

Nachhaltiges Bauen durch die Modularisierung von Skelettbauten

Agemar Manny und Frank Dehn

Zusammenfassung

Die Modularisierung von Tragwerken mit einer Verwendung einheitlicher Tragelemente und daraus zusammengesetzter Bauteile in Kombination mit lösbarren Verbindungen sowie Vorspannung ohne Verbund stellt eine Alternative zur monolithischen Bauweise dar. Durch die Verwendung einheitlicher Tragelemente, die mittels Serienfertigung hergestellt werden können, soll der beschädigungsfreie Rückbau von Tragwerken und eine Wiederverwendung der einzelnen Tragelemente sichergestellt werden. In diesem Beitrag erfolgt eine Betrachtung ausgewählter Hallenbauten in Stahlbetonskelettbauweise mit einer beispielhaften Modularisierung der Stützen. Anschließend wird eine parametrisierte Bemessung zur Festlegung der Querschnittsabmessungen der Tragelemente entsprechend einer Baukastenoptimierung durchgeführt und die erarbeitete Schnittstelle bzw. Verbindung an den Enden der stabförmigen Tragelemente vorgestellt. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgt durch den Vergleich der vorgestellten modularen Bauweise mit der monolithischen Bauweise; es wird eine Betrachtung der Indikatoren „globales Erwärmungspotenzial“, „nicht erneuerbare Primärenergie“ und „erneuerbare Primärenergie“ auf der Werkstoffebene vorgenommen. Hierbei erfolgt eine Analyse der Werte für die verschiedenen Lebenszyklusphasen der ausgewählten Gebäude bzw. der im Fokus stehenden Gebäudestützen für einen festgelegten Betrachtungszeitraum von 40 Jahren. Der Vergleich zeigt, dass für das gewählte Szenario und die getroffenen Annahmen die modulare Bauweise im Vergleich zur monolithischen Bauweise mit geringeren Emissionen und einem geringeren Primärenergiebedarf verbunden ist. In einer anschließenden Diskussion werden die vorgestellten Ergebnisse kritisch beleuchtet und die Grenzen des Vergleichs aufgezeigt. Der Beitrag endet mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen zum modularen Bauen mit Beton und skizziert einen Weg zur raschen Markteinführung modularer Baukastensysteme.

Schlagwörter: Modulares Bauen, Stahlbetonbau, Skelettbauweise, Baukastenoptimierung, Baukastensysteme, Nachhaltigkeit, Lebenszyklusphasen

Abstract

The modularisation of structures with the use of standardised load-bearing elements and components assembled from them in combination with detachable connections and prestressing without bond represents an alternative to monolithic construction. The use of standardised load-bearing elements, which can be produced in series, is intended to ensure the damage-free deconstruction of load-bearing structures and the reuse of individual load-bearing elements. This article considers selected hall buildings in reinforced concrete skeleton construction with an exemplary modularisation of the columns. A parameterised design is then carried out to determine the cross-sectional dimensions of the load-bearing elements in accordance with a construction kit optimisation and the interface respectively connection developed at the ends of the load-bearing elements is presented. Sustainability is assessed by comparing the modular construction method presented with the monolithic construction method; the indicators 'global warming potential', 'non-renewable primary energy' and 'renewable primary energy' are analysed at the material level. This involves analysing the values for the various life cycle phases of the selected buildings respectively the columns of the buildings for a defined period of 40 years. The comparison shows that for the selected scenario and the assumptions

made, modular construction is characterised by lower emissions and a lower primary energy demand compared to monolithic construction. In a subsequent discussion, the results presented are critically analysed and the limits of the comparison are pointed out. The article ends with conclusions and recommendations for modular construction with concrete and outlines an approach to the market launch of modular construction systems.

Keywords: Modular construction, reinforced concrete construction, skeleton construction, modular optimisation, modular systems, sustainability, life cycle phases

1 Einleitung

Durch die Wahl von Betonen mit regionalen oder rezyklierten Gesteinskörnungen sowie klinkerreduzierten Zementen können bereits heute CO₂-Emissionen und Ressourcen bei der Herstellung von Tragwerken in Ortbeton- oder Fertigteilbauweise eingespart werden [1, 2]. Neben der oftmals fokussiert betrachteten Einsparung von CO₂-Emissionen bei der Herstellung sind die grundsätzliche Nachhaltigkeit sowie die Effizienz einer Bauweise und eines Bauwerks in Bezug auf den Klimaschutz zu beachten, um insbesondere die im Bundes-Klimaschutzgesetz [3] verankerten Reduktionen der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

Für eine nachhaltige Nutzung materieller Ressourcen ist es von wesentlicher Bedeutung, dass eine kontinuierliche Ressourcenentnahme zu einem Verlust der Ressource führt, wenn sie sich nicht auf natürliche Weise regenerieren oder anderweitig zur Verfügung gestellt werden kann. Die Kreislaufwirtschaft verfolgt aus diesem Grund das primäre Ziel, Produkte möglichst lange zu erhalten – insbesondere Produkte aus nicht erneuerbaren Ressourcen – bzw. Abfall zu vermeiden [4]. Das Ende der Lebensdauer eines Bauwerks kann durch eine Vielzahl von Gründen determiniert sein, z. B. durch einen irreversiblen Zustand des Bauwerks aufgrund von Baufälligkeit, Mängeln oder Schadstoffen, wobei meist nur ein Teil des Bauwerks betroffen ist, durch städtebauliche Planung, zunehmend auch durch zeit- und kostenintensive Sanierungs- oder Erhaltungsmaßnahmen und andere wirtschaftliche Aspekte sowie durch Auflagen, Verordnungen oder gesetzliche Pflichten. Der Rückbau von Bauteilen und Bauwerken weist heutzutage meist einen destruktiven Charakter auf. Beim anschließenden Recycling rückgebauter Bauteile muss eine beachtliche Energie eingesetzt werden, um aus ihnen Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Grundsätzlich kann durch das Baustoffrecycling und die Substitution von natürlichen Rohstoffen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen ein Beitrag zur Ressourcenschonung und damit zur Nachhaltigkeit geleistet werden [2]. Neben dem Baustoffrecycling ist zudem auch das Recycling ganzer Bauteile durch die Vermeidung destruktiver Verfahren beim Rückbau denkbar (z. B. [5, 6]). Eine Wiederverwendung von Bauteilen – im besten Fall für denselben Zweck, ohne Einschränkung der Funktion – ist möglichst anzustreben. Die EU-Bauproduktenverordnung schreibt zwar bereits heute vor, dass die Wiederverwendung oder das Recycling von Baustoffen und Bauteilen nach dem Abriss eines Bauwerks sichergestellt werden müssen, jedoch bestehen hierzu keine wesentlichen Vorgaben für die praktische Umsetzung. Bisher findet keine nennenswerte gewerbliche Wiederverwendung von Bauteilen im Stahlbetonbau statt, da maßgeblich die Abmessungen und der Zustand der Bauteile sowie die Anforderungen bei der Errichtung von neuen Bauwerken mit Bauteilen aus dem Bestand eine wirtschaftliche Wiederverwendung der Bauteile ausschließen [7]. Um in Zukunft ganze Bauteile wiederverwenden zu können, ist es daher notwendig, nicht nur den beschädigungsfreien Rückbau bei der Planung eines Neubaus zu beachten, sondern auch den erneuten Einsatz der Bauteile nach der ersten Nutzungsphase mitzudenken. Dieses „Mitdenken“ des erneuten Einsatzes von Bauteilen kann beispielsweise in der „Frühen Phase“ einer sogenannten Systemgenerationsentwicklung berücksichtigt werden, wobei ein sorgfältiges Vorgehen in dieser Phase des Entwicklungsprozesses für den Erfolg eines neuartigen Systems bzw. einer neuen Bauweisen von großer Bedeutung ist [8]. Hier gilt es u. a. die Grenzen des Anwendungsbereichs des Systems bedacht abzustecken. Das Ziel der „Frühen Phase“ ist es, eine valide Bewertung für den Lösungsansatz eines neuen technischen Systems oder eine neue Systemgeneration unter Berücksichtigung einer ausreichenden Anzahl an Merkmalen zu erhalten [8].

Die Auflösung von integralen Gestaltungsformen in Systeme, die sich aus unabhängigen Subsystemen – Modulen – zusammensetzen, wird im Bauwesen als „modulare Bauweise“ bezeichnet [9]. Für den Betonbau bedeutet das, monolithische Tragwerke werden in modulare Tragwerke bestehend aus einzelnen Bauteilen überführt, die meist entsprechend ihrer Funktion verschiedenen Modulen zugeordnet werden. Für die Entwicklung von modularen Konstruktionen bestehen verschiedene Strategien und Methoden (z. B. [10–15]). Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Gebäudeausschnitt mit zwei unterschiedlichen Modularisierungen.

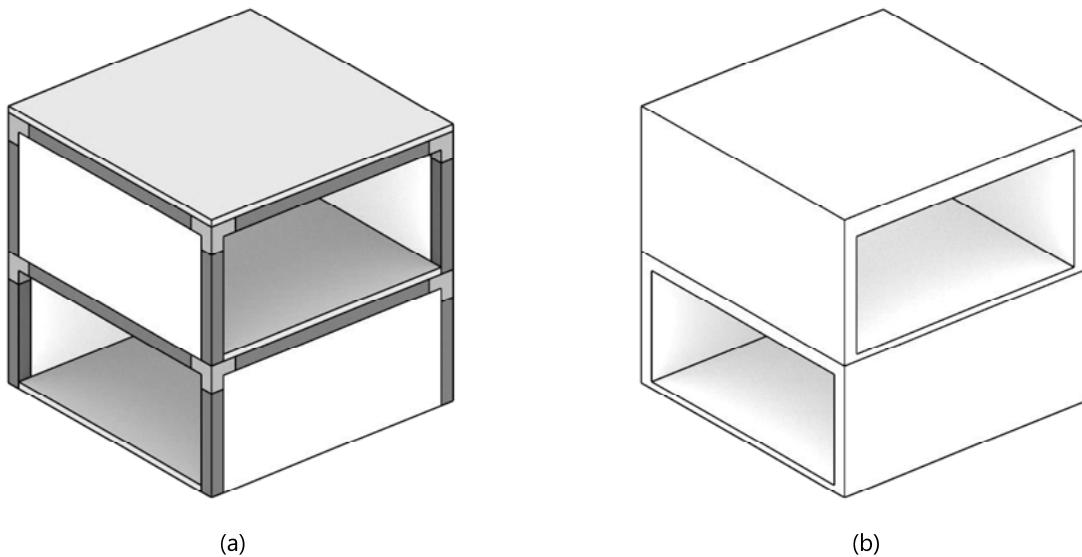


Abb. 1: Beispielhafte Modularisierungen: (a) Linien-, flächen- und knotenförmige Module, (b) volumenförmige (Raum-)Module

Für die Herstellung von modularen Tragwerken eignen sich Fertigteile, wobei ein Verguss der Bauteile möglichst zu vermeiden ist, um die Unabhängigkeit der Module, d. h. der Bauteile mit unterschiedlichen Funktionen, und damit auch die Planung, Optimierung, Herstellung, den Austausch und Rückbau sowie die Wiederverwendung und das Recycling der Module und Bauteile getrennt voneinander sicherzustellen [16]. Der Ausführung der Schnittstellen bzw. Knotenpunkte zwischen den Modulen kommt eine wesentliche Bedeutung zu, da diese Verbindungen einerseits einen Einfluss auf das lokale Tragverhalten haben und andererseits für die Komplexität eines modularen Systems mitverantwortlich sind [9, 16].

Der Literatur, beispielsweise [16, 17], können verschiedene bewährte Lösungen für die Verbindung von Betonfertigteilen entnommen werden. Zudem sind auf dem Markt Produkte mannigfaltigster Art für die Errichtung modularer Betontragwerke verfügbar, wobei ein beschädigungsfreier Rückbau und eine vollständige Wiederverwendung derzeit nur bei äußerst einfachen, behelfsmäßigen Konstruktionen möglich ist (z. B. [18]). Es sind demontable Bauweisen für die Errichtung von nachhaltigen und klimaeffizienten Bauwerken zu erforschen.

Bei der Modularisierung, d. h. dem Prozess der Zerlegung eines Systems in unabhängige Subsysteme, werden meist mehrere Ziele verfolgt. Beispielsweise können eine schnelle Montage vor Ort durch die Verwendung großer Bauteile oder ganzer Raummodule (vgl. Abb. 1), kosten- und zeitgünstige Herstell- und Logistikkonzepte durch die Verwendung leichter, in Serienfertigung hergestellter Einzelbauteile oder möglichst geringe Treibhausgasemissionen während der Herstellphase genannt werden [19]. Oftmals findet bei der Modularisierung eine Mehrzieloptimierung mit der Lösung eines multikriteriellen Problems statt; es sollen mehrere, nicht selten widersprüchliche Ziele bestmöglich erfüllt werden.

2 Konzept einer standardisierten Schnittstelle zwischen stabförmigen Betonbauteilen modularer Tragwerke

Die Skelettbauweise ist durch einen einfachen Aufbau im Grund- und Aufriss bestehend aus lastabtragenden, linien-/stabförmigen Betonbauteilen (Träger und Stützen) gekennzeichnet [20] und findet überwiegend im Hallen- und Geschossbau Anwendung. Die modulare Skelettbauweise ist durch eine Zerlegung monolithischer Rahmen und einer Unterteilung einzelner stabförmiger Bauteile in segmentäre Bauteile geprägt. Die Zerlegung von Tragstrukturen führt zu Diskontinuitäten auf Bauteilebene, wobei mehrere Anforderungen an

diese Diskontinuitäten bestehen [9]. Sogenannte Schnittstellen zwischen tragenden Elementen und Modulen, die zu physischen Verbindungen ausgearbeitet werden müssen, sind zu entwickeln und zu erforschen [9]. Diese Verbindungen müssen vollständig lösbar sein, um den Austausch, den Rückbau und die Wiederverwendung der Betonelemente zu ermöglichen [9]. Um insbesondere die Standsicherheit eines Tragwerks sicherzustellen, sind lösbare formschlüssige Verbindungen (Verzahnungen, Verschraubungen, Passfedern, Beschläge etc.) auch in Kombination mit einer Vorspannung in die Bauteillängsrichtung zu wählen; eine reine kraftschlüssige Verbindung ist meist nicht ausreichend. Abbildung 2 zeigt die konzeptionelle Idee einer Schnittstelle in der Stoßfläche eines stabförmigen Tragelements (kurz: Elements) aus Beton. Durch eine mehrfache Aneinanderreihung von Elementen in die Längsrichtung und eine durchgängige Spanngliedführung entsteht ein vorgespanntes Bauteil.

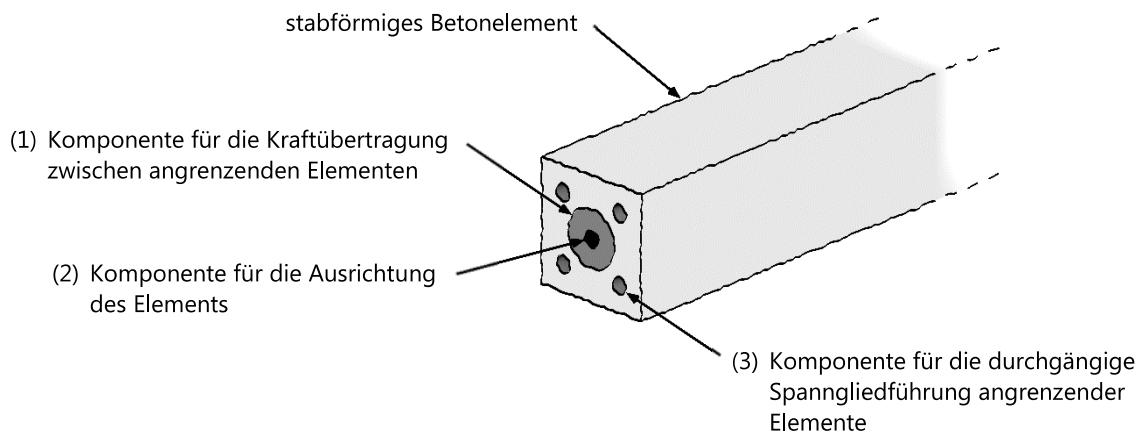


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schnittstelle mit den einzelnen Komponenten für die Verbindung stabförmiger Tragelemente; nach [9]

In vorgenannter Abbildung 2 sind drei wesentliche Anforderungen an eine Schnittstelle zwischen zwei Betonelementen zu erkennen, die im Nachfolgenden als Komponenten bezeichnetet werden: (1) Komponente der Kraftübertragung zwischen angrenzenden Elementen, (2) Komponente der Ausrichtung bzw. Justage des angefügten Elementes und (3) Komponente der durchgängigen/kontinuierlichen Spanngliedführung zwischen angrenzenden Elementen [9]; wobei in der Abbildung 2 beispielhafte Ausprägungen der Komponenten dargestellt sind.

Bei der Querschnittsbemessung wird meist eine möglichst geringe Bewehrungsmaße der einzelnen Stützen oder aller Rahmen nach dem Grundsatz einer wirtschaftlichen Bemessung mit dem Ziel eines möglichst geringen Werkstoffeinsatzes nach den einschlägigen Regelwerken angestrebt. Bei der Festlegung der Querschnittsabmessungen und der Bewehrungsmenge der Betonelemente eines modularen Tragwerks erfolgt keine wirtschaftliche Bemessung und Optimierung im klassischen Sinne. Es erfolgt vielmehr eine Vereinheitlichung der Betonelemente einschließlich der Bewehrungsführung, der Schnittstellen bzw. Verbindungen und der Betongüte mit einer Festschreibung von Parameterwerten für eine begrenzte oder gar unbegrenzte Zeitdauer mit dem Ziel, ein möglichst effizientes Gesamtsystem hervorzubringen [9, 21]. Das Gesamtsystem entspricht dabei nicht einem einzelnen Gebäude, sondern einer Vielzahl an Gebäuden, die mit demselben Baukastensystem, d. h. einer Sammlung unterschiedlicher Bausteine, errichtet werden können [9, 22]. Das Ziel der Baukastenstrategie ist es, die geforderten Varianten eines Gebäudetyps (Logistikhalle, Bürogebäude etc.) mit möglichst wenigen unterschiedlichen Bausteinen abzubilden [10]. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Gesamtsystems mit einer Aufteilung in sechs Betrachtungsebenen. Es erfolgt eine Unterteilung in Module (1.), d. h. Gruppen mit Bauteilen (2.), die gleichen Eigenschaften und Funktionen aufweisen, wobei sich diese Bauteile aus kleineren Tragelementen (3.) zusammensetzen können. Die bewehrten Betontragelemente können in einen Betonkörper und einen Bewehrungsführung aufgeteilt werden und stellen Komponenten (4.) des

Systems dar. Auf der untersten Ebene des Systems, der Baustoffebene (5.), erfolgt eine Unterteilung des Betonkörpers und der Bewehrungsführung entsprechend den Werkstoffen und Ausgangsstoffen. Durch den Einsatz modularer Bestandteile (Regelbestandteile) mit festgelegten und ggf. bereits standardisierten Eigenschaften und Merkmalen entstehen reine modulare Konstruktionen, während bei einer Kombination mit nicht-modularen Bestandteilen (Sonderbestandteile), die bei einzelnen Projekten individuell verwendet werden, Mischkonstruktionen entstehen. [9]

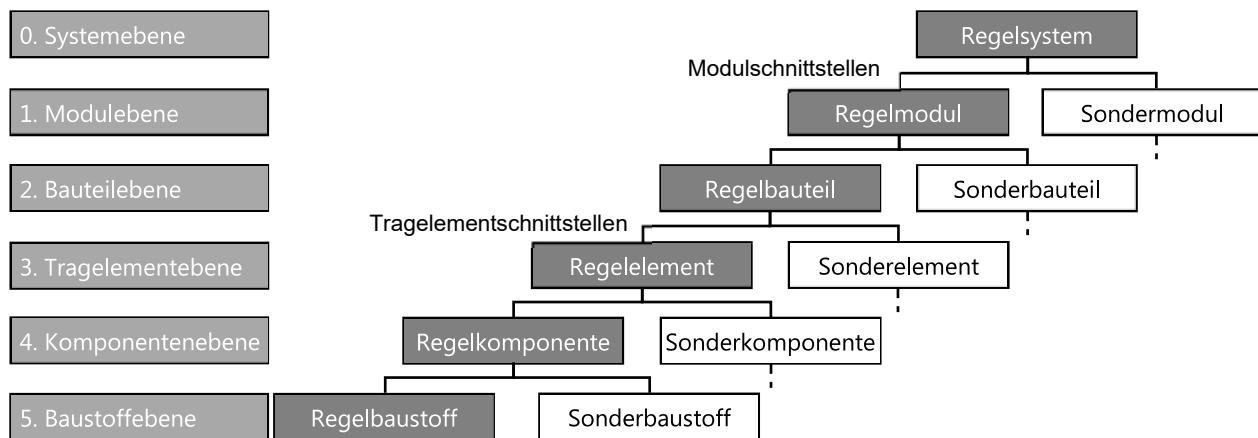


Abb. 3: Unterteilung eines Gesamtsystems gültig für Tragwerke aus Betonbauteilen; nach [9]

In der vorgenannten Abbildung 3 ist erkennbar, dass Schnittstellen bzw. Verbindungen zwischen den Bestandteilen des Systems vorliegen. So sind beispielsweise Tragelementeschnittstelle (vgl. Abb. 2) an den Fügeflächen erforderlich, um die Aneinanderreihung einzelner Tragelemente zu einem Bauteil zu ermöglichen.

Das in Abbildung 3 gezeigte Schema ist überwiegend auf Tragwerke des Hochbaus, bestehend aus stabförmigen druck- und biegebeanspruchten Bauteilen, anwendbar. Scheiben- und plattenartig beanspruchbare Bauteile (Wände, Decken, Dächer) sowie Aussteifungskerne aus Beton stellen eine Herausforderung bei der Entwicklung demontabler Bauweisen dar und sind gesondert zu betrachten.

3 Beispielhafte Modularisierung einer Halle

3.1 Modularisierung und Baukastenoptimierung

Im Rahmen dieses Beitrags werden Hallenbauten ohne Kranbahn betrachtet, die meist in Skelett- und Mischbauweise errichtet werden. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte einschiffige Halle mit einem Satteldachbinder. Die Aussteifung der Halle erfolgt, wie im Hallenbau üblich, durch eingespannte Stützen [23]. Die Stützenhöhe – gemessen von der Oberkante des Fundaments bis zur Unterkante des Binder – beträgt 7,0 m, der Binderabstand 6,0 m und die Spannweite des Binders 25,0 m.

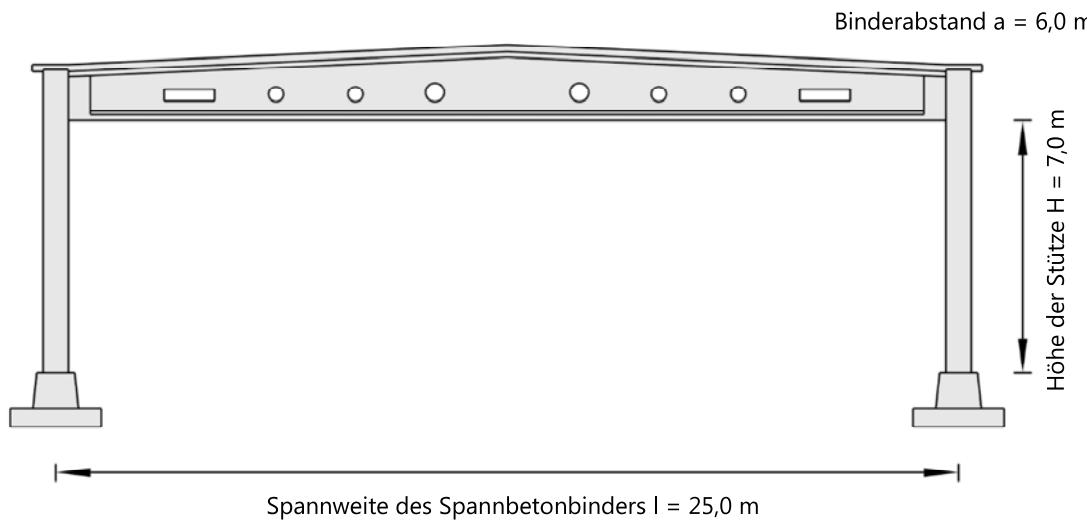


Abb. 4: Beispielhafte einschiffige Halle mit Satteldachbinder

Nach den Tragfähigkeitstabellen der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. (FDB) [23] kann bei einer Dachlast von $2,5 \text{ kN/m}^2$, den in den Tragfähigkeitstabellen zugrunde gelegten Windlasten, den Eigenlasten der Stütze und des Binders sowie den vorgenannten Abmessungen der Halle ein Querschnitt der Innenstützen von $400 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ als Eingangsgröße für die Bemessung in monolithischer Bauweise angenommen werden. In Abbildung 5a ist eine monolithische Stütze der Halle mit einem Köcherfundament und einer Auflagerung für den Spannbetonbinder mit einer Gabellagerung dargestellt.

Abbildung 5b zeigt eine modularisierte und segmentierte Stütze, wobei die beiden wesentlichen Ziele der Modularisierungsstrategie der Stützen mit dem übergeordneten Grundprinzip der Modularisierung „Unterteilung in Bereiche mit gleichen Eigenschaften oder Funktionen“ – ohne Wertigkeit der Reihenfolge – wie folgt lauten: Ermöglichung der Wiederverwendung der Betonelemente durch (1) den Einsatz lösbarer Verbindungen zwischen gefügten Elementen und (2) die Festlegung einheitlicher Abmessungen sowie weiterer Eigenschaften der Elemente.

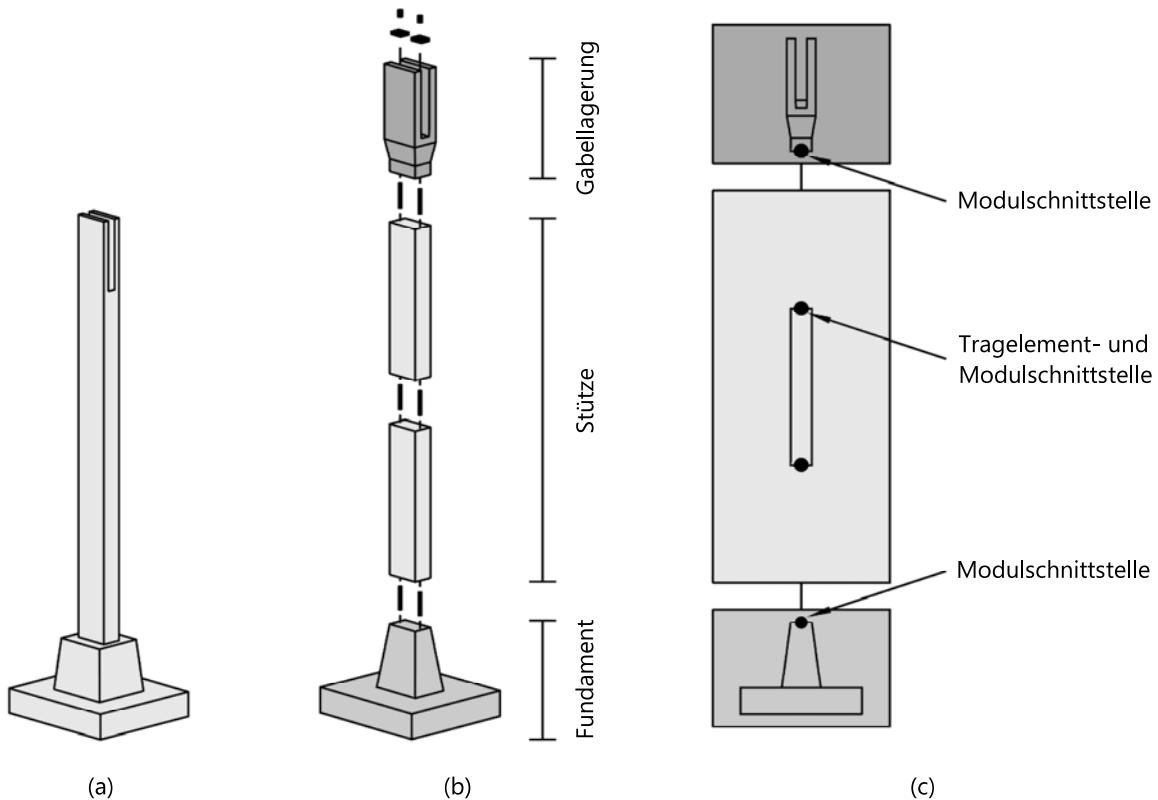


Abb. 5: (a) Monolithische Stahlbetonstütze mit Köcherfundament und Gabellagerung, (b) modularisierte, segmentierte Stütze mit angeschlossenen Bauteilen, verbundloser Vorspannung und lösbarer Verbindungen, (c) Module und Schnittstellen der segmentierten Stütze

Da sich die modularen Stützen aus mehreren Tragelementen und Bauteilen zusammensetzen, ist eine Vorspannung in die Bauteillängsrichtung erforderlich, die als verbundlose Vorspannung mit einem Stabspannverfahren realisiert wird. Die Ermittlung des Stützenquerschnitts und der Menge des Spannstahls erfolgt hier nicht auf Grundlage der tatsächlich vorliegenden Einwirkungen am Bauteil, sondern ist das Ergebnis der Baukastenoptimierung für Hallen mit den in Tabelle 1 festgelegten Größen.

Tab. 1: Eingangsgrößen und Abstufungen für die Baukastenoptimierung von Hallen

Abmessungen	Lasten	Werkstoffe
Höhe: 4,0 m, 7,0 m, 10,0 m	Eigenlasten: Stütze, Binder	Betonfestigkeitsklasse: C35/45
Binderabstand: 5,0 m, 6,0 m, 7,5 m	Dachlast (Ausbau): $g_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$	Betonstahl: B500B
Spannweite Binder: bis zu 25,0 m	Schneelast: $s_k = 1,50 \text{ kN/m}^2$	Spannstahl: St 950/1050
-	Windlast: $w_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$	-

Aus einer parametrisierten Bemessung entsprechend Eurocode 2 [24, 25] folgt als Ergebnis der Baukastenoptimierung ein möglichst einheitlicher Stützenquerschnitt. Für nahezu alle Kombinationen der in Tabelle 1 aufgeführten Abstufungen ist ein Stützenquerschnitt von 400 mm × 700 mm möglich. Lediglich für eine Halle mit einer Stützenhöhe von 10,0 m und einem Binderabstand von 7,5 m ist ein Querschnitt von

500 mm × 800 mm erforderlich. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der parametrisierten Bemessung mit einer Darstellung des Tragelements mit den festgelegten Abmessung 400 mm × 700 mm × 3000 mm, der Schnittstelle und der Verbindung in den Fügeflächen sowie der Führung der Spannbewehrung. Die Tragelemente sind lediglich mit einer Mindestlängsbewehrung versehen, weisen jedoch aufgrund der Positionierung des Verbindungsdetails einen höheren Querkraftbewehrung im Vergleich zum monolithischen Bauteil auf.

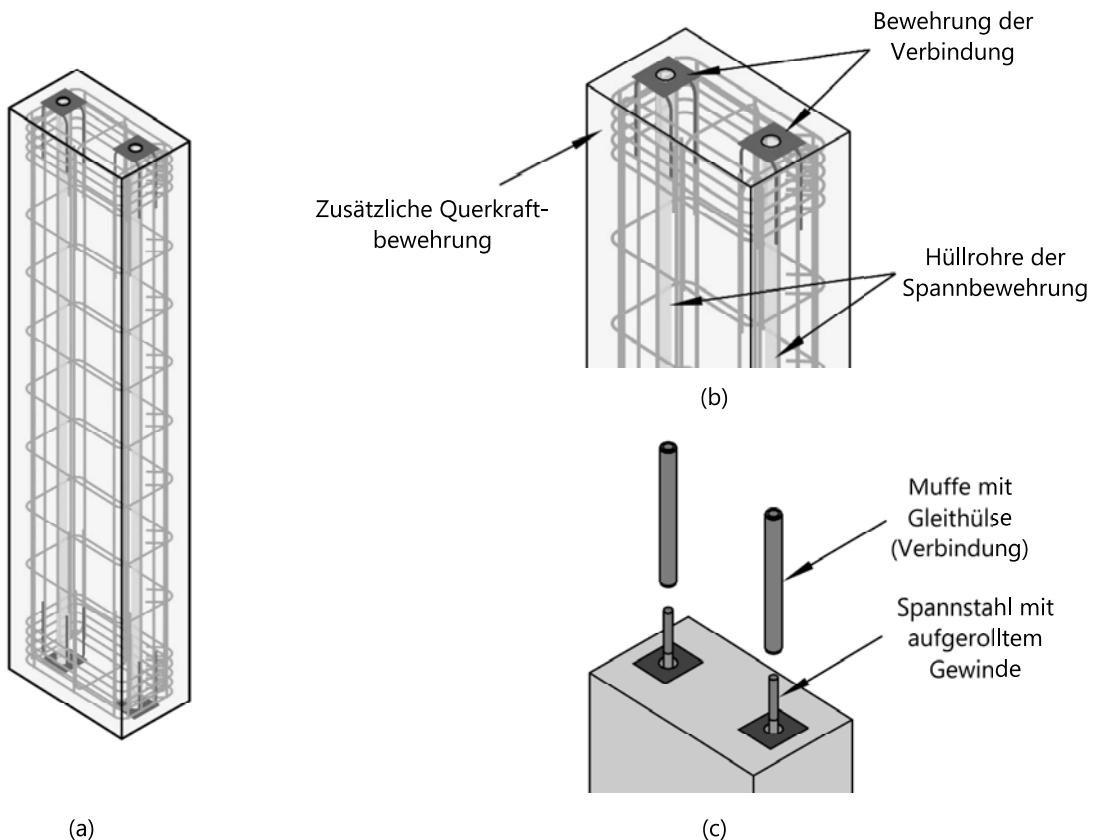


Abb. 6: (a) Vereinheitlichtes Tragelement mit Schnittstellen und Bewehrungsführung, (b) Detail: Schnittstelle, (c) Explosionszeichnung: Spannstäbe und Muffenkopplung

Durch die Überlagerung der Komponenten „Kraftübertragung“ (1) und „Spanngliedführung“ (3) entsprechend der konzeptionellen Idee der Schnittstelle (vgl. Abb. 2), ist eine Reduktion der Komplexität der Schnittstelle möglich. Es erfolgt eine Kopplung der Spannstäbe mit einer Muffe, die gleichzeitig als querkraftübertragendes Bauteil fungiert. Zudem dient die Flucht eines Spannkanals als Bezug für die Festlegung von Toleranzen. Durch diese Definition der Komponente „Ausrichtung“ (2) wird die Fügbarkeit der Tragelemente sichergestellt.

3.2 Bewertung der Nachhaltigkeit und Klimaeffizienz

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit und Klimaeffizienz eines Gebäudes wird u. a. das Ziel verfolgt, die umweltbezogene, soziale und ökonomische Qualität eines Bauwerks darzulegen [26]. Im Folgenden wird aufgrund der beschränkten Datenlage lediglich eine Bewertung der umweltbezogenen Qualität (Ökologie) der aufgezeigten modularen Bauweise und ein Vergleich mit der monolithischen Bauweise vorgenommen. Hierzu werden beispielhafte Annahmen getroffen, die nachfolgend erläutert werden.

Die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer für Lager- und Logistikhallen beträgt zwischen 15 und 40 Jahre [27]. Bei einer entsprechenden Charakteristik des Objekts und einer Drittverwendungsfähigkeit ist von längeren Nutzungsdauern auszugehen [27]. Der gesamte Betrachtungszeitraum für die Bewertung der Ökologie

wird in folgendem Beispiel zu 40 Jahren angenommen. In diesem Betrachtungszeitraum ist von einer Erstnutzung (1. Betrachtungszeitraum) an einem Ort und einer weiteren Nutzung der Tragelemente des modularen Systems nach 20 Jahren (2. Betrachtungszeitraum) an einem zweiten Ort auszugehen. Beim monolithischen Gebäude hingegen wird die Annahme getroffen, dass das Nutzungsende der Halle nach 20 Jahren erreicht ist und durch die Änderung des Bedarfs eine kleinere Halle mit einer Höhe von nur 4 m an einem zweiten Ort zu errichten ist. Abbildung 7 zeigt schematisch den Herstellprozess, die Errichtung der Stützen der ersten beispielhaften Halle, die Demontage bzw. den Abriss sowie die Errichtung der Stützen des zweiten Gebäudes.

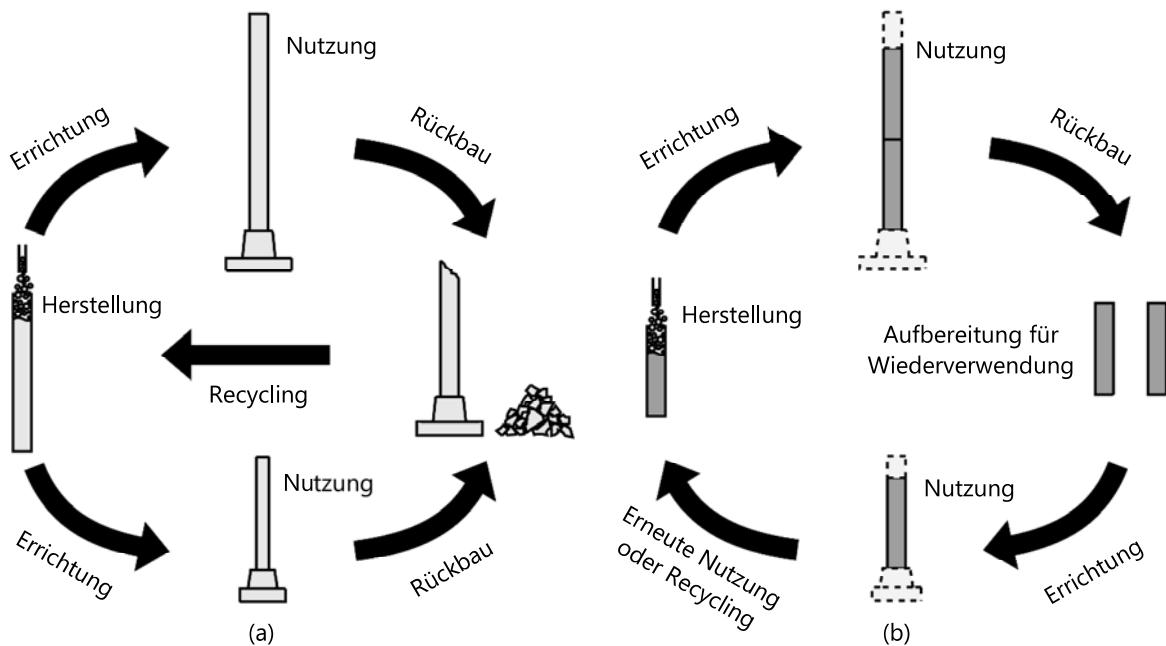


Abb. 7: Lebenszyklus der Stützen beider Betrachtungszeiträume: (a) Monolithische Bauweise, (b) modulare Bauweise

Es wird angenommen, dass die Spannbewehrung des modularen Gebäudes bei der Errichtung im zweiten Betrachtungszeitraum nicht erneut verwendet werden kann. Tabelle 2 fasst die Annahmen für die ökologische Betrachtung zusammen. Es werden lediglich die Stützen als Bauteile, ohne Fundamente und Gabellageungen, betrachtet (vgl. Abb. 5b).

Tab. 2: Kennwerte der betrachteten Gebäude in modularer und monolithischer Bauweise

	Modulare Bauweise	Monolithische Bauweise
Gesamter Betrachtungszeitraum	40 Jahre	
1. Betrachtungszeitraum	20 Jahre	
Abmessungen der Halle	60 m x 25 m x 7 m	
Binderabstand	6 m	
Stützenquerschnitt	400 mm x 700 mm	400 mm x 600 mm
Beton C35/45	43 m ³	37 m ³
Betonstahl B500B	1,0 t	5,3 t
Spannstahl St 950/1050	1,3 t	-
2. Betrachtungszeitraum	20 Jahre	
Abmessungen der Halle	30 m x 15 m x 4 m	
Binderabstand	5 m	
Stützenquerschnitt	400 mm x 700 mm	400 mm x 400 mm
Beton C35/45	14 m ³ (im 1. Zeitraum enthalten)	8 m ³
Betonstahl B500B	0,3 t (im 1. Zeitraum enthalten)	0,5 t
Spannstahl St 950/1050	0,4 t	-

Bei der nachfolgenden Analyse ausgewählter Indikatoren wird lediglich eine Betrachtung der in Tabelle 2 aufgeführten Werkstoffe durchgeführt, da keine ausreichende Datengrundlage für die Bewertung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton vorliegt. Die Daten für die Analyse entstammen der ÖKOBAUDAT-Datenbank [28–30]. Die Kennwerte der Werkstoffe für die einzelnen Informationsmodule (Phasen) entstammen *Environmental Product Declarations* (EPD) auf Grundlage der DIN EN 15804 [31]. In der Datenbank bzw. den Datensätzen wird der Hinweis gegeben, dass die Werte der Indikatoren des Werkstoffs Stahlbeton durch eine Kombination der Werte der Datensätze ‚Beton‘ und ‚Betonstahl‘ zu ermitteln sind. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Indikatoren „totales globales Erwärmungspotenzial“, „totale nicht erneuerbare Primärenergie“ und „totale erneuerbare Primärenergie“ für die Informationsmodule der Module A bis C und die Vorteile sowie Belastungen außerhalb der Systemgrenze, Modul D, aufgeführt, wobei nicht alle Informationsmodule gemäß [26, 31] berücksichtigt wurden.

Tab. 3: Ausgewählte Indikatoren der betrachteten Gebäude in modularer und monolithischer Bauweise

Indikator	Totales globales Erwärmungspotenzial (GWP-total)		Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)		Totale erneuerbare Primärenergie (PERT)	
Einheit	t CO ₂ -Äq.		GJ		GJ	
Bauweise	Modular	Monolith.	Modular	Monolith.	Modular	Monolith.
1. Betrachtungszeitraum						
A Herstellungsphase						
A1-A3 Herstellung	13,8	10,7	87,3	70,3	18,2	25,1
A4-A5 Transport, Einbau	0,4	0,3	5,1	4,4	0,7	0,6
B Nutzungsphase						
B1 Nutzung	-0,4	-0,5	-	-	-	-
C Entsorgungsphase						
C1-C4 Entsorgung	0,0	0,7	0,1	19,3	0,0	1,9
D Recyclingpotenzial						
D Recycling	-1,9	1,4	-16,9	7,8	1,5	-4,4
Zwischensumme	11,9	12,6	75,6	101,8	20,4	23,2
2. Betrachtungszeitraum						
A Herstellungsphase						
A1-A3 Herstellung	1,1	2,0	10,5	11,6	1,3	3,5
A4-A5 Transport, Einbau	0,0	0,1	0,0	0,9	0,0	0,1
B Nutzungsphase						
B1 Nutzung	-0,1	-0,1	-	-	-	-
C Entsorgungsphase						
C1-C4 Entsorgung	0,8	0,2	12,4	2,9	2,1	0,4
D Recyclingpotenzial						
D Recycling	-0,8	0,1	-9,4	0,0	-3,0	-0,7
Zwischensumme	1,0	2,3	13,5	15,4	0,4	3,3
Gesamter Betrachtungszeitraum						
Summe	12,9	14,9	89,1	117,2	20,8	26,5

Die Berechnung des CO₂-Äquivalents sowie des Primärenergiebedarfs lässt eine Einschätzung und einen Vergleich der beiden Bauweise sowie der beispielhaften Gebäude in den gewählten Betrachtungszeiträumen in Bezug auf die Ökologie zu. Tabelle 3 zeigt auf, dass die Herstellung der Tragelemente im ersten Betrachtungszeitraum für das modulare Gebäude mit rund 30 % höheren CO₂-Emissionen (CO₂-Äquivalent) im Vergleich zu den Bauteilen der monolithischen Bauweise verbunden ist. Aufgrund der Vorspannung der modularen, segmentären Stützen, der daraus folgenden geringeren erforderlichen Menge an Betonstahl im Vergleich zur monolithischen Bauweise und des guten Recyclingpotenzials des Spannstahls – gemäß der ÖKO-BAUDAT-Datenbank – liegen über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere kumulierte Emissionen der modularen Bauweise vor. Hierbei ist zu erwähnen, dass zusätzliche Emissionen aus der Errichtung, dem Transport, der Instandhaltung und Instandsetzung, dem Austausch, der Modernisierung und weiteren Prozessen,

die aus der Eigenart der beiden betrachteten Bauweisen herrühren, unberücksichtigt bleiben. Außerdem ist Tabelle 3 erkennbar, dass der gesamte Energiebedarf (nicht erneuerbare und erneuerbare Primärenergie) der modularen Bauweise aufgrund einer deutlich geringeren Menge an Betonstahl sowohl im ersten als auch im zweiten Betrachtungszeitraum – und damit auch über den gesamten Betrachtungszeitraum gesehen – geringer ist; im Vergleich zur monolithischen Bauweise.

Für eine Einordnung der beispielhaften Berechnungen ist zu erwähnen, dass die Herstellung (Module A1 bis A3) ca. 70 bis 80 % der CO₂-Emissionen der gesamten Herstellungsphase (Modul A) einnehmen. Der Transport und der Einbau bzw. die Montage nehmen somit rund 20 bis 30 % der CO₂-Emissionen der Herstellungsphase ein. Dabei betragen die CO₂-Emissionen der Zementproduktion im Mittel bereits ca. 60 % aller Emissionen der Herstellung (Module A1 bis A3) [32]. Im vorliegenden Fall sind für die beiden betrachteten modularen Gebäude CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung (Module A1 bis A3) von rund 64 % und für die monolithischen Gebäude CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung von rund 78 % bezogen auf die jeweiligen gesamten CO₂-Emissionen der Module A1 bis A3 festzustellen. Es kann ergänzt werden, dass die Herstellung und Errichtung eines Gebäudes (Modul A) ca. 40 % der CO₂-Emissionen und die Nutzung (Modul B) ca. 60 % umfassen; bezogen auf einen üblichen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren [32]. Die in Tabelle 3 aufgeführte CO₂-Aufnahme des Betons (negatives Vorzeichen) in der Nutzungsphase bezieht sich auf die Karbonatisierung.

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die modulare Bauweise birgt durch die Zerlegung monolithischer Strukturen und der Überführung der Bauteile in ein Baukastensystem Vor- und Nachteile, die im Folgenden zusammenfasst werden. Zudem erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse dieses Beitrags.

- Durch die Vorspannung von Stützen kann die Menge des Betonstahls gegenüber einer schlaff bewehrten Stütze deutlich reduziert werden; unabhängig von der Zerlegung der Stützen in kleinere Tragelemente. Hierdurch können CO₂-Emissionen sowie der erforderliche Primärenergiebedarf mit einer Betrachtung der relevanten Phasen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks reduziert werden. Aus dieser Folgerung kann ein Forschungsbedarf verbündlos vorgespannter Stützen – in modularer und monolithischer Bauweise – abgeleitet werden.
- Durch die Modularisierung und Segmentierung von Bauteilen kann eine Wiederverwendung von Anfang an mitgedacht werden. Im Rahmen der „Frühen Phase“ der Produktentwicklung sind bei der Entwicklung eines Baukastensystems der Bedarf und die Einsatzmöglichkeiten wiederverwendbarer Bauteile zu berücksichtigen. Bei der Entwicklung von Baukastensystemen sind zudem die Umgebungsbedingungen vollständig zu erfassen. Neben den äußeren Einwirkungen und Expositionen ist beispielsweise auch die Baugrundbeschaffenheit zu berücksichtigen [9].
- Durch die Standardisierung von Tragelementen und Bauteilen können positive Skaleneffekte in der Produktion erzielt werden. Der Rückbau, der Austausch, die Vorbereitung für die Wiederverwendung und das Recycling einheitlicher Tragelemente und Bauteile ist im Vergleich zu individuellen Bauteilen grundsätzlich kostengünstiger, schneller und unter Umständen auch klimaeffizienter, da durch die Vereinheitlichung Parameter in verschiedenen Prozessen für einen begrenzten oder gar unbegrenzten Zeitraum festgeschrieben werden können [9].
- Eine vollumfängliche Bewertung der Nachhaltigkeit mit einer Betrachtung ökonomischer und sozialer Aspekte ist vorzunehmen, um ein valides Ergebnis der Bewertung der Nachhaltigkeit zu erhalten. Beispielweise ist bei einer ökonomischen Bewertung zu beachten, dass sich der personelle Aufwand bei der Errichtung eines modularen Gebäudes erhöht, da einzelne Bauteile aus mehreren Tragelementen in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten zusammengefügt werden müssen, jedoch gleichzeitig der personelle Aufwand durch die Möglichkeit der maschinellen Vorfertigung mit einer Herstellung kleiner, standardisierter Tragelemente reduziert wird. Zudem sind neben der Bewertung der

Nachhaltigkeit auch technische Bewertungen im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses zur Beurteilung des Produktes und dem Vergleich mit bestehenden Produkten erforderlich. Hierbei ist zu beachten, dass Referenzen für den Vergleich richtig gewählt werden.

- In diesem Beitrag wurden ausgewählte Module im Lebenszyklus der betrachteten Gebäude und lediglich drei Indikatoren entsprechend den einschlägigen Regelwerken betrachtet. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit wurden Mengen der erforderlichen Werkstoffe herangezogen. Grundsätzlich sind alle Module, weitere Indikatoren sowie detailliertere Betrachtungen vorzunehmen. Insbesondere der Anteil der Instandhaltung der modularen Bauweise ist bei der ökonomischen Bewertung genaustens zu untersuchen. Es ist von einem höheren Aufwand zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit verbundlos vorgespannter Tragwerke im Vergleich zu Bauweisen mit schlaffer Bewehrung oder Vorspannung mit Verbund auszugehen.
- Die der Erstellung eines EPD-Dokuments zugrundeliegenden Annahmen sind bei der Auswahl von Werten für die Bewertung der Nachhaltigkeit auf Bauteil- oder Bauwerksebene kritisch zu betrachten. Die anzuwendenden Normen lassen teilweise einen erheblichen Spielraum bei der Bestimmung der Werte zu. Beispielsweise beträgt gemäß den Herstellerangaben für das Modul D, Recyclingpotenzial, das gesamte globale Erwärmungspotenzial 349 kg CO₂-Äq. je Tonne Betonstahl [33], während für die Spannbewehrung ein Wert von -1496 kg CO₂-Äq. je Tonne Spannstahl angegeben wird [34]. Es wird empfohlen, das Modul D und die dort hinterlegten Kennwerte kritisch zu betrachten, damit die eigenen Annahmen bei der Ermittlung der Einzelwerte verschiedener Indikatoren im Einklang mit den Eingangsgrößen und Annahmen stehen, die bei der Erstellung des EPD-Dokument getroffen wurden.
- Die beispielhaft dargestellten Hallen sind aus Stützen und Fundamenten aus Beton, Spannbetonbindern und einem Dachaufbau aus Porenbetonplatten aufgebaut. Grundsätzlich kann ein nachhaltiges und klimaeffizientes Bauen durch die bedachte Kombination verschiedener Werkstoffe erreicht werden. Beispielsweise eignen sich für einen alternativen Aufbau Binder aus Brettschichtholz und Dachaufbauten aus Trapezblech mit Wärmedämmung. Durch eine hybride Bauweise können die Vorteile der einzelnen Werkstoffe kombiniert werden; insbesondere dann, wenn für ein Bauvorhaben angepasste Bauteile bzw. Sonderbauteile (vgl. Abb. 3) zum Einsatz kommen und eine Wiederverwendung der Bauteile aufgrund ihrer Individualität ausgeschlossen ist.

Bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme sind zukünftig verschiedene Herausforderungen zu bewältigen. Es sind Fertigungstechniken, Fügeprozesse, die Bemessung von trockenen Lagerfugen und Stoßflächen außerhalb des im Eurocode 2 geregelten Bereichs, die erneute oder sogar mehrfache Nutzung von Tragelementen, die Weiterentwicklung von Regelwerken, die Änderung derzeit festgeschriebener Parameterwerte sowie die Änderung des Bedarfs und der Anforderungen an Tragwerke zu berücksichtigen und teilweise zu erforschen. Aufgrund dieser Vielzahl an Aspekten wird empfohlen, Baukastensysteme mit vereinheitlichen Tragelementen über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) und allgemeine Bauartgenehmigungen (aBG) für eine Anwendung in Deutschland zuzulassen. Darüber hinaus besteht auf europäischer Ebene die Möglichkeit, eine europäische technische Bewertung (ETA) zu erwirken.

5 Literatur

- [1] Bruckschlägl, S., Beuchle, G., Vollmer, E., Patarca, H. P., Volk, R., Schultmann, F., Dehn, F. (2023) Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling, doi=10.5445/IR/1000157027.
- [2] Reiners, J., Höffgen, J., Denu, M., Müller, C., Dehn, F. (2024) Der Einfluss von Recyclingmaterial auf die Eigenschaften von Beton. In: Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen - Von der Ausnahme zur Regelbauweise: 20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2024. KIT Scientific Publishing, 31–43, doi=10.58895/ksp/1000167485-6.
- [3] Bundesgesetz (2019) Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG.
- [4] Bundesgesetz (2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).
- [5] Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, A., Asmus, S., Schmidt, S., Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S., Jens Jürgen, L. (2015) Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Texte 93/2015. Umweltbundesamt.
- [6] Heyn, S., Mettke, A. (2008) Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf. Teil 0: Zielstellung und Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben.
- [7] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2018) Baufachliche Richtlinien Recycling. Arbeitshilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes.
- [8] Albers, A., Rapp, S., Birk, C., Bursac, N. (2017) Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In 4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP) : Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 28-29 Juni 2017. Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. Fraunhofer Verlag.
- [9] Manny, A. N. B. (2024) Ein Beitrag zur Entwicklung standardisierter Schnittstellen für den modularen Betonfertigteilbau. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), doi=10.5445/IR/1000171212.
- [10] Bender, B., Gericke, K. (2021) Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [11] Erixon, G. (1998) Modular function deployment. A method for product modularisation. Zugl.: Stockholm, Kungl. Tekn. Högsk., Diss., 1998. TRITA-MSM 98:1. The Royal Inst. of Technology Dept. of Manufacturing Systems Assembly Systems Division, Stockholm.
- [12] Koppenhagen, F. (2004) Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen. Komplexitätsreduzierung in der Konzeptphase. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Arbeitsbereich Produktionswirtschaft, Diss., 2004. Berichte aus der Konstruktionstechnik. Shaker, Aachen.
- [13] Lindemann, U., Maurer, M. (2006) Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion, U. Lindemann, R. Reichwald and M. Zäh, Eds. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, 41–62, doi=10.1007/3-540-34274-5_4.
- [14] Lindemann, U., Reichwald, R., Zäh, M. (Hrsg.) (2006) Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, doi=10.1007/3-540-34274-5.
- [15] Stone, R. B., Wood, K. L., Crawford, R. H. (2000) A heuristic method for identifying modules for product architectures. Design Studies 21, 1, 5–31, doi=10.1016/S0142-694X(99)00003-4.

- [16] Steinle, A., Bachmann, H., Tillmann, M. (2018) Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. Bauingenieur-Praxis. Ernst & Sohn, A Wiley Brand, Berlin.
- [17] Tillmann, M. (2019) Knotenverbindungen für Betonfertigteile. Hinweise für Bemessung und Konstruktion.
- [18] o. V. (2011) Formschlüssig stapelbarer Beton-Körper mit Natursteinen, Verfahren zur Herstellung und deren Verwendung sowie eine darauf hergestellte Mauer, Patent: DE 10 2009 051 957 A1.
- [19] Mark, P., Lanza, G., Lordick, D., Albers, A., König, M., Borrman, A., Stempniewski, L., Forman, P., Frey, A. M., Renz, R., Manny, A. (2021) Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung. Bautechnik 98, 3, 243–256, doi=10.1002/bate.202000110.
- [20] Albers, A., Kempf, C., Renz, R., Spadinger, M., Stempniewski, L., Manny, A. (2020) Intelligente Modularisierung für den skalierbaren Betonbau durch Adaption der Methoden zur Baukastenentwicklung. BetonWerk International, 3, 27.
- [21] Koller, R. (1994) Standardisieren von Produkten. In Konstruktionslehre für den Maschinenbau, R. Koller, Ed. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 282–305, doi=10.1007/978-3-662-08165-5_7.
- [22] Nasvytis, A. (1953) Die Gesetzmäßigkeiten kombinatorischer Technik. Wissenschaftliche Normung, Schriftenreihe. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [23] Hierlein, E., Tillmann, M. (2021) Betonfertigteile im Geschoss- und Hallenbau. Grundlagen für die Planung.
- [24] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1946465.
- [25] DIN EN 1992-1-1:2011-01. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1723945.
- [26] DIN EN 15643:2021-12. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [27] Bienert, S., Wagner, K. (2018) Bewertung von Spezialimmobilien. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, doi=10.1007/978-3-8349-4738-3.
- [28] OEKOBAU.DAT (2022) Prozess-Datensatz: Betonstahl in Ringen und Betonstabstahl. https://oekobau-dat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b14811fa-c9ad-4073-9d8f-68ad1fc4d1d&version=00.02.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [29] OEKOBAU.DAT (2023) Prozess-Datensatz: Beton der Fruchtfestigkeitsklasse C35/45. https://oekobau-dat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=90999905-ace2-49ee-90f0-f2a649c8989e&version=00.02.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [30] OEKOBAU.DAT (2023) Prozess-Datensatz: Spannstahl. https://oekobaudat.de/OEKOBADAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=231073e3-f6ab-44e1-8117-0d38b9c2e526&version=00.06.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [31] DIN EN 15804:2022-03. Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [32] Wang, G., Luo, T., Luo, H., Liu, R., Liu, Y., Liu, Z. (2024) A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches. City Built Enviro 2, 1, doi=10.1007/s44213-024-00036-1.

- [33] Baustahlgewebe GmbH (2022) Betonstahl in Ringen und Betonstabstahl. EPD-BSW-20210265-CBA1-DE. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/3b454b49-76ee-4160-b7d4-d8750712580d/Betonstahl_in_Ringen_und_Betonstabstahl_14846.pdf?version=00.01.000. Zugriff am 18.01.2025.
- [34] voestalpine AG (2023) Drawn Wire - Prestressing Wire and Strand. EPD-VOE-20230108-IBC2-EN. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/ea34d5c5-fc16-49ec-9a42-2ce48bb6a7b9/Drawn_Wire_-_Prestressing_Wire_and_Strand_18886.pdf?version=00.03.000. Zugriff am 18.01.2025.

6 Autoren

Dr.-Ing. Agemar Manny

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
agemar.manny@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
frank.dehn@kit.edu