weiter erörtert.

Das für die Herstellung von gedruckter Schalung verwendete Verfahren besteht im Wesentlichen aus:

1. der Robotersteuerungseinheit,
2. einer automatischen Mischpumpe,
3. einem Industrieroboter mit zusätzlicher siebter Achse,
4. der Beschleunigerpumpe und
5. dem Druckkopf.

Nach dem Mischen des Druckmaterials wird dieses zur Düse gepumpt. Hier wird ein Beschleuniger in den Beton injiziert und zu einem homogenen Material vermischt. Alle notwendigen Steuerwerte werden dem Hauptrechner zugeführt, der die Informationen an verschiedene Komponenten weitergibt. Der Industrieroboter, die automatische Mischpumpe und die Beschleunigerpumpe (Peristaltik-, Schlauchpumpe) sind miteinander synchronisiert.

1 Peters et al., Gedruckte Schalungen für den Stahlbeton-Leichtbau, Detail 9/2020, 14; Gengnagel et al. (Hrsg.), Towards Radical Regeneration (2022).

2 Hansemann et al., Additive Fabrication of Concrete Elements by Robots: Lightweight Concrete Ceiling, in Burry et al. (Hrsg.), Fabricate 2020, 124.

3 Hansemann et al., Lightweight Reinforced Concrete Slab: 130 Different 3D Printed Voids, CPT Worldwide – Construction Printing Technology 2021, 68; Hansemann et al., Lightweight Reinforced Concrete Slab, in Gengnagel et al. (Hrsg.), Towards Radical Regeneration (2022), 456.

4 Khoshnevis, Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies, Automation in Construction 2004, 5.

Die Materialanforderungen sind hierbei von besonderem Interesse. Das Printmaterial muss nach dem Ablegen formstabil sein und eine ausreichende Frühstandsfestigkeit entwickeln, um das Gewicht der später darauf aufgetragenen Schichten zu tragen. Die Optimierung der rheologischen und physikalischen Eigenschaften des Frischbetons ist für den Druckprozess entscheidend. Der Beton muss hinsichtlich einer guten Pump- und Extrudierbarkeit und eines guten strukturellen Aufbaus, um die Verformungen während des Druckprozesses auf ein Minimum zu beschränken, optimiert werden. Mit dem verwendeten 3D-Betondrucksystem BauMinator der Firma Baunit werden erstmalig Formen aus Beton möglich, an denen herkömmliche Techniken bis dato gescheitert sind. Das System bietet Architekt:innen, Designer:innen, Fertigteiler:innen wie auch Formenbauer:innen und Entwicklungszentren völlig neue Möglichkeiten in der Gestaltung, Entwicklung und Produktionsgeschwindigkeit der Bauteile.

### 2.2. Verlorene Schalung für Deckenkonstruktionen

Bei den strukturgebenden Einbauelementen handelt es sich um dünnwandige, mineralisch basierte Schalungen, die mittels additiver Fertigung hergestellt werden und zur Reduktion des Betonverbrauchs bei Deckenkonstruktionen beitragen. Dabei werden die 3D-gedruckten Aussparungskörper auf der Deckenschalung positioniert und der am Lastabtrag nicht beteiligte Beton an der Deckenunterseite reduziert. Die Halbfertigteile werden in ein Bauteil eingebaut, sind unbewehrt und Teil der Betondeckung. Durchschnittlich wiegen die gedruckten Elemente zwischen 20 kg und 60 kg, je nach Deckenlayout, und orientieren sich mit ihren Außenabmessungen am Palettenmaß von 120 cm x 80 cm (siehe Abbildung 1). Dadurch sind ein gutes Handling auf der Baustelle und ein effektiver Transport der Elemente gegeben. Die Druckzeit pro Aussparungskörper beträgt dabei durchschnittlich sieben Minuten. Die Aussparungskörper werden digital/seriell gefertigt und können in einer Vielzahl von Formen hergestellt werden. Dabei liegt der Fokus auf einer maximalen Gewichtsreduktion, individuellem Design oder einer Kombination aus beiden Eigenschaften.

Für die nachfolgend gezeigten Anwendungen war es zentral, dass die ursprünglich geplante Deckenstärke – in früheren Planungsschritten als konventionelle Flachdecken konzipiert – nicht erhöht werden muss. Das Ziel bestand darin, möglichst effektive Deckenkonstruktionen gleicher Deckenstärke mit signifikant reduziertem Materialverbrauch und damit einhergehenden minimierten Emissionen zu entwickeln.

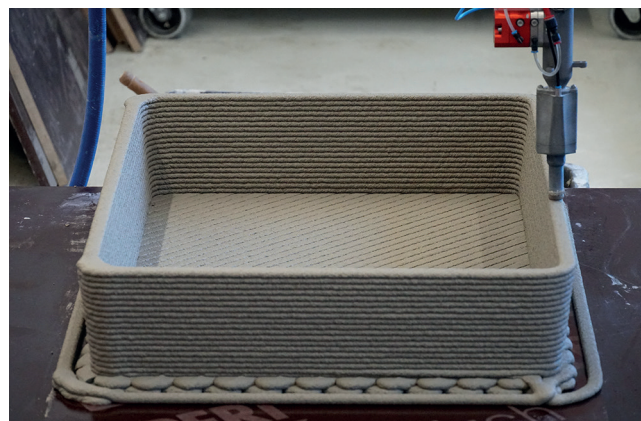


Abbildung 1: Aussparungskörper im Druckprozess; © ITE, TU Graz



Abbildung 2: Großversuch SLS und ULS zweiachsig; rechts: Großversuch SLS und ULS einachsig; © ITE, TU Graz

### 3. BAUTEILPRÜFUNGEN

Für die Verwendung 3D-gedruckter Schalungen oder Aussparungskörper aus Printbeton existiert noch kein Normenwerk, das auf die Anforderungen der hier beschriebenen Bauweise zugeschnitten ist. Um das Konzept einer verlorenen Schalung aus Printbeton in tragenden Bauteilen in realen Projekten anwenden zu können, muss ein gesamtheitliches Konzept entwickelt werden, das basierend auf bestehendem anwendbaren Regelwerk in Kombination mit zusätzlichen Bauteilprüfungen und Untersuchungen ein ausreichend hohes Sicherheitsniveau garantiert und die Zielsetzungen hinsichtlich Qualitätsansprüchen erfüllt. Bei der Umsetzung eines solchen Konzepts kann der Normentwurf EN ISO/ASTM 52939 (Additive Fertigung für das Bauwesen – Grundsätze der Qualifikation – Struktur- und Infrastrukturelemente) herangezogen werden.<sup>5</sup> Dieser soll zur Standardisierung des 3D-gedruckten Elements beitragen, gibt jedoch keine Informationen über die in dieser Studie verwendeten Hybridbauteile.

Für die Berechnung und Bemessung der Tragwerke wird die EN 1992-1-1 (Bemessung von Konstruktion von Hoch- und Ingenieurbauten aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton)<sup>6</sup> als Basis herangezogen. Dabei wird nur der Nettoquerschnitt (Ortbetonquerschnitt) für die Berechnung herangezogen. Der Printbeton soll hier nur als Betondeckung fungieren, das zusätzliche Eigengewicht wird als Ausbaulast berücksichtigt. Dieser Ansatz wird, wie nachfolgend beschrieben, im Zuge von Großversuchen verifiziert. Weitere Leistungsmerkmale tragender Bauteile wie Brandschutz, Schallschutz oder die Widerstandsfähigkeit der Betondeckung werden anhand von Bauteilversuchen im Originalmaßstab quantifiziert.

#### 3.1. Großversuch Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Aufgrund der Besonderheiten der Bauweise und um die Hypothesen hinsichtlich des Bemessungskonzepts zu verifizieren, wurden am Labor für konstruktiven Ingenieurbau der TU Graz unter der Leitung von Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. *Bernhard Freytag* zwei zerstörende Großversuche durchgeführt. Vorrangiges Ziel dieser Versuche war die Überprüfung

der Einhaltung aller relevanten Kriterien des Grenzzustands der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Zu diesem Zweck wurden zwei Probekörper im Originalmaßstab hergestellt und, wie in Abbildung 2 ersichtlich, je einer einachsigen und einer zweiachsigen Biegeprüfung unterzogen. Beide Versuche wurden nach dem Prinzip der Vier-Punkt-Biegeprüfung durchgeführt. Neben den aufgebrachtten Lasten und der zugehörigen Verformung wurde auch die Rissentwicklung schrittweise dokumentiert und die Dehnung an den signifikanten Stellen aufgezeichnet.

Die Versuche wurden wie folgt unterteilt: In einem ersten Schritt wurde der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit analysiert. Durch eine kontinuierliche Laststeigerung bis zum Erreichen der charakteristischen, äquivalenten Last konnten die Rissbildung und die Verformung exakt beobachtet werden. Die maximal zulässige Rissbreite im hybriden Baukörper wurde entsprechend den Anforderungen der EN 1992-1-1 eingehalten. Die Risse waren am Übergang von Verguss- zu Printbereich durchgängig und lassen auf monolithisches Verhalten schließen. Danach wurde die aufgebrachte Last bis zur festgelegten ULS-Last gesteigert und damit bewiesen, dass die Tragfähigkeit der Konstruktion sichergestellt ist. Die rechnerische Traglast wurde in weiterer Folge weit überschritten, ohne dass es dabei zu einem Bauteilversagen kam. Dieses Ergebnis lässt auf ausreichend große Traglastreserven schließen und ermöglicht ausreichend Spielraum für Optimierung.

Um den Verbund zwischen Verguss- und Printbeton sicherzustellen, wurden die Probekörper nach Überschreiten der ULS-Last bis zum Erreichen der Kapazitätsgrenze der Prüf-analage weiter belastet, um eine möglichst große Verformung aufzubringen. Selbst in diesem extremen Szenario konnte keine Delamination zwischen Print- und Vergussbeton beobachtet werden. Dieses augenscheinlich monolithische Verhalten von Print- und Vergussbeton wurde in weiterer Folge mittels Haftzugprüfungen verifiziert.<sup>7</sup> Auch hier trat das Versagen stets im Vergussbeton auf, was darauf hinweist, dass die Haftverbundfestigkeit über der Zugfestigkeit des Vergussbetons liegt. Somit kann von einem monolithischen Verhalten des Hybridbauteils mit vorhersehbarem Verhalten ausgegangen werden.<sup>8</sup>

<sup>5</sup> ISO/ASTM International, ISO/ASTM 52939:2023: Additive manufacturing for construction – Qualification principles – Structural and infrastructure elements (Dezember 2023).

<sup>6</sup> Austrian Standards, ÖNORM B 1992-1-1: 2018-01: Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken (Ausgabe am 1.1.2018).

<sup>7</sup> Steinmetz, Großversuch im Maßstab 1:1: Haftverbundprüfung im Rahmen von Großversuch (2022).

<sup>8</sup> Freytag/Steinmetz, Printbetondecke Nördlingen: Großversuch im Maßstab 1:1 (2022); Freytag/Sliskovic, COEBRO Großversuch – Prüfbericht (2019).

#### Kassettendecke ohne Aufbauten

Bewertetes Schalldämmmaß	RW = 57 dB
Bewerteter Normtrittschallpegel	Ln,W = 77 dB

#### Kassettendecke mit Doppelboden

Bewertetes Schalldämmmaß	RW = 57 dB
Bewerteter Normtrittschallpegel	Ln,W = 77 dB

#### Kassettendecke mit Fußbodenaufbau (verbessert)

Bewertetes Schalldämmmaß	RW = 57 dB
Bewerteter Normtrittschallpegel	Ln,W = 77 dB



Abbildung 4: Am Schallprüfstand eingebaute Probekörper mit ausgewerteten Ergebnissen; © ITE, TU Graz

### 3.2. Brandversuch

Um das Verhalten der Hybridbauteile im Brandfall zu untersuchen, wurden zwei Brandversuche an unterschiedlichen Probekörpern durchgeführt – einmal unbelastet und einmal unter Abbildung einer äquivalenten Flächenlast (siehe Abbildung 3), wie sie z.B. in einem Bürogebäude zu erwarten ist. Auch in diesem Fall wurde ein Hauptaugenmerk auf die Beständigkeit der Vergussfuge gelegt. Die Versuche wurden nach den gültigen Normen EN 1363-1:2020 und ÖNORM EN 1365-2:2014 (Versuch unter Last) sowie EN 1364-2 [14] in Verbindung mit EN1363-1 (nichttragende Bauteile) durchgeführt.<sup>9</sup>

Bei beiden Versuchen konnte bei einer Gesamtdeckenstärke von 30 cm und einer minimalen Rippenbreite von 12 cm (Vergussbereich) sowie einer Deckplattendicke von 10 cm eine Brandwiderstandsdauer von RE 120 und REI 90 bescheinigt werden. Die für Brandversuche typischen Abplatzungen im Bereich der Betondeckung bzw. im Bereich der gedruckten Aussparungskörper liegen dabei im zu erwartenden und normgemäßen Bereich.<sup>10</sup>

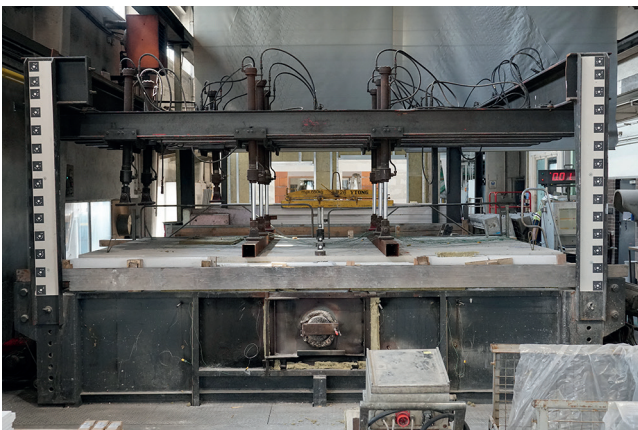


Abbildung 3: Versuchsaufbau Brandversuch unter Last; © ITE, TU Graz

<sup>9</sup> Austrian Standards, ÖNORM EN 1363-1: 2020 04 15: Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (Ausgabe am 15.4.2020); ÖNORM EN 1365-2: 2014 12 15: Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 2: Decken und Dächer (Ausgabe am 15.12.2014); ÖNORM EN 1364-2: 2018 03 01: Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile – Teil 2: Unterdecken (Ausgabe am 1.3.2018).

<sup>10</sup> Danzinger/Werner/Pommer, Prüfbericht über den Feuerwiderstand eines Probekörpers aus Beton mit 3D gedruckten Aussparungskörpern aus Mörtel und Normalbeton (2022); Stöckl, Prüfbericht – Tragende, raumabschließende und wärmedämmende Betondecke mit 3D-gedruckten Aussparungselementen (2023).

### 3.3. Schalltest

Die konzipierten Strukturen, Dächer und Decken sind nach OIB-Richtlinie 5 so auszulegen, dass für normal empfindende Menschen ausreichender Schutz vor Schallimmissionen von außen und aus anderen Nutzungseinheiten besteht. Am Institut für Bauphysik der TU Graz wurden in einem Großversuch das bewertete Schalldämmmaß (Luftschalldämmung), der bewertete Normtrittschallpegel (Trittschalldämmung) und die Resonanzfrequenzen verschiedener Aufbauten ermittelt (siehe Abbildung 4). Während die Anforderungen an die Luftschalldämmwirkung in allen überprüften Konstellationen erreicht werden konnten ( $D_{nT,w} \geq 50/55$  dB), wurden die Grenzwerte für das Trittschalldämmmaß nur in Kombination mit einem geeigneten, aber konventionellen Fußbodenaufbau erreicht ( $L'_{nT,w} \leq 48$  dB).

### 3.4. Karbonatisierung

Die Bewertung des Schichtkontakts an Printprismen wurde über die Prüfung des Karbonatisierungswiderstands nach ÖNORM EN 12390-12: 2020 03 01 durchgeführt.<sup>11</sup> Ist der zeitliche Druckabstand zwischen zwei Schichten zu groß, entsteht zwischen ihnen eine Kontakt- bzw. Übergangszone und damit eine potenzielle Schwachstelle, wie sie aus der Literatur bzw. früheren Studien und Versuchen bekannt ist (siehe Abbildung 5). Es wird untersucht, ob sich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ändert, wenn der zeitliche Abstand zwischen dem Überdrücken von Schichten bis zu zehn Minuten beträgt. Die Prüfung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit erfolgt angelehnt an das genormte beschleunigte Verfahren nach ÖN EN 12390-12. Der Schichtkontakt wird bewertet, indem Karbonisierungstiefen verglichen werden. Für die Berechnung des Karbonatisierungswiderstands ist eine lineare Regressionsanalyse der gemessenen Karbonisierungstiefen erforderlich. Aus den Prüfungsergebnissen kann die Erkenntnis abgeleitet werden, dass mit zunehmender Beschleunigerdosierung die Karbonatisierungsgeschwindigkeit zunimmt.<sup>12</sup> Welches Verhältnis zwischen Beschleunigerdosierung und Karbonatisierungsgeschwindigkeit besteht, kann in systematischen Reihen mit

<sup>11</sup> Austrian Standards, ÖNORM EN 12390-12: 2020 03 01: Prüfung von Festbeton - Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren (Ausgabe am 1.3.2020).

<sup>12</sup> Vgl. dazu auch Sakoparnig et al., Durability of clinker reduced shotcrete: Ca2+ leaching, sintering, carbonation and chloride penetration, Materials and Structures 2/2021.

mehreren verschiedenen Dosierungen in weiterführenden Versuchen ermittelt werden.

Des Weiteren konnte kein relevanter Unterschied für die Karbonisierungstiefe zwischen den Druckschichten für die gewählten Zeitintervalle von 15 Sekunden bis zehn Minuten festgestellt werden. Der Verbund zwischen den Schichten kann bei den drei untersuchten Zeitabständen als gleichwertig eingestuft werden.

Auch diese Untersuchung lässt erkennen, dass die Fuge zwischen Druckmaterial und Vergussbeton die für die Bewertung maßgebliche Stelle des Bauteils ist. Tritt kein Riss oder Spalt zwischen diesen Schichten auf, sodass keine Luft in den Spalt eindringen kann, darf der Nettoquerschnitt des Printmaterials als Betondeckung angesetzt werden. Das Kriterium der Rissfreiheit zwischen den Schichten wurde im Rahmen von Haftzugprüfungen, bei denen eben dieser Verbund getestet wurde, sichergestellt. Festzuhalten ist an dieser Stelle, dass vorgeschriebene Verarbeitungsrichtlinien und Qualitätsstandards bei der Herstellung der gedruckten Aussparungskörper sowie bei der passenden Materialwahl des Vergussbetons und der zugehörigen Betonage und Nachbehandlung eingehalten werden müssen.



Abbildung 5: Probekörper Karbonisierungstests; © ITE, TU Graz

#### 4. PROOF OF CONCEPT

Um seine Praxistauglichkeit zu prüfen sowie Stärken und Schwächen zu eruieren, kam das erdachte Konstruktionsprinzip in realen Aufgabenstellungen zur Anwendung. Gleichzeitig wurden aus den nachfolgend beschriebenen Projekten neue Forschungsfragen und Optimierungspotenziale abge-



Abbildung 6: Eingebraachte Aussparungskörper mit konventionell verlegter Bewehrung; Atelier Kupelwieser (Lunz am See); © ITE, TU Graz

leitet, die in weiterer Folge bearbeitet wurden. So konnten die gewonnenen Informationen in Nachfolgeprojekte einfließen und wurde die Qualität sowie Umsetzbarkeit Schritt für Schritt verbessert. Im Folgenden werden drei der umgesetzten Projekte beschrieben, die sich in Größenordnung, Tragwirkung und Design unterscheiden. Jedes von ihnen hielt besondere Herausforderungen bereit.

#### 4.1. Schloss Seehof in Lunz am See

Der österreichische Bildhauer, Grafiker, Fotograf und Medienkünstler *Hans Kupelwieser* gab im Jahr 2020 eine Erweiterung des Schlosses Seehof in Lunz am See in Auftrag. Der Anbau am unteren Teil des Ostflügels umfasste einen 100 m<sup>2</sup> großen Raum in Mauerwerksbauweise, der als Atelier dienen sollte. Die nahezu quadratische, zweiachsig spannende zugehörige Stahlbetondecke wurde als Rippendecke mit 3D-gedruckten Aussparungskörpern umgesetzt. Der Entwurf wurde vom ITE in Zusammenarbeit mit Kupelwieser entwickelt und bringt Design sowie strukturelle Optimierung in Einklang, um die genannten Ziele zu erreichen.

Für das Projekt wurden 130 verschiedene Aussparungskörper mit dem 3D-Betondrucksystem von Baumit im Robot Design Lab der TU Graz hergestellt. Als einzeln vorgefertigte Elemente dienen sie als verlorene Schalung. Sie sind unbewehrt und übernehmen keine statischen Funktionen, der Printquerschnitt wird wie beschrieben der Betondeckung zugerechnet. Die Elemente wiegen zwischen 4 und 90 kg, erreichen Abmessungen zwischen 20 cm × 15 cm × 25 cm (l/b/h) und 125 cm × 105 cm × 45 cm (l/b/h), während die Oberlichtelemente eine Höhe von bis zu 70 cm erreichen (siehe Abbildung 6). Das gesamte Dach wurde im Gefälle hergestellt, das heißt, dass die Aussparungskörper nicht nur unterschiedliche Grundrissformen aufweisen, sondern auch unterschiedlich hoch gefertigt wurden. Die gewählte Gefällrichtung für die Entwässerung begünstigt das Verhältnis der Balkenhöhen zu den jeweiligen Spannweiten, sodass die Bewehrungstonnage im Vergleich zu einer entsprechenden monolithischen Platte um 20 % reduziert werden konnte (siehe Abbildung 7). Bei diesem Vergleich erzielte die neue Bauweise auch eine Betoneinsparung von 25 %.

Bei der Ökobilanzierung muss jedoch berücksichtigt werden, dass der für die Hohlräume verwendete Druckbeton aufgrund seines hohen Zementanteils einen wesentlich höheren CO<sub>2eq</sub> aufweist als der für die Tragkonstruktion verwendete Normalbeton. Die Materialeinsparung entspricht daher nicht der CO<sub>2</sub>-Einsparung, die in diesem Fall ca. 25% beträgt.



Abbildung 7: Untersicht nach Betonage; Atelier Kupelwieser (Lunz am See); © ITE, TU Graz

## 4.2. Tiefgaragendecke Nördlingen

Während beim Projekt in Lunz am See die Planung, Koordination und Fertigung der Aussparungskörper sowie die Ausführung vor Ort von Mitarbeitern des ITE im Rahmen eines Forschungsprojekts durchgeführt wurde, gelang mit dem optimierten Dach einer Tiefgaragendecke eines Neubauprojekts in Nördlingen, Deutschland, auch die Implementierung in der Baupraxis. Die gewichtsreduzierte Stahlbetondecke – konzipiert als ein 168 m<sup>2</sup> großes, einachsig spannendes Deckenfeld – wurde in Zusammenarbeit mit der ausführenden Firma EIGNER Bauunternehmung GmbH umgesetzt. Die Aussparungskörpergeometrie wurde hinsichtlich der Tragwirkung des Dachs angepasst und eine gänzlich neue Printstrategie entwickelt, um die segmentierten, kanuförmigen Aussparungskörper herzustellen.

Das Dach besteht aus 168 gedruckten Betonsegmenten, die bauseits zu 48 länglichen Aussparungskörpern zusammengesetzt wurden. Für das Vergussmaterial wurde eine zementreduzierte Betonrezeptur gewählt, die zusammen mit der Materialersparnis durch den 3D-Druck zu einer Reduktion der Emissionen um 35 % CO<sub>2eq</sub> führte. Während das ITE für Design, Geometrieentwicklung, statisch-konstruktive Bearbeitung, Koordination und Beratung verantwortlich war, wurden die Aussparungskörper bei Eigner Bau gedruckt und die Bauausführung den Industriepartnern überlassen. Durch diese Zusammenarbeit und die langjährige Erfahrung der ausführenden Firma konnten viele praxisrelevante Erfahrungen sowie weitere Forschungsdaten gesammelt werden. Im Vergleich zum Projekt in Lunz am See konnten hier vor allem in den Bereichen Bewehrungsplanung und Baustellenlogistik neue Ansätze getestet und zur Umsetzung gebracht werden. Das Projekt wurde mit dem Architekturpreis Beton 2023 ausgezeichnet (siehe Abbildung 8).



Abbildung 8: Untersicht Decke über Tiefgaragenabfahrt (Nördlingen, Deutschland); © Studio Herzig/EIGNER Bauunternehmung

## 4.3. WERIT Bauhof in Bludenz

Das bisher umfangreichste in *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* umgesetzte Projekt und die weltweit größte Konstruktion dieser Art ist das Dach des WERIT Bauhofs in Bludenz. Das ITE war auch bei diesem Projekt für den Tragwerksentwurf und die Konzeption des Dachs verantwortlich. In Zusammenarbeit mit Tomaselli Gabriel Bau (Bauausführung), Concrete 3D (3D-Druck Aussparungskörper) und gbd ZT (Tragwerksplanung Gesamtstruktur) konnte das 700 m<sup>2</sup> große Dach umgesetzt werden (siehe Abbildung 9). Die Größe

des Projekts, das heißt die Herstellung und der Transport der 792 unterschiedlichen Aussparungskörper, war vor allem durch den Termindruck – ein inhärentes Merkmal der Bauwirtschaft – eine Herausforderung. Laut Auskunft der Baufirma konnte der Mehraufwand, der durch die komplexe Logistik, den 3D-Druck und das Handling auf der Baustelle entstand, durch die Materialersparnis und die erweiterten statischen Möglichkeiten kompensiert werden.



Abbildung 9: Untersicht WERIT Bauhof in Bludenz; © Janosch Schallert-Native Media GmbH/Concrete 3D GmbH

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die im Rahmen dieser Studie entwickelten, weitgespannten Deckenkonstruktionen stehen stellvertretend für eine zukunftsfähige Haltung zur Verwendung von Stahlbeton, die unter anderem auf wirtschaftliche und digitale Fertigungsmethoden zur Ressourcenschonung setzt. Anhand von Großversuchen und Realprojekten wurde die Robustheit und Praxistauglichkeit der *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* überprüft und bestätigt. Neben der Umsetzung weiterer Projekte arbeiten die Autoren unter anderem an der Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens. In einem ersten Pilotprojekt konnte bereits die Umsetzbarkeit von Stützenschalung und Wandschalungen untersucht werden (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Forschungspavillon Baunit Campus in Wopfing, Niederösterreich; © ITE, TU Graz

Weiterführende Fragestellungen, die derzeit im Fokus verschiedener Forschungsprojekte stehen, widmen sich der Bewehrbarkeit und Fügung der Bauteile. Die *Grazer Stahlbetonleichtbauweise* soll zukünftig auch bei Bauwerksgründungen von Hochbauten zur Anwendung kommen, jenem Bereich, in dem neben Decken die größten Betonmengen verbaut werden und der großes Potenzial hinsichtlich Ressourcenoptimierung in sich birgt.

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich beim gesamten COEBRO und 3D3B-Projektteam der TU Graz, bei der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) für die Projektförderung sowie bei der Baunit GmbH für die Unterstützung und die langjährige Partnerschaft. Die gesammelten Projektergebnisse werden in der Dissertation „COEBRO – Ceilings“ von Dipl.-Ing. *Georg Hansemann* an der TU Graz veröffentlicht.

## AUTOREN

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Christoph Holzinger**

Engelsmann Peters GmbH

Wielandgasse 56

8010 Graz

christoph.holzinger@engelsmannpeters.at

Dipl.-Ing. **Georg Hansemann**

Institut für Tragwerksentwurf

TU Graz

Technikerstraße 4/IV

8010 Graz

georg.hansemann@tugraz.at

Assoz.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. **Andreas Trummer**

Institut für Tragwerksentwurf

TU Graz

Technikerstraße 4/IV

8010 Graz

andreas.trummer@tugraz.at

Univ.-Prof. Dr.-Ing. **Stefan Peters**

Institut für Tragwerksentwurf

TU Graz

Technikerstraße 4/IV

8010 Graz

stefan.peters@tugraz.at

