

Eco-construction for sustainable development (Econ4SD) – Konzepte für Materialbanken

A. Zilian, D. Waldmann, F. Hertweck, N. Teferle, M. Schäfer, F. Scholzen

Department of Engineering

Faculty of Science, Technology and Medicine at University of Luxembourg

L-4362 Esch-sur-Alzette

EMail: andreas.zilian@uni.lu

Zusammenfassung

Der Beitrag stellt das gemeinschaftliche Forschungsprojekt *Econ4SD – Eco-construction for sustainable development* vor, das an der Universität Luxemburg verschiedene Aspekte des nachhaltigen Planens, Bauens und Bewirtschaftens im Sinne einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft im Bauwesen untersucht. Hierbei nimmt der Ansatz des *Design for deconstruction* eine zentrale Rolle ein, der zusammen mit dem komplementären Konzept der *Material banks* und deren digitaler Abbildung auf Komponenten-, Bauwerks- und Marktebene diskutiert wird.

Abstract

This contribution presents the joint research project *Econ4SD – Eco-construction for sustainable development* which investigates at the University of Luxembourg various aspects of sustainable design, construction and operation to support a resource-efficient circular economy in the construction sector. In this context the fundamental approach of *Design for deconstruction* assumes a central role and is being discussed together with the complementary concept of *Material banks* and their digital twinning at the level of components, buildings and markets.

1 Einführung

Die Gesamtheit der deutschen gebauten Umwelt enthält mehr als 26 Milliarden Tonnen mineralische Baumaterialien, ca. 900 Millionen Tonnen metallische Werkstoffe, 330 Millionen Tonnen Holzprodukte, sowie 230 Millionen Tonnen Kunststoffe. Derzeit ist von einer weiteren Zunahme dieses materiellen Ressourceneinsatzes um 20 Prozent bis zum Jahr 2050 auszugehen [1]. Die mit Abstand größten anthropogenen Materiallager sind der Bautätigkeit geschuldet (ca. 53% im Hochbau und ca. 42% im Tiefbau). Pro Jahr und Einwohner setzt der deutsche Bausektor rund 6 Tonnen mineralische Baustoffe und ca. 200 Kilogramm Eisen- und Buntmetalle zur Instandsetzung und zur Errichtung neuer Bauwerke ein. Mit diesen Mengen gehen auch erhebliche volkswirtschaftliche und private Werte einher. Der so in deutschen Bauwerken hinterlegte reine Materialwert beträgt schätzungsweise 1,3 Billionen Euro, wobei auf Metalle 50%, auf mineralische Materialien 26% und auf Holz und Kunststoffe jeweils 12% entfallen [1].

Das verbaute Materiallager ist nicht statisch. Die Betrachtung der materialbezogenen Flüsse ergibt, dass pro Jahr 523 Millionen Tonnen durch inländische Extraktion und ca. 200 Millionen Tonnen durch Import zugeführt werden während ca. 200 Millionen Tonnen für den Export entnommen werden. Mehr als 30 Millionen Tonnen Material werden jährlich in Form von Verfüllungen und nach thermischer Behandlung als Emissionen an die Umwelt abgegeben. Von 510 Millionen Tonnen Material, die jedes Jahr für Bauwerke des Hochbaus und der Infrastruktur eingesetzt werden, können ca. 85 Millionen Tonnen durch Recycling wiedergewonnen werden und ca. 10 Millionen Tonnen verbleiben auf Deponien [2]. Die Zusammensetzung der durch Bautätigkeit hinterlegten Rohstoffe ist Schwankungen unterworfen, die nicht

nur durch technologische Weiterentwicklung, sondern auch durch politisch-gesellschaftliche Neubewertungen (z.B. Umweltschutz, Energiewende, Klimawandel) und die wirtschaftlich-demographischen Rahmenbedingungen beeinflusst werden.

Die Bewirtschaftung dieser *urbanen Minen* in Form von Gebäuden, Infrastrukturbauwerken und Lagerstätten erfordert geeignete Bewertungsmethoden, wie sie in anderen Bereichen der Wirtschaft bereits systematisch zum Einsatz kommen [4]. Neben der quantitativen Erfassung und qualitativen Beschreibung des Bestandes zur Maximierung der Wiederverwertbarkeit über Recycling ist eine viel stärkere Integration des Ansatzes „Überholung und Wiederverwendung von Bauteilen und Tragwerkskomponenten“ in Planungsprozesse erforderlich, um die Potentiale urbaner Minen nicht nur passiv zu nutzen, sondern auch aktiv zu steuern.

Der nachfolgende Beitrag ist an der Ertüchtigung der zukünftig gebauten Umwelt orientiert und widmet sich daher zunächst dem Entwurf ressourcenschonender Bauwerke. Ausgehend von der Einbeziehung des Recyclingpotentials von Baustoffen in den Entwurfsprozess werden Prinzipien des Entwurfs von wiederverwertbaren Bauteilen und Bauwerkskomponenten diskutiert. Der Wunsch nach einer möglichst effizienten Kreislaufwirtschaft stellt, aufgrund der Komplexität und des Unikat-Charakters von Bauwerken, besondere Herausforderungen an das Ressourcen- und Lebenszyklusmanagement. Ansätze zur virtuellen Beschreibung (*digital twinning*) auf unterschiedlichen Ebenen werden konzeptionell eingeführt. Der Beitrag schließt mit der Vorstellung des Forschungsvorhabens *Econ4SD* und der Diskussion ausgewählter Teilaspekte des Projektes aus den Bereichen Architektur, BIM und Integration physikalischer Vorhersagemodelle.

2 Ressourcenschonendes Planen, Bauen und Betreiben

Nach [1] sind die auf das Bauen übertragenen Leitfragen zur Hebung des Potentials von *urban mines* zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen und zur Schonung von Primärrohstoffen:

1. Wo sind die Lager?

Während die Hinterlegung großer Mengen von Baustoffen und Komponenten in Bauwerken offensichtlich ist, findet eine systematische und langlebige Erfassung nur partiell für ausgewählte Eckdaten statt (Kataster). In vielen Ländern ist dies gar nicht der Fall. Selbst in Deutschland wird kaum explizit zwischen genutzt und ungenutzt gelagerten Stoffen differenziert, im besten Fall findet die faktische Erfassung über den Marktwert statt.

2. Wie viel und welche Materialien sind vorhanden?

Für den Um- bzw. Rückbau von Bestandsbauten stellen die Unsicherheiten über die Menge und Beschaffenheit, der in ihnen eingesetzten Materialien, eine große Herausforderung beim Recycling dar. Die Inventarisierung der hinterlegten Baumaterialien ist daher Grundvoraussetzung für einen hochgradigen Stoffkreislauf. Die Gebäudepässe der Bestandsdokumentation von Bauten des Bundes sind in Deutschland ein richtungsweisendes Instrument.

3. Wann werden die Lager für die Rohstoffgewinnung verfügbar?

Üblicherweise werden die in einem Bauwerk eingeschlossenen Sekundärrohstoffe bei Umbau oder Rückbau zumindest teilweise verfügbar. Da sich die Eigenschaften der einge-

setzten Materialien und Komponenten im Laufe des Lebenszyklus des Bauwerks unterschiedlich ändern (z.B. Alterung), wäre die zeitliche Vorhersage und Koordination notwendiger großskaliger Austauschmaßnahmen wünschenswert.

4. Wer ist an der Gewinnung beteiligt?

Beim traditionellen Gebäudeabriss ist der Eigentümer an der Entfernung der zurückbleibenden Baustoffe interessiert, da für ihn der angenommene innere Nutz- bzw. Marktwert des Bauwerks gegen Null geht. Dabei fließt heute selten eine Bewertung der eingeschlossenen materiellen Ressourcen ein. Die Geschäftsmodelle der Sammler, Verwerter und Aufbereiter von Baurückständen unterliegen unterschiedlichen wirtschaftlichen Anreizen und Zwängen, sodass ein geschlossener Stoffkreislauf unter Umständen von einem nicht unerheblichen Energiebedarf und von Emissionen begleitet ist.

5. Wie lassen sich Stoff- bzw. Komponentenkreisläufe effektiv schließen?

Es müssen die technischen, logistischen und organisatorischen Voraussetzungen erfüllt sein, um sicherzustellen dass die Rezyklierbarkeit der Rohstoffe erhalten bleibt oder die Aufbereitung von Bauwerkskomponenten möglich und wirtschaftlich ist. Dies ist begleitet von der Frage nach Qualitätssicherungsstandards und Zertifizierung. Ganz wesentlich ist die Koordination der entstehenden Stoffströme hinsichtlich der Menge, des Ortes und des Zeitpunktes, aber auch der Qualität. Das erfordert eine ausreichende Datenbasis und zuverlässig skalierende (digitale) Instrumente.

Die strategischen Leitfragen zeigen auf, dass wesentliche Ziele wie

- die Minimierung des Deponierbedarfes, des Einsatzes von Primärrohstoffen, des Energiebedarfes sowie der mit Herstellung und Betrieb von Bauwerken einhergehenden Emissionen, und
- die Maximierung des Anteils und der Kenntnis über die aktuelle Güte recycelbarer Sekundärrohstoffe und wiederaufbereiteter/wiederverwendbarer Bauwerkskomponenten

an eine Reihe von Erfordernissen und Voraussetzungen gekoppelt sind, die heute im breiten Bestand noch nicht erfüllt sind. Es ist daher erforderlich, zukünftige Bauten bereits in der Entwurfsphase ressourcenbewusst zu konzipieren, die schonende Umnutzung und Erweiterung vorzusehen und die für einen Stoffkreislauf-affinen Rückbau/Abriss erforderlichen Informationen bereitzuhalten.

2.1 Recycling-orientierter Entwurf

Die verschiedenen Massenbaustoffe weisen unterschiedlich hohe Recyclingquoten auf, wie in Tabelle 1 dargestellt. Die Rückführung von Stahl und Betonstahl in den Wertstoffkreislauf erfolgt nahezu vollständig [6, 7]. Obwohl hochwertiges Recycling von mineralischen Baustoffen (Altbeton) und Baurestmassen (Bauschutt) die Substitution von bis zu 25% der Zuschlagstoffe erlaubt, wird Recyclingbeton in Deutschland trotz entsprechender Normenrahmen (DIN 10945/EN 206-1, DIN 4226-100/EN 12610) mangels breiter Akzeptanz nur unterproportional eingesetzt. Mauerwerkbruch ist durch seine Heterogenität nur schwer direkt verwertbar. Neben der direkten werkstofflichen Rezyklierung stellt die Synthese neuer Materialien

aus solchen Baureststoffen und deren Rückführung in den Baustoffkreislauf einen alternativen Verwertungsansatz dar.

Tab. 1 Recycling- und Entsorgungsquoten verschiedener Baustoffe und Baurestmassen aus Angaben in [5, 6, 7, 8, 9].

Baustoff	Recycling	Entsorgung
Beton	50%	
Betonstahl	95%-98%	
Stahl	93%	
Mauerwerksteine	20%	
Holz	70%	
Boden/Steine	9%	14%
Bauschutt	78%	6%
Straßenaufbruch	95%	2%

Ein wesentlicher Aspekt bei der Aufbereitung und dem Einsatz rezyklierter Baumaterialien ist die Ausschleusung von Schadstoffen, um eine Anreicherung von umwelt- und gesundheitsgefährdenden Stoffen im Rezyklat zu vermeiden. Degradierungseffekte durch mehrfache Durchgänge im Stoffkreislauf (Downcycling) und die damit einhergehende Minderung der Performanz sind zu berücksichtigen und möglichst zu minimieren.

Durch die Langlebigkeit des Produktes „Bauwerk“ ist zum Zeitpunkt der Planung und Ausführung nicht genau vorhersehbar, welche technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zum Ende des Lebenszyklus vorliegen. Die Ansprüche an einen recyclingbewussten Entwurf (*Design for Recycling*, [11]) lassen sich dennoch entlang einfacher Prinzipien formulieren:

- den Einsatz heute bereits wiederaufbereiteter Baumaterialien prinzipiell vorsehen,
- Rezyklierbarkeit hierarchisch bewerten/wichten (Rohbau, Innenausbau, Gebäudetechnik),
- alternative Bauweisen ganzheitlich in Betracht ziehen (Energieverbrauch, Emissionen),
- Optionen für die spätere (partielle) Umnutzung vorsehen und systematisch ermöglichen,
- räumliche Zugänglichkeit sichern (Planung für Umbau, Rückbau oder Abriss),
- detaillierte Dokumentation der eingesetzten Materialien (Produkt, Ort, Umfang, Einbau).

Materialpässe sind für den letztgenannten Aspekt ein wichtiges Instrument [10]. Um einen effektiven Recyclingprozess auch Jahrzehnte später zu sichern, sollten diese Dokumentationen über die wesentlichen Grunddaten wie Produktzusammensetzung und -qualität, Einbaumengen bzw. Einbauweisen sowie die Verortung im Bauwerk hinausgehen. Das zum Zeitpunkt des Einbaus vorgesehene Recyclingkonzept und Hinweise zur Trennung und zum selektiven Rückbau der verschiedenen Materialien und Bauteilgruppen vervollständigen eine recyclinggerechte Konstruktion. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Sicherstellung und der qualitativ hochwertigen Fortführung solcher Materialpässe über den gesamten Lebenszyklus der

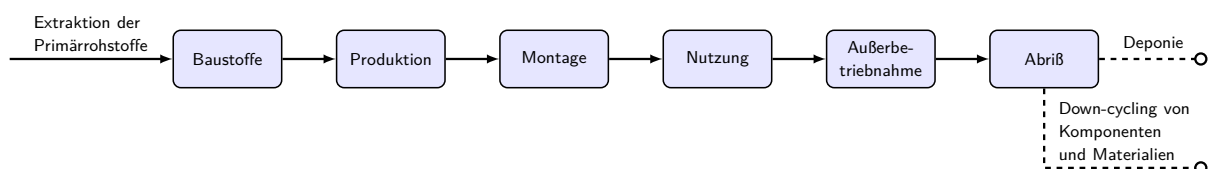
Bauwerke. Die konsequente Etablierung von digitalen Materialpässen für Neubauten würde schon innerhalb weniger Jahrzehnte eine sehr viel differenziertere Datenbasis zur Bewertung des Bauwerksbestandes (insbesondere Wohn- und Bürogebäude) bieten als heute zur Verfügung steht.

2.2 Reuse-orientierter Entwurf

Die umfängliche Rückführung von in Bauwerken hinterlegten Stoffen in den Materialkreislauf durch Recycling ist eine wichtige Komponente um die Nachhaltigkeit der gebauten Umwelt zu erhöhen. Das Trennen der Baurestoffe und die nachgelagerten Aufbereitungs- und Verwertungsketten sind – je nach Rohstoff und Zusammensetzung – allerdings mit nicht unerheblichem Energieaufwand und Emissionen in die Umwelt (CO₂) verbunden. Im heutigen konventionellen Bauwerksentwurf findet eine systematische Berücksichtigung von Recyclingaspekten nur begrenzt statt.

Das Konzept der Aufbereitung und des Wiedereinsatzes ganzer Bauwerkskomponenten kann eine sinnvolle Ergänzung zum Recycling sein. Der Ansatz vermeidet die zeit- und energieaufwändigen Prozesse, die mit dem Recycling zu wieder flexibel einsetzbaren Bauausgangsstoffen einhergehen. *Design for Disassembly* als Planungsprinzip [12] ist mit dem Anspruch verbunden, den ressourcenschonenden Umbau und Ausbau, die Revitalisierung und die Wiederverwendung nicht nur der eingesetzten Baustoffe, sondern ganzer Tragwerkskomponenten zu ermöglichen. Abb. 1 zeigt, dass *Design for Disassembly* das Konzept *Design for Recycling* erweitert, um von bisher statischen zu dynamischen Bauwerkslebensläufen mit höheren Lebensdauern zu gelangen.

Sequentieller Materialeinsatz



Zirkulärer Materialeinsatz

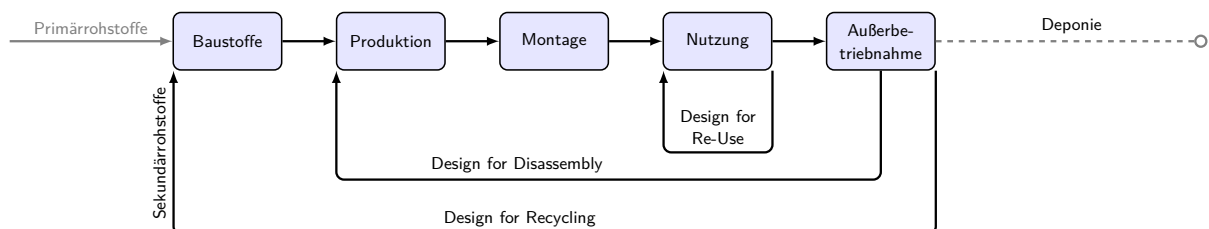


Abb. 1 Sequentieller und zirkulärer Materialeinsatz, entwickelt nach [12].

Der an das Fertigteilprinzip angelehnte Ansatz basiert auf einer möglichst modularen Bauweise. Hierbei steht allerdings nicht die kosten- und zeiteffiziente Massenherstellung im Vordergrund, sondern das Potential des kontrollierten Austausches von Tragwerksteilen. Lösbare Verbindun-

gen zwischen den Tragwerkskomponenten können die Flexibilität, Adaptivität und Extensibilität der *Modularbauweise* sicherstellen. Auf diese Weise lassen sich modular konzipierte Bauwerke zu einem beliebigen Zeitpunkt ihres Lebenszyklus strukturell an veränderte Rahmenbedingungen oder Umnutzungserfordernisse anpassen. Die Modularität der Konstruktionsweise und des Ausbaukonzeptes ermöglicht die nachträgliche kontrolliert ressourcenbewusste Ertüchtigung und Aufwertung der Bausubstanz als Investitionsobjekt.

Tragwerkskomponenten und Bauwerksmodule sollen in diesem Konzept aus einem Bauwerk entnehmbar und in ein anderes Bauwerk integrierbar sein. Zusätzlich ergibt sich für extrahierte Komponenten die Möglichkeit zur umfassenden Zustandserfassung, Prüfung und Wiederaufbereitung. Nicht sofort wieder einzusetzende Komponenten können eingelagert und bei Bedarf aus diesem *material and component stock* entnommen werden, was zum Geschäftsmodell der Materialbanken (*material banks*) führt [13, 14], wie es in Abb. 2 dargestellt wird.

Die Herausforderungen an eine solche ressourcenschonende Modularbauweise sind vielfältig. Zusätzlich zu Fragen nach der Dimension des architektonischen Gestaltungsraumes und der damit verbundenen Attraktivität und Akzeptanz des Bauproduktes, sind vielfältige konstruktiv-technische Aspekte zu betrachten. Die Reversibilität kraftschlüssiger Verbindungen ist hierbei zentral, insbesondere wenn solche lösbaren Verbindungen auf Basis gut recycelbarer Materialien und im Zusammenspiel mit Verbundbaukonstruktionen zum Einsatz kommen sollen. Da die Einzelkomponente unterschiedliche Einsatzszenarien erfahren kann, ist die Zustandserfassung und das Monitoring des Bauteils – für sich allein und im Verbund mit dem aufnehmenden Baukörper (*host structure*) –, sowie die Zustandsprognose und Wiedereinsetzbarkeitsbewertung zur Qualitätssicherung erforderlich. Die Zertifizierung und die Prognose der Residualperformance müssen in diesem Prozess für ganz unterschiedliche Komponententypen möglich sein und gegebenenfalls bauteilspezifische Eigenschaften (z.B. Alterung) oder bauwerksbezogene Ereignisse (z.B. außergewöhnliche Einwirkungen) mit berücksichtigen.

Design for Disassembly mit besonderem Fokus auf modulare Bauweisen, die auf oben beschriebene Weise einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft leisten, ist zur Zeit noch Gegenstand der Forschung und von konzeptioneller Natur. Es zeigt sich, dass auch hier ein umfangreicher Dokumentationsbedarf vorliegt und dieser in einigen Punkten über das Modell des Material- bzw. Gebäudepasses hinausgeht. Insbesondere der Umstand, dass Tragwerkskomponenten aus mehreren Materialien und Produkten bestehen können und andererseits in verschiedenen Baukörpern zum Einsatz kommen sollen, erfordert angepasste digitale Ansätze für das begleitende systematische Monitoring.

3 Ganzheitliches Digitales Twinning und datenbasierte Zustandsanalyse

Um das Potential der gebauten Umwelt als baustoff- und komponentenreiche *Materialbank* zu erschließen ist neben einer entsprechend vorausschauenden Planung die detaillierte Erfassung und kontinuierlich aktualisierte Beschreibung der hinterlegten Ressourcen erforderlich. Die ganzheitliche Analyse dieser Informationen ermöglicht dann die Steuerung und Optimierung des Stoffkreislaufes auf unterschiedlichen Ebenen und in seiner Gesamtheit:

- Auswertung über verschiedene Bauwerkstypologien,

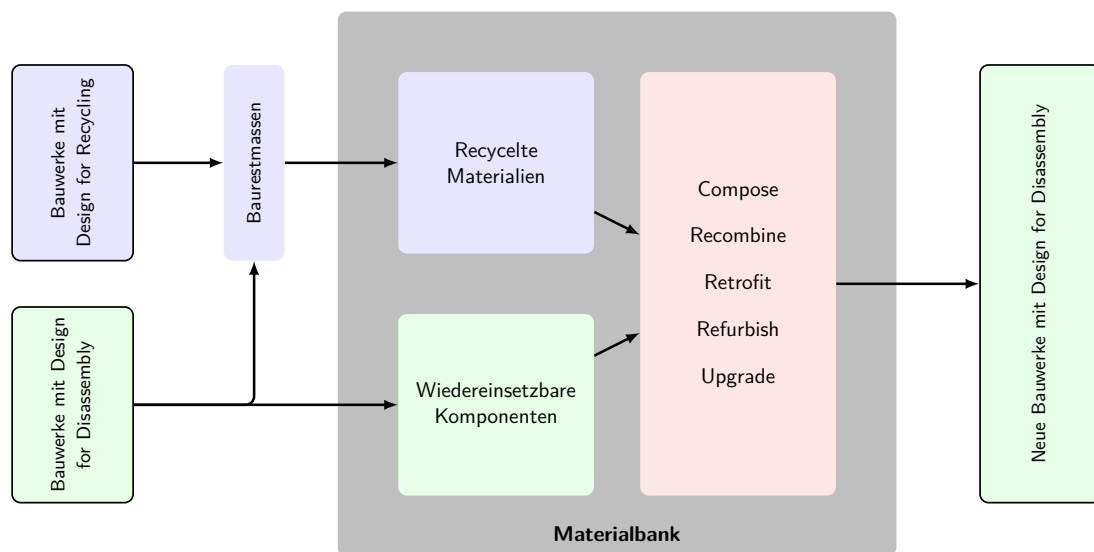


Abb. 2 Konzept der Materialbank nach *Design for Recycling/Disassembly*, entlehnt [14].

- Auswertung über verschiedene Baualtersklassen (Kohortenverfolgung),
- Wirksamkeitsmessung von Rückbau- und Recyclingtechnologien,
- energetischer und emissionsbezogener Status und Perspektive von Bauwerken,
- ökologische Leistungsbewertung von Bauwerken, Bauteilen und Bauprodukten.

3.1 Anforderungen: Zustandserfassung und -vorhersage

Ein geeignetes System zur Erfassung von Baustoffen und Bauprodukten, Komponenten und ganzen Bauwerken über verschiedene Bauwerksklassen hinweg muss eine hohe Flexibilität und Erweiterbarkeit ermöglichen, da sich Produkte und Technologien aber auch rechtliche Anforderungen mit der Zeit ändern. Es wird erwartet, dass solche Informationssysteme in der Lage sind nicht nur sehr große Datenmengen, sondern auch sehr heterogene Daten aufzunehmen und zu verarbeiten. Im zeitlichen Verlauf unterliegen einige der Informationen niedrig- oder hochfrequenten Änderungen, was ganz erhebliche Auswirkungen auf das Gesamtdatenaufkommen hat und gegebenenfalls geeignete Filter- oder Datenreduktionstechniken erforderlich macht. Auf der anderen Seite muss das Dokumentationssystem zuverlässig, nachvollziehbar und fälschungssicher sein, und zwar auf jeder seiner Ebenen.

Diese Grunderfordernisse werden ergänzt durch Anforderungsdefinitionen von Monitoring-Systemen, die in nicht wenigen Bauwerken (z.B. Brücken), Bauwerkskomponenten (z.B. tragwerksadaptive Systeme) und Haustechnikanlagen (z.B. Smart Home) bereits heute aufgeschaltet sind. Hierbei fallen sehr spezifische Daten an, die gegebenenfalls an anderer Stelle (z.B. von Services- und Monitoringsystemen) weiterverarbeitet werden und abgeleitete Informationen in aggregierter Form zurückgeben. Beispiele hierfür sind Lifecycle-Monitoring-Systeme zur Schädigungsdetektion bei Brückenbauwerken sowie Haustechnik-Systeme zur Steuerung

des Gebäudeenergieverbrauchs. Man kann davon ausgehen, dass die Erhebung und Auswertung komplementärer Informationen zur Zustandsbewertung von Bauwerken infolge der Verfügbarkeit leistungsfähiger Sensorik und drahtloser Kommunikation in Zukunft stark anwachsen wird.

Bei Vorhandensein hinreichend örtlich sowie zeitlich dichter Bauwerkssensorik ist es denkbar, auf Basis geeigneter Vorhersagemodelle Aussagen über die zukünftige Zustandsentwicklung und die verbleibende Güte von Tragwerksteilen und Gebäudekomponenten zu machen. Mit kontinuierlichen Aufzeichnungen zur Bewitterung von Betonbauteilen über die bisherige Lebensdauer eines Bauwerkes liegen ortsspezifische statistische Daten vor, die in physikalischen Prognosemodellen, unter Einbeziehung von Unsicherheiten in den Randbedingungen, fortlaufend berücksichtigt werden können.

3.2 Digitale Abbildung und Einbettung von Baustoffen, Bauteilen und Bauwerken

Um Stoffkreisläufe im Sinne der *Circular Economy* besser zu verstehen und steuern zu können, ist zunächst die Abbildung der gebauten Umwelt und der in ihr hinterlegten Materialien in einem geeigneten Informationssystem erforderlich. Der Umfang und die Komplexität der zu erfassenden Informationen erfordern den Einsatz digitaler Ansätze, die entsprechend den oben diskutierten Anforderungen in der Tiefe (Detailgrad) aber auch in der Breite (Anzahl) skalieren können.

Die fortschreitende Digitalisierung in der Bauwirtschaft unterstützt die sich aus dem Ziel der Ressourceneffizienz ergebende Anforderung, digitale Abbildungen von Bauprodukten und Bauwerken bereitzustellen. Auf der Grundlage solcher *digital twins* können Fortschritt und Qualität der Entwurfs- und Ausführungsphase aber auch die späteren Nutzungsprozesse kontinuierlich überwacht und gesteuert werden. Elektronische Materialpässe und Building Information Modelling (BIM) sind bauspezifische Umsetzungen des digitalen Zwillings.

Im Laufe der letzten Jahrzehnte wurde der BIM-Ansatz und die darauf basierenden Planungsprozesse schrittweise eingeführt, wobei ein computergeneriertes Informationsmodell des Bauwerks als Grundlage dient. BIM verspricht eine Lösung für die digitale Darstellung des Bauwerks, während der (kollaborativen) Entwurfsphase und später im Betrieb [15]. Im Vergleich zu herkömmlichen zweidimensionalen Zeichnungen enthält das digitale Gebäudemodell, das BIM zugrunde liegt, alle relevanten Daten über Materialien und Bauteile mit zahlreichen lebenszyklusbezogenen Angaben, wie Materialeigenschaften, geometrische Eigenschaften und Relationen, Mengen, Funktion, Lebensdauer, Zusammensetzung und Kosten [16]. Weiterhin können Informationen nach Bedarf erweitert werden, um die spezifischen Gebäudeanforderungen abzubilden. Moderne Anwendungen von BIM-Abbildungen schließen die automatisierte Erzeugung von Plänen und Berichten, die Strukturanalyse, Projektplanung, das Gebäudemanagement und Kostenanalysen ein [17].

Bisherige Konzepte für Materialpässe und BIM bilden die Bestandsdaten und Eigenschaften der eingesetzten Materialien und Technologien, des Energieverbrauchs und der anfallenden Emissionen, die für eine Bewertung und Steuerung des Stoffkreislaufes wichtig sind, nur auf zwei Ebenen ab: der des Bauproduktes und der des Bauwerks. Um die Wirksamkeit der oben erläuterten Recycling- und Reuse-orientierten Entwurfsstrategien zu sichern, müssen weitere

Ebenen berücksichtigt und digital abgebildet werden. Das Ziel ist es hier, insbesondere die Wiederaufbereitung und Weiterverwendung von Bauteilen und den damit verbundenen bauteil-individuellen Lebenszyklus und Einsatz in mehreren Bauwerken zu beschreiben. Weiterhin erfordert das Prinzip der Materialbank – als Koordinator von durch Abriss, Rückbau oder Umbau freiwerdenden bzw. nachgefragten Ressourcen – die Globalperspektive über die Kapazitäten und Bauteil-/Stoffströme mehrerer Bauwerke, Materiallager und Baustoffproduzenten (Verwerter und Aufbereiter).

Es wird daher vorgeschlagen, digitale Abbildungen auf mehreren Ebenen vorzusehen und so eine umfassende virtuelle Darstellung der in der gebauten Umwelt hinterlegten Ressourcen zu erhalten und mit einer systematischen Zustandserfassung und -prädiktion zu verbinden:

(A) **produktzentriert** – Bauprodukt (Materialpass, Einzelbauteil)

Auf dieser untersten Ebene werden alle Einzelbauteile und Baustoffe abgebildet und charakterisiert, die entweder solitär oder als Bestandteile größerer Bauteile bzw. Bauteilgruppen (Komponenten) vorliegen. Entsprechend der Idee des Materialpasses sind hier Kenndaten zur Zusammensetzung, zu den Eigenschaften/Güte, und das Recyclingkonzept zum Einbauzeitpunkt hinterlegt.

(B) **bauteilzentriert** – Komponente

Neben einer Beschreibung der Basisdaten (Geometrie und Initialkonfiguration) erfolgt z.B. eine Registrierung des herstellungsbedingten Energieeinsatzes und der Emissionen. Die geometrische Beschreibung sollte mit einem hohen Detaillierungsgrad (*level of detail*) erfolgen, z.B. LoD 500. Die Komponentendokumentation verweist auf die enthaltenen Bauprodukte und deren Anordnung, Menge, Einbauart und weitere relevante Attribute. Auf Basis der Registrierung und Auswertung von lokalen Sensordaten (z.B. Temperatur- und Feuchtigkeitswechsel) können komponentenspezifische Kennwerte zur Beschreibung des aktuellen Zustands und der zukünftigen Zustandsentwicklung auf Grundlage von Prognosemodellen bereitgestellt werden (z.B. Alterung, bleibende Verformungen).

(C) **bauwerkzentriert** – Meta-Komponente bzw. Bauwerk (BIM)

Diese Modellierungstiefe beschreibt das Vorhandensein der enthaltenen Komponenten und deren Relationen/Topologie untereinander und im geometrischen, strukturellen bzw. funktionalen Kontext des Bauwerks oder der Meta-Komponente. Auf dieser Ebene können geringere Detaillierungsgrade (im BIM-Kontext *level of development*) umgesetzt werden, z.B. LoD 300. Das Beschreibungssystem erfasst die eingesetzten Komponenten und registriert deren eventuelle Entnahme oder Austausch. Es kann weiterhin gewöhnliche und außergewöhnliche Einwirkungen aufzeichnen und an die enthaltenen Komponenten zu deren Zustandsaktualisierung transferieren.

(D) **ensemblezentriert** – Materialbank

Die Materialbank erfasst als digitales Register alle passiv in z.B. Komponenten und Bauwerken hinterlegten Ressourcen, aber auch alle anstehenden aktiven Stoffströme infolge von Bauaktivitäten. Bedarfsgerecht können von hier Entscheidungen zur Wiederaufbereitung, zur Lagerung und zur Verwertung von Baustoffen und Komponenten getroffen werden. Auf systemischer Ebene ist hiermit eine Analyse und Steuerung des Stoffkreislaufes aufgrund umfangreicher Daten möglich.

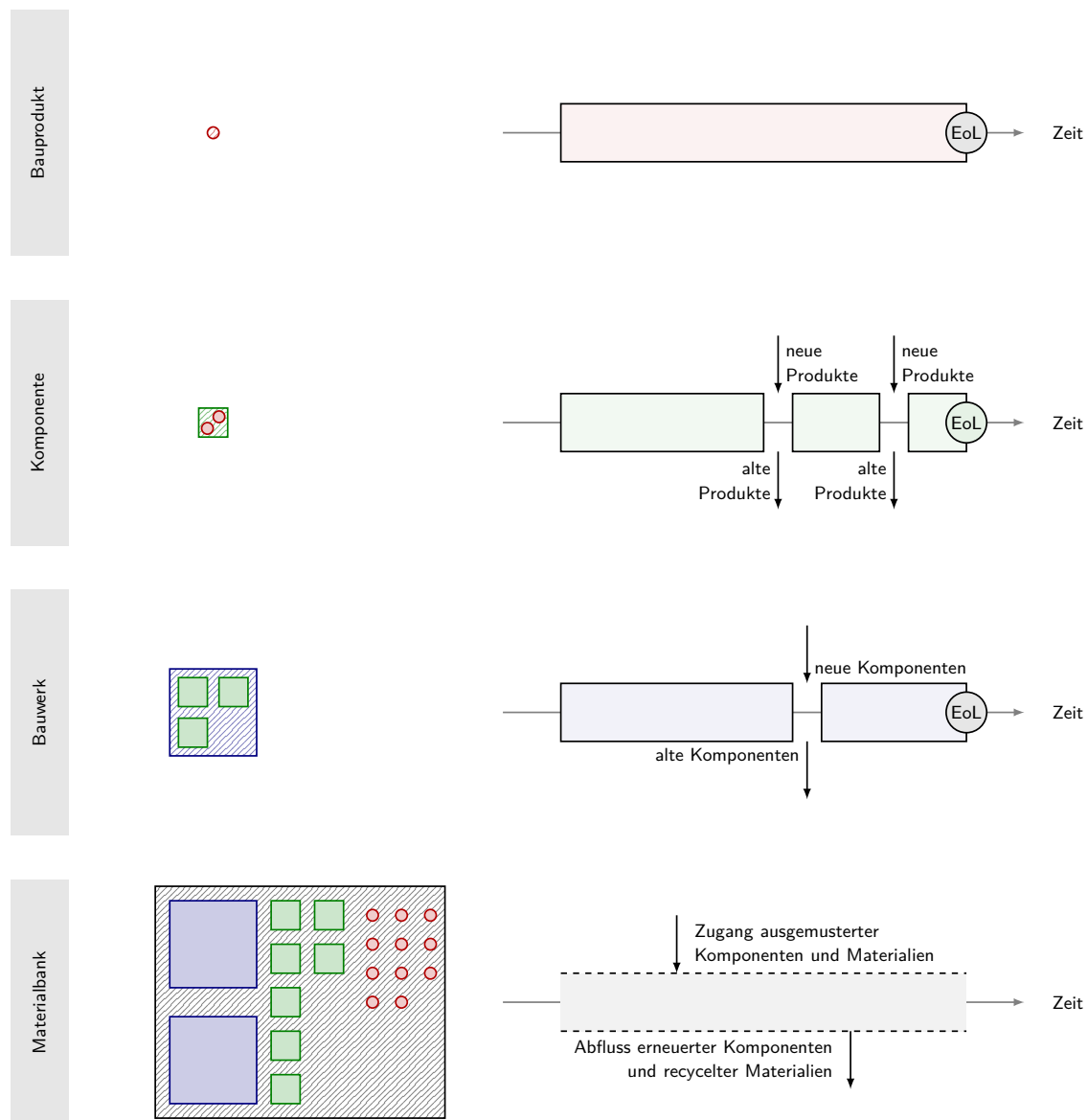


Abb. 3 Digitale Abbildung auf mehreren Ebenen.

3.3 Analyse und datenbasierte Modellbildung der Materialbank

Die vorgeschlagene hierarchische Strukturierung der Informationen kann mit statistischen Analysemethoden untersucht werden, um Baustoffströme und den Verbleib von Rohstoffen aus Unternehmenssicht oder gesamtwirtschaftlich zu quantifizieren. Relationale Datenbanken bieten hierfür einen geeigneten Ausgangspunkt und werden in vielen BIM-Applikationen umfassend eingesetzt. Statistische Ansätze basieren auf einer Vorstellung über den (mathematischen) Charakter der zu untersuchenden Phänomene.

Um noch nicht genauer spezifizierte Zusammenhänge in einem komplexen System, wie das des Bauwertstoffkreislaufes, überhaupt zu erkennen, können Methoden des maschinellen Lernens eingesetzt werden. Die oben beschriebene hierarchische Erfassung der verbauten Ressourcen

als Netzwerk auf der Basis von Graphen hat Potenzial, mit verschiedenen Ansätzen des *machine learning* untersucht zu werden [18, 19, 20]: *Node prediction* ist die Aufgabe, ein Attribut auf einem Knoten vorherzusagen, in diesem Fall könnte dies eines der Merkmale auf Knotenebene sein, z.B. der Energieverbrauch. *Graph prediction* ist die Aufgabe, ein Attribut des gesamten Netzwerks vorherzusagen. Wenn jedes Bauwerk (als BIM) selbst ein Netzwerk ist und die Daten aus mehreren Gebäuden vorliegen, könnten Eigenschaften des Netzwerks, wie z.B. der Energieverbrauch, innerer Materialwert oder der Marktwert, auf der Grundlage früherer Beobachtungen abgeleitet werden. Auf diese Weise können auch bisher unentdeckte Zusammenhänge zwischen z.B. Installationen der Haustechnik und der Betriebsbedingungen entdeckt werden. Das Hinzufügen solcher Zusammenhänge zwischen den Gebäudekomponenten kann für eine bessere Zustands- und Lebensdauerbewertung von Vorteil sein.

4 Forschungsprojekt Econ4SD

Das Projekt *Econ4SD - Eco-construction for sustainable development* ist ein Zusammenschluss von Forschergruppen des *Institute of Civil and Environmental Engineering (INCEEN)* an der Universität Luxemburg. Econ4SD wird durch einen Fonds der Europäischen Union gefördert um die Forschungs- und Entwicklungskapazitäten im Bereich des nachhaltigen Bauens in Luxemburg zu stärken und um Konzepte für ressourcenschonende sowie energieeffiziente Bauweisen zu entwickeln. Hierbei wird die gesamte Lebensdauer des Bauwerks: Planung/Vorfertigung/Errichtung, Unterhalt/Wartung und Rückbau/Wiederverwertung berücksichtigt und eine ganzheitliche Herangehensweise durch Integration der Schlüsselbereiche: Flexible Architektur, Baustoffe und Tragverhalten, digitale Bauinformationssysteme sowie Energie- und Emissionseffizienz angestrebt. Das Forschungsvorhaben wird in Zusammenarbeit mit verschiedenen europäischen Universitäten und Unternehmen der Bauwirtschaft in Luxemburg durchgeführt.

Die insgesamt sieben Teilprojekte adressieren komplementäre Aspekte dieses Themenfeldes, insbesondere die Modularität, Flexibilität, Adaptivität und Ausbaufähigkeit von Bauteilen aus den Baumaterialien Beton, Holz und Stahl mit entsprechend lösbaren Verbindungen sowie die konzeptionelle Einbindung in eine baustoffliche Kreislaufwirtschaft auf Basis von Materialbanken. Die gemeinsame methodische Herangehensweise besteht aus der Kombination von numerischen, experimentellen, analytisch-konzeptionellen und datenbasierten Beschreibungs- und Bemessungsmodellen.

4.1 Modelle für Wiederverwendung und Recycling in der Architektur

Die Ziele dieses ersten Teilprojektes bestehen in der Entwicklung generischer Architekturtypologien, die die Vorfertigung von Bauteilen, eine funktionale Flexibilität über die Gebäude-Lebenszeit und das Downcycling von Baustoffen grundsätzlich ermöglichen, um den CO₂-Ausstoß und deponierelevante Baurestmengen drastisch zu reduzieren.

Eine dokumentarische Forschungsmethodik wurde angewandt, um die Möglichkeiten von modular angelegten und auf Vorfertigung beruhenden architektonischen Entwürfen zu untersuchen. Dabei kann auf einen reichen Korpus bestehender Modelle aus der Architekturgeschichte

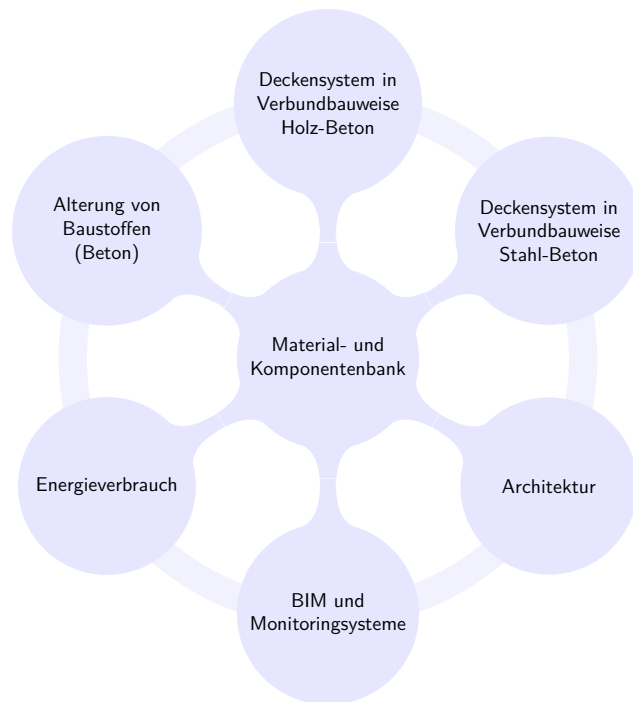


Abb. 4 Teilprojekte in Econ4SD.

zurückgegriffen werden. Verschiedene Prinzipien wurden nun in den Entwürfen von Prototypen übernommen, miteinander kombiniert und weiter entwickelt. Dabei wurden und werden Entwürfe, Zeichnungen, Pläne und 3D-Modelle entwickelt, getestet und analysiert.

Als erstes Ergebnis des Projektes wurden drei Gebäudeprototypen einer flexiblen und recyclingfähigen Architektur vorgeschlagen [21]:

- ein Zeilengebäude in Form einer Betonregalstruktur (*Slab*), in die Wohneinheiten aus Holz ein- und ausgesteckt werden können,
- ein Hochhaus mit einem flexiblen Grundriss (*Tower*), das Arbeiten und Wohnen mit komplementären Einrichtungen kombiniert, und
- eine vollständig demontierbare Struktur (*Demountable*), die als Parkhaus, Bürogebäude und anderen Nutzungen belegt werden kann.

Diese Typologien kombinieren Modularität, Vorfertigung, Flexibilität und Zerlegbarkeit, um den steigenden Bedarf an mehrfach einsetzbaren und ressourceneffizienten Konstruktionen zu decken.

Die ersten Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung einer wiederverwertbaren Architektur (*recyclable architecture*) durchführbar und realistisch ist. Der Ansatz ermöglicht die strukturelle und funktionale Anpassung im Laufe der (verlängerten) Servicezeit des Bauwerks und erhöht so die Nutzbarkeit und die Wiederverwendbarkeit des Materials.

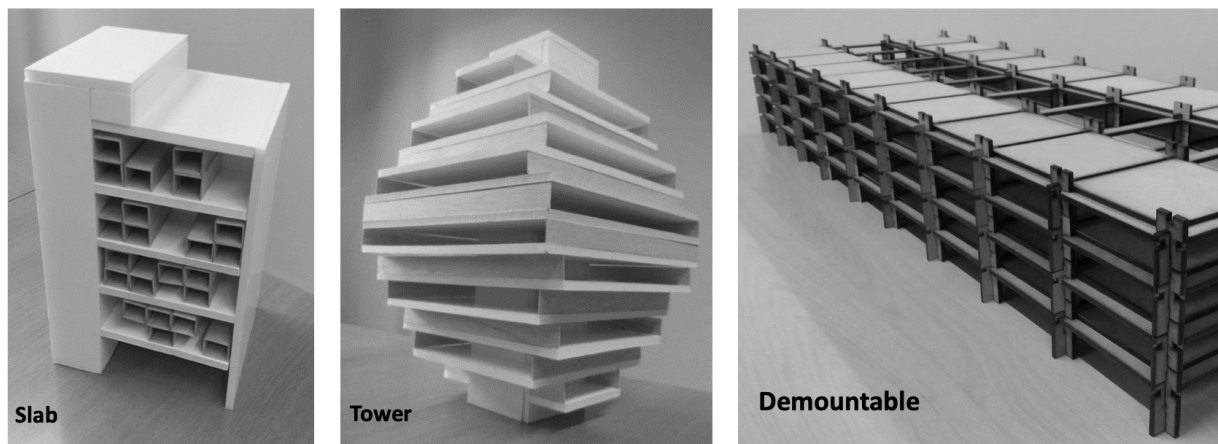


Abb. 5 Entwurfsmodelle zu den Konzepten *Slab*, *Tower* und *Demountable*.

4.2 Demontierbare und wiederverwendbare Deckensysteme in Stahlverbundbauweise

Verbundsysteme in Stahl und Beton, die auf der schubfesten Verbindung der Stahlträger mit der Betondecke (Scheibenelement) basieren, stellen eine effiziente, schlanke, ressourceneffiziente und wirtschaftliche konstruktive Tragwerkslösung dar, die eine schnelle Montage mit einem hohen Vorfertigungsgrad ermöglicht.

Zeitgenössische Verbundträgersysteme sehen i.d.R. Kopfbolzendübel oder Verbunddübelleisten als Verbundmittel vor. Diese werden auf den Stahlträgern aufgeschweißt und gehen mit dem Ortbeton des Deckensystems eine schubfeste, dauerhafte Verbindung ein. Dadurch wird die Übertragung der Längsschubkräfte in der Verbundfuge gewährleistet, so dass der Beton als Druckgurt und der Stahlträger als Zugglied aktiviert werden können. Dies führt zu einer hohen Tragfähigkeit und Steifigkeit. Diese klassischen Verbundmittel stellen jedoch eine permanente Verbindung der Materialien dar und erlauben keine zerstörungsfreie Demontage, in Konsequenz auch keine Wiederverwendung der Tragkomponenten.

Das Ziel der Forschung ist daher die Entwicklung eines neuen demontierbaren Verbindungssystems (Verbundmittels) für den Geschossbau, bei dem die Verbundwirkung als auch eine Demontierbarkeit und Wiederverwendung der einzelnen Tragkomponenten sichergestellt werden. Auf diese Weise können die Plattenelemente am Stahlprofil festgeklemmt und Längsschubkräfte durch Reibung oder/und Bolzenschub übertragen werden [22]. Die Demontierbarkeit der Bauelemente (Stahlträger und Betonplatten) ermöglicht die Modularisierung der strukturellen Komponenten von Deckensystemen im Hochbau, einhergehend mit der Ressourceneffizienz der Bauweise, wirtschaftlicher Montageabläufe sowie einer sicheren Demontage auf der Baustelle. Besondere Anforderungen resultieren dabei aus den verschiedenen Bauteiltoleranzen, die aus der Produktion der Tragelemente entstehen. Entsprechend muss das demontierbare Verbundmittel durch eine Variabilität in Längs- und Querrichtung diese Aspekte aufnehmen. Die Instandhaltung des Tragsystems wird durch einen einfachen Austausch der Tragkomponenten garantiert.

Auch wenn derzeit zumindest die Stahlträger bereits zu 100% recycelt werden, führt die Möglichkeit der mehrfachen Wiederverwendung der Elemente weit über das heutige Konzept des Recyclings hinaus und reduziert den Anteil der grauen Energie deutlich. Die Nachhaltigkeit von Verbundkonstruktionen und ihre Wettbewerbsfähigkeit können durch die innovativen En-

entwicklungen gesteigert und aus dem Materialverbrauch begründete negative Auswirkungen auf die Umwelt sowie die Produktionskosten weiter reduziert werden.

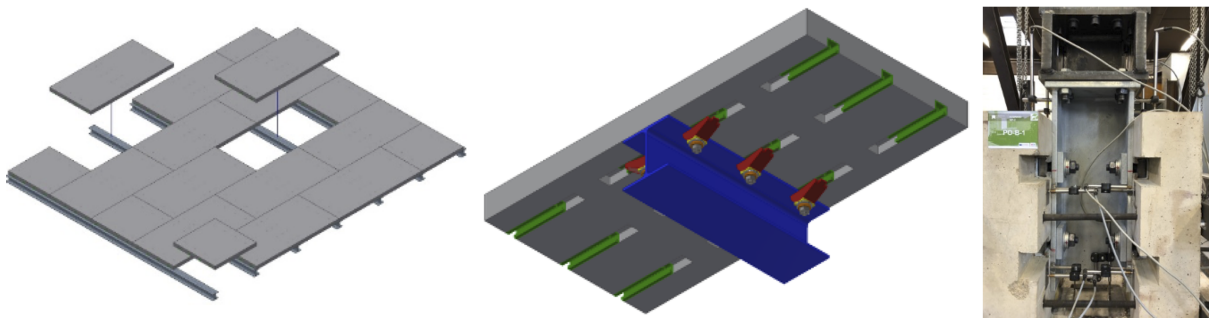


Abb. 6 Modulare Bauweise für Verbundkonstruktionen mit demontierbaren Reibungs- und Schraubverbindungen.

4.3 Modulare, dekonstruierbare und wiederverwendbare Holz-Beton-Verbundsysteme

Im Rahmen des Forschungsprojekts Econ4SD konzentriert sich dieses Arbeitspaket auf die Beantwortung der Frage: Wie kann eine reversible Verbundverbindung zwischen Beton und Holz realisiert werden, um den zukünftigen Nachhaltigkeitsbeitrag von TCC-Systemen (Timber-Concrete Composite) weiter zu verbessern und so eine teilweise Wiederverwendung sowie ein effektives Recycling beider Materialien zu ermöglichen?

Es wird ein neuartiger lösbarer Schubverbund entwickelt, welcher in der Lage ist, in belasteten Deckensystemen die erforderlichen mechanischen Eigenschaften zu gewährleisten. Dabei werden sowohl Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften sowie das Verformungsverhalten einbezogen. Die vorgeschlagene Verbindungstechnik wurde numerisch untersucht, optimiert und es wurden experimentelle Studien an Deckenelementen im verkleinerten Maßstab durchgeführt. Es wurden Materialgesetze für Finite-Element-Modelle der Holzkomponente weiterentwickelt und anhand experimenteller Ergebnisse validiert.

Zur Weiterentwicklung des lösbaren TCC-Systems und zur genaueren Untersuchung der Steifigkeit und Festigkeit der Verbindung sind Push-out-Versuche im Realmaßstab geplant.

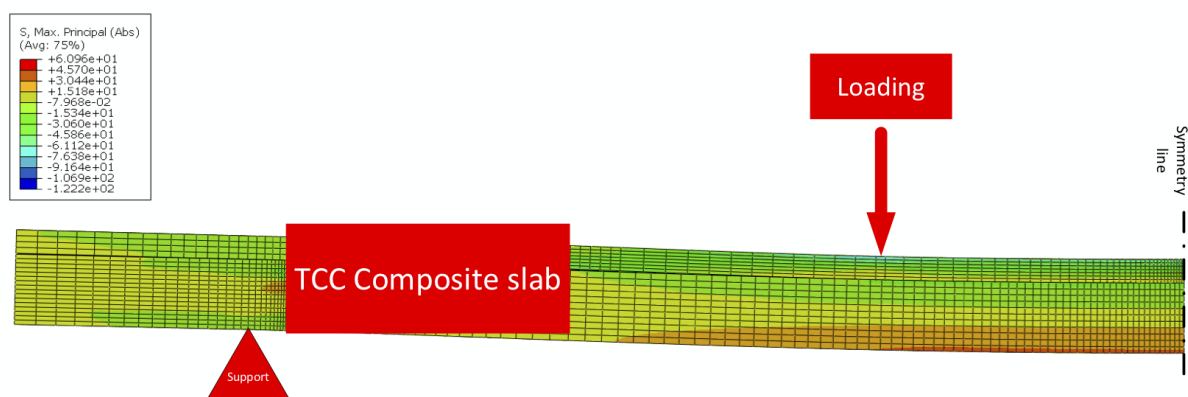


Abb. 7 Numerische Analyse einer lokal lösbaren Schubverbindung am Deckenstreifen.

4.4 Modellierung und simulationsbasierte Zustandsbewertung alternder Betonbauteile

Dieses Projekt untersucht die Bedeutung und Entwicklung von Schäden, Alterung und Degradation in Betonbauteilen. Ziel ist es, Systeme wie Building Information Modelling (BIM) zusätzlich mit Prognosen über den Zustand von Betonbauteilen während ihrer Nutzung als Teil des Bauwerks zu versorgen. Für das Konzept der (virtuellen) Materialbank ist die Einbindung physikalisch begründeter und aktualisiert-datenbasierter Zustandsvorhersagen auf der Ebene einzelner Komponenten wichtig, um eine breitere Entscheidungsgrundlage über die Weiterverwendung, die Wiederertüchtigung oder das Recycling modularer Bauteile zu erhalten.

Die typische Lebensdauer von Stahlbetonkonstruktionen umfasst mehrere Jahrzehnte. Während einer solchen langen Zeitspanne spielen viele externe Faktoren wie z.B. Umwelteinflüsse und die Belastungsgeschichte eine entscheidende Rolle für die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit von Beton. Die Vorhersage der langfristigen Materialeigenschaften von Beton (mit Hilfe der Computersimulation) kann daher wertvolle Erkenntnisse liefern und zu einer besseren Prognose der potentiellen Wiederverwendbarkeit von Betonbauteilen führen.

Zur Betonmodellierung wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene – mitunter sehr komplexe – Modelle entwickelt, die neben dem Verformungsproblem die jeweils maßgeblichen physikalischen bzw. chemischen Alterungsprozesse im Werkstoff abbilden. Während diese gekoppelten Mehrfeldmodelle in der Regel eine breite Palette von Phänomenen erfassen können, stellt das zu lösende numerische Problem große Herausforderungen dar und führt zu erheblichen Berechnungszeiten. Dies schränkt simulationsbasierte Untersuchungen und Vorhersagen von Strukturen größeren Umfangs erheblich ein. Weiterhin fehlen in kommerziellen Programmen (z.B. ABAQUS, ANSYS) oftmals die Materialmodelle für eine genauere Kriechvorhersage oder aber die angebotenen Schnittstellen für eigene Materialroutinen sind nicht für großskalige Aufgabenstellungen optimiert. Darüber hinaus erfordert die spezielle physikalische Struktur der Alterungsproblematik oft eine sehr spezifische Wahl geeigneter Löser und Vorkonditionierer, um gute parallele Skalierungseigenschaften zu erreichen, die für die Ausführung auf modernen HPC-Infrastrukturen erforderlich sind.

In diesem Teilprojekt wird ein 3D-Materialmodell für Stahlbeton basierend auf der Mikro-Vorspannungs-Verfestigungstheorie (MPS) von Bazant, dem Schadensmodell von Mazars und dem Temperatur- und Feuchtemodell von Kunzel effizient in die Finite-Elemente-Software FEniCS implementiert. Leistungsfähiger C-Code für den Zusammenbau von Residual- und Tangentenoperatoren wird mit Hilfe der automatischen Differenzierungsfähigkeiten (AD) von FEniCS automatisch abgeleitet. Die nahtlose Anbindung an eine HPC-erprobte numerische Bibliothek (PETSc) bietet eine breite Palette von Lösern für die entstehenden großen Gleichungssysteme. Die stabilisierte bikonjugierte Gradientenmethode (BiCGstab), vorkonditioniert mit einem algebraischen Mehrgitter (GAMG), bietet einen Ansatz mit nachgewiesener schwacher und starker Skalierbarkeit [23] mit Millionen von Freiheitsgraden. Das physikalische Modell und seine Implementierung sind anhand verfügbarer experimenteller Daten eines standardisierten Langzeit-Zylinderkompressions-Kriechversuchs sowie für einen 4-Punkt-Biegebalkenversuch validiert.

Die Kombination von AD, vollautomatischen Codegenerierungstechniken (z.B. FEniCS) und paralleler Skalierung für die Zustandsvorhersage von Betonbauteilen ist in der vorhandenen Literatur nicht vorhanden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist zu zeigen, dass die Methodik

Aussagen zum Status der Degradation und zur Quantifizierung/Zertifizierung der Wiederverwendbarkeit auch sehr komplexer Komponenten ermöglichen kann, für die die bisher vorhandenen Berechnungsansätze praktisch begrenzt sind.

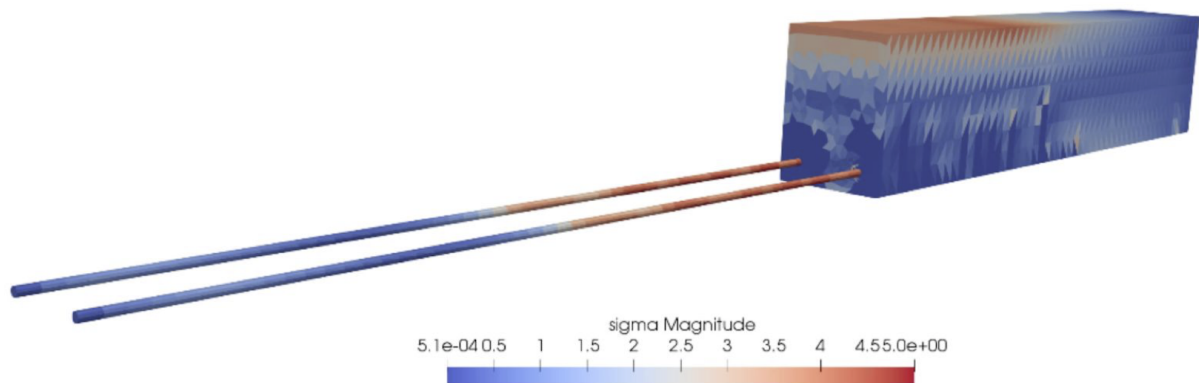


Abb. 8 Evolution of stress inside reinforcement bars after 6 years of a sustained load.

4.5 Energieeffizienz und Lebenszyklusoptimierung modularer und wiederverwendbarer Bauelemente

Bauen nahe der Null-Energie- und Null-Emissions-Qualität ist ein Hauptziel des Bausektors. Dies erfordert die Berücksichtigung nicht nur des Energieverbrauchs für Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung der gebauten Volumen, sondern auch des für die Herstellung der Baumaterialien, die Errichtung und den Rückbau des Gebäudes erforderlichen Energieaufwendungen und der damit verbundenen Umweltauswirkungen.

Mit den Fortschritten bei der Energieeffizienz in der Nutzungsphase gewinnen die relativen energetischen Auswirkungen der Baumaterialien und der baulichen Lösungen an Bedeutung. Das Hauptoptimierungspotenzial für diese verborgenen Energie- und Umweltauswirkungen (graue Energie) liegt im Recycling und in der Wiederverwendung von modularen Elementen und Strukturkomponenten. Daher sollen hier die in anderen Teilprojekten entwickelten modularen Konzepte und konstruktiven Lösungen energetisch bewertet und optimiert werden. Die erarbeiteten modular-konstruktiven Entwurfskonzepte beeinflussen wiederum den mit der Beheizung, Belüftung und Kühlung verbundenen Energiebedarf und bestimmen die Möglichkeiten unterschiedlicher gebäudetechnischer Installationskonzepte.

Die genannten Aspekte werden in einem ganzheitlichen Ansatz unter Anwendung der Prinzipien der Ökobilanz analysiert. Die Ergebnisse fließen somit iterativ in die Entwicklung neuer Gebäudekonzepte und -komponenten ein. Drei Forschungsrichtungen werden verfolgt: (A) Entwickeln und Vergleichen spezifischer technischer Lösungen für die Gebäudetechnik (HLK, Regenwasser- und Abwassersammelsysteme); (B) Abschätzen des Energiebedarfs modularer Bauweisen; und (C) den Lebenszyklus der architektonisch vorgeschlagenen Gebäudetypologien zu optimieren. Ausgehend von einem vergleichenden Überblick zu dezentralen und zentralisierten Systemen, aktiven und passiven Konzepten, aber auch von Basis- gegenüber Hightech-Lösungen erfolgt die Entwicklung von auf die Modulbauweise abgestimmten gebäudetechnischen Konzepten. Ein wichtiges Instrument ist hierbei die Durchführung von numerischen Sim-

ulationen zur Abschätzung des Energiebedarfs. Am Ende steht schließlich das Lifecycle Assessment, das mit der Lebenszyklusoptimierung abschließt.

Für das vom Architektur-Projekt vorgeschlagene *Slab Building* ist ein HLK-System für das gesamte Gebäude erstellt worden. Anhand einer umfangreichen Energiebilanzberechnung für ein Einzelmodul wurde die modulare Nutzungsoption, die dieser Bauwerkstyp bietet, zusammen mit einer Bewertung des Überhitzungsrisikos im Sommer, untersucht [24]. Die Lebenszyklusbewertung des *Slab Building* berücksichtigt den Einfluss der Errichtungs- und Rückbauphase.

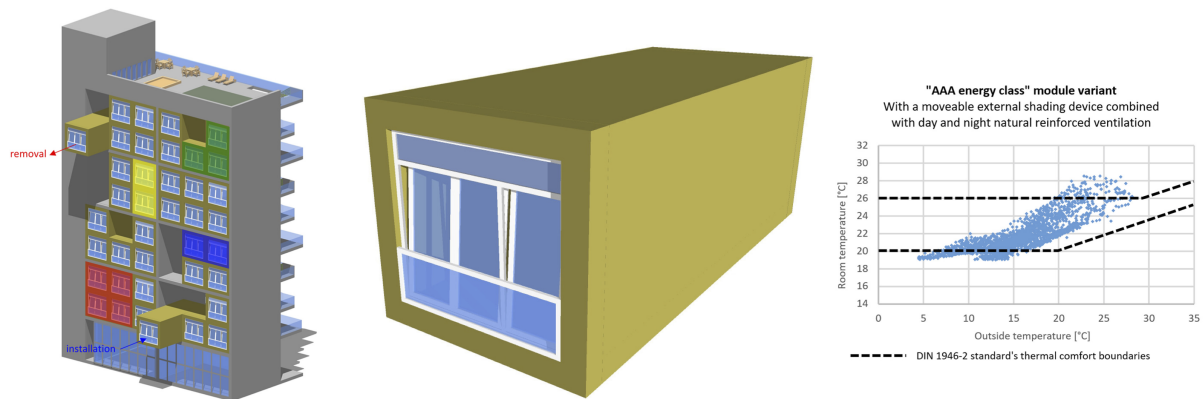


Abb. 9 Energetische Bewertung des *Slab Building* und von Varianten seiner Einzelmodule.

4.6 Integration von BIM in Konzepte für nachhaltiges Bauen

Zwei der wichtigsten Triebkräfte der heutigen Industrie sind Digitalisierung und Nachhaltigkeit. In der Bauindustrie erfolgt die Digitalisierung von Informationen und Arbeitsabläufen durch die *Building Information Modelling (BIM)*-Technologie. Mit BIM können Gebäudeinformationen innerhalb eines 3-dimensionalen digitalen Gebäudemodells modelliert, modifiziert, verwaltet und gepflegt werden. Die nachhaltigkeitsrelevanten Entwurfs- und Lebenszyklusinformationen sind prinzipiell über das BIM zugänglich.

Dieses Projekt zielt darauf ab, die treibenden Kräfte der Digitalisierung und der Nachhaltigkeit im Kontext der Bauindustrie zu untersuchen, mit besonderem Augenmerk auf die End-of-Lifecycle (EoL)-Phase von Gebäuden und der Rückbauaktivitäten. Im Zentrum der Betrachtungen stehen: (1) die Untersuchung der Einsetzbarkeit von BIM für den Rückbau, (2) eine Eignungs- und Anforderungsuntersuchung von BIM für das Planungskonzept *Design for Deconstruction* und ebenfalls (3) die Erarbeitung von Empfehlungen zur Kommunikation zwischen BIM und der digitalen Implementierung einer Material- und Komponentenbank [25].

Zusätzlich werden die Grundlagen eines Arbeitsablaufes zur Erfassung, Abrufbarkeit und Visualisierung physikalischer Zustandsinformationen bzw. -vorhersagen, z.B. der Alterung von Bauteilen, in aktuellen kommerziellen BIM-Werkzeugen entwickelt und exemplarisch die Anbindung an BIM Revit-Workflows, Dynamo- und Python-Skripte demonstriert. Hierbei werden zunehmend offene Standards, z.B. die OpenBIM Industry Foundation Classes (IFC) und darauf aufbauende Softwarelösungen eine wichtige Rolle spielen.

Ein weiterer Aspekt dieses Teilprojekts ist die Integration von BIM-, Blockchain- und Smart Contract-Technologien, um eine Werterhaltung oder -steigerung des Salvage-Wertes der verbauten oder bereits zum Recycling/Wiederverwertung frei gewordenen Materialien und Komponenten zu ermöglichen. Nach dem OECD-Prinzip der erweiterten Produzenten-Verantwortung sollen in Zukunft die Akteure in der Bauindustrie die Verantwortung für die verbauten Materialien oder Komponenten tragen. Um eine weiterführende Nutzung so attraktiv wie möglich für die Bauindustrie zu machen, muss der Wert der wiederverwertbaren Baumaterialien und Komponenten über Jahrzehnte gesichert werden. Um dies zu ermöglichen, werden Konzepte untersucht, welche auf den genannten Technologien basieren, um für diesen Prozess eine größtmögliche Transparenz zu erhalten.

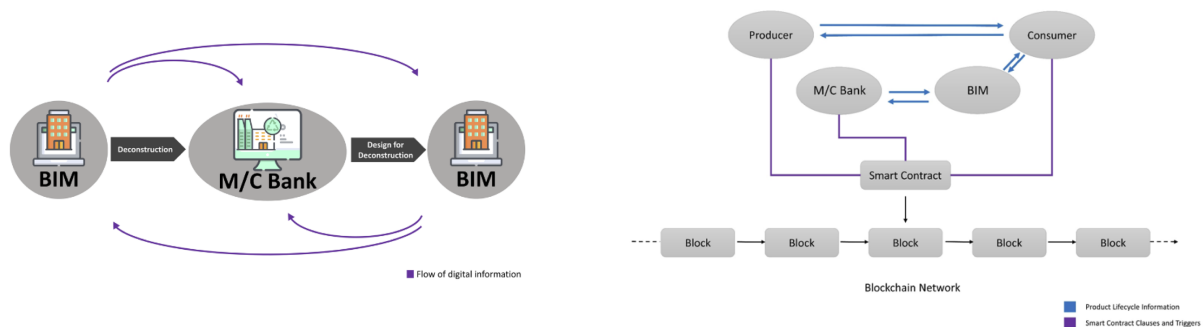


Abb. 10 Transparente Kommunikation zw. BIM/Materialbank durch Blockchain-Ansätze.

4.7 Die Material- und Komponentenbank als strategisches Instrument für eine nachhaltige Bauwirtschaft

Dieses zentral angeordnete Teilprojekt arbeitet die Rahmenbedingungen für eine Material- und Komponentenbank aus, um Wiederverwendung und Recycling von Baumaterialien bzw. Strukturkomponenten im Sinne einer nachhaltigen Bauindustrie effektiv zu verwalten und zu steuern.

Es werden hierzu gegenwärtig existierende Barrieren für breites Recycling und den Wiedereinsatz von aufbereiteten Bauteilen in der Bauwirtschaft analysiert. Die Beziehungen zwischen Materialbank und Gebäudeinformationssystemen (BIM), dem *Design for Deconstruction*, und den sich daraus ergebenden Lieferketten und Produktzyklen sind integrativ zu betrachten.

Das Projekt entwickelt eine BIM-basierte Softwareanwendung als digitale Repräsentation der konzipierten Materialbank, das die Verwaltung und Nutzung von Informationen über Baustoffe und Gebäudekomponenten im Sinne eines Stoffstrommanagements ermöglicht [26]. Das Konzept der Materialbank soll einen Beitrag zu intensiverer Wiederverwendung und effektiverem Recycling im Bauwesen ebnen, um so in der Gesamtheit dem langfristigen Ziel nachhaltigen Bauens für künftige Generationen gerecht zu werden.

Danksagung

Das Projekt *Eco-construction for Sustainable Development* (Econ4SD) wird durch das Programm *Investissement pour la croissance et l'emploi* des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (2014-2020) unterstützt (Fördervereinbarung 2017-02-015-15).

Die Teilprojekte werden von Marielle Ferreira Silva, Jovan Fodor, Hooman Eslami, Michal Habera, Michael Rakotonjanahary, Arghavan Akbarieh und Laddu Bhagya Jayasinghe an der Universität Luxemburg bearbeitet und ihre Zuarbeit zu diesem Beitrag wird dankend erwähnt.

Literatur

- [1] *Urban Mining – Ressourcenschonung im Anthropozän*, Umweltbundesamt, 2017. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf
- [2] Schiller, G; Müller, F.; Ortlepp, R. *Mapping the anthropogenic stock in Germany: Metabolic evidence for a circular economy*, Resources, Conservation and Recycling, 123, 93-107, 2017.
- [3] *Nachhaltiges Bauen und Wohnen – Ein Bedürfnisfeld für die Zukunft gestalten*, Umweltbundesamt, 2010. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3952.pdf>
- [4] Winterstetter, A.; Laner, D.; Rechberger, H.; Fellner, J. *Integrating anthropogenic material stocks and flows into a modern resource classification framework: Challenges and potentials*, Journal of Cleaner Production, 133, 1352-1362, 2016.
- [5] Huang, W.L.; Lin, D.H.; Chang, N.B.; Lin, K.S. *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*, Resour. Conserv. Recycl., 37, 2337, 2002.
- [6] *Stahl und Nachhaltigkeit. Eine Bestandsaufnahme in Deutschland*, Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2018. https://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2018/03/StahlNachhaltigkeit_2017_web_FINAL.pdf
- [7] Helmus, M; Randel, A. *Sachstandsbericht zum Stahlrecycling im Bauwesen*, Bauforum Stahl, 2014. <https://bauforumstahl.de/upload/documents/nachhaltigkeit/Sachstandsbericht.pdf>
- [8] Emmanuel, R. *Estimating the environmental suitability of wall materials: Preliminary results from Sri Lanka*, Build. Environ., 39, 1253-1261, 2004.
- [9] *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016*, Kreislaufwirtschaft Bau, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., 2018. <http://kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/Bericht-11.pdf>
- [10] Luscuere, L. M. *Materials Passports: Optimising value recovery from materials*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management, 170:1, 25-28, 2017.
- [11] Kibert, C.J. *Deconstruction: The start of a sustainable materials strategy for the built environment*, Ind. Environ., 26, 8488, 2003.
- [12] Durmisevic, E. *Transformable Building Structures: Design for Disassembly as a Way to Introduce Sustainable Engineering to Building Design & Construction*, Ph.D. Thesis, TUDelft, Delft, The Netherlands, 2006.
- [13] Konsortium BAMB: Buildings as Material Banks, <https://bamb2020.eu>
- [14] Cai, G.; Waldmann, D. *A material and component bank to facilitate material recycling and component reuse for a sustainable construction: Concept and preliminary study*, Clean Technol. Environ. Policy, 21, 2015–2032, 2019.

- [15] Crotty, R. *The Impact of Building Information Modelling: Transforming Construction*, Routledge, 2016.
- [16] Epstein, E. *Implementing Successful Building Information Modeling*, Artech House, 2012.
- [17] Sacks, R; Eastman, C.; Lee, G; Teicholz, P. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, Wiley, 2018.
- [18] Zhou, J.; Cui, G.; Zhang, Z.; Yang, C.; Liu, Z.; Wang, L.; Li, C.; Sun, M. *Graph Neural Networks: A Review of Methods and Applications*, arXiv, 2018, <http://arxiv.org/abs/1812.08434>
- [19] Bacciu, D.; Errica, F.; Micheli, A.; Podda, M. *A Gentle Introduction to Deep Learning for Graphs*, arXiv, 2019, <http://arxiv.org/abs/1912.12693>
- [20] Bronstein, M. M.; Bruna, J.; Lecun, Y.; Szlam, A.; Vandergheynst, P. *Geometric Deep Learning: Going beyond Euclidean data* IEEE Signal Processing Magazine, 34:4, 18-42, 2017.
- [21] Ferreira Silva, M; Jayasinghe, L. B.; Waldmann, D.; Hertweck, F. *Recyclable Architecture: Prefabricated and Recyclable Typologies*, Sustainability, 12, 1342, 2020.
- [22] Fodor, J.; Schäfer, M. *Investigation in reusable composite flooring systems in steel and concrete based on composite behavior by friction*, in Vorbereitung, 2020.
- [23] Habera, M; Zilian, A. *High-performance modeling of concrete ageing*, Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 19, 2019.
- [24] Rakotonjanahary, M; Scholzen, F.; Waldmann, D. *Summertime overheating risk assessment of a flexible plug-in modular unit in Luxembourg*, Sustainability, under review.
- [25] Akbarieh, A.; Jayasinghe, L. B.; Waldmann, D.; Teferle, F. N. *BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review*, Sustainability, 12, 2670, 2020.
- [26] Jayasinghe, L. B; Waldmann, D. *Development of a BIM-Based Web Tool as a Material and Component Bank for a Sustainable Construction Industry*, Sustainability, 12, 1766, 2020.