Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/0005-6650-2026-22

Bauingenieur Beitrag auf Eng-

Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel

R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock

ZUSAMMENFASSUNG Am Siemens Campus Erlangen wurden Büroneubauten von äquivalenter Architektur, Kubatur und Nutzung aber unterschiedlicher Konstruktionsweisen des Tragwerks errichtet. Diese bieten die einmalige Chance der systematischen vergleichenden ökologischen Bewertung der Konstruktionsweisen hinsichtlich der Grauen Emissionen. Zu diesem Zweck wurde in einem Forschungsprojekt zwischen der Siemens Real Estate (SRE) und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) jeweils ein realisiertes Referenzgebäude als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau detailliert in einer Ökobilanzierung anhand des Indikators GWP-total analysiert. Der Vergleich der Grauen Emissionen umfasste die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site, Cradle to Grave und Cradle to Cradle. Auf Gebäudeebene lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks sowie der direkt zugehörigen Ausbauelemente. Bemerkenswert ist, dass sich die Grauen Emissionen auf Gebäudeebene im Referenzszenario Cradle to Cradle zwischen den drei unterschiedlichen Konstruktionsweisen um weniger als 10 % unterscheiden. Im Szenario Cradle to Grave werden im Kontrast dazu die Effekte der Wahl der Systemgrenzen bei Ökobilanzierung mit Holzbaustoffen deutlich. Neben den Rohdecken, Wänden, Fundamenten, Fenstern und dem Dachaus- und -aufbau zeigten sich auch die Bodenaufbauten als emissionsintensive Bauteilgruppe. Auf Basis der Auswertungen konnten fundierte und praxisrelevante Ergebnisse und Empfehlungen zur Wahl der Konstruktionsweise, aber auch zu Vergabe- und Dokumentationsanforderungen zum emissionsreduzierten Bauen abgeleitet werden.

STICHWÖRTER

Stahlbeton, Treibhausgasemissionen, Graue Emissionen, Lebenszyklusanalyse

Scientific Environmental Assessment of Three Office Building Construction Methods Based on Embodied Emissions: A Project Case Study

ABSTRACT At the Siemens Campus in Erlangen, new office buildings of equivalent architecture, cubature and use but differing structural systems were constructed. This provided a unique opportunity for systematic life cycle assessment (LCA) comparing structural systems with regard to embodied carbon. For this purpose, a research project conducted jointly by Siemens Real Estate (SRE) and the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) carried out a detailed LCA of three realised reference buildings: a reinforced concrete frame, a timber-concrete hybrid and a reinforced concrete system. The assessment was based on the total Global Warming Potential (GWP-total). The comparison of embodied carbon covered the assessment scenarios Cradle to Site, Cradle to Grave and Cradle to Cradle. At building level, the analysis focused on the structural design of the load-bearing system and the directly associated construction elements. Notably, in the Cradle to Cradle reference scenario, the embodied carbon at building level differed by less than 10 % between the three structural systems. In contrast, the Cradle to Grave scenario clearly illustrates the effects of the choice of system boundaries in LCA involving timber building material. In addition to floor slabs, walls, foundations, windows and roof structures, floor build-up was also identified as an emission-intensive component group. Based on the assessment, well-founded and practice-oriented findings and recommendations were derived regarding the selection of structural systems as well as procurement and documentation requirements for low-emission construction.

1 Einleitung

Das Unternehmen Siemens verfolgt das selbstgesteckte Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2030 und hat daher für die eigenen Gebäude über den Bereich SRE eine Richtlinie bezüglich der Nachhaltigkeit mit verschiedenen Leistungskennzahlen (KPIs) und Zielwerten festgesetzt [1]. Unter dem KPI „Embodied Carbon“ gibt die SRE für Entwicklungs- und Bauprojekte sowie umfangreichere Sanierungen einen maximalen Ausstoß Grauer Emissionen von 300 kg CO_2-Äq./m²NGF bei Bürogebäuden als Zielwert für das Gesamtgebäude aus. Im Vergleich dazu wird in der DAfStb-Richtlinie „Treibhausreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ [2] als Referenzzustand für Büro- und Nichtwohngebäude 320 kg CO_2-Äq./m²BGF, allerdings be-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

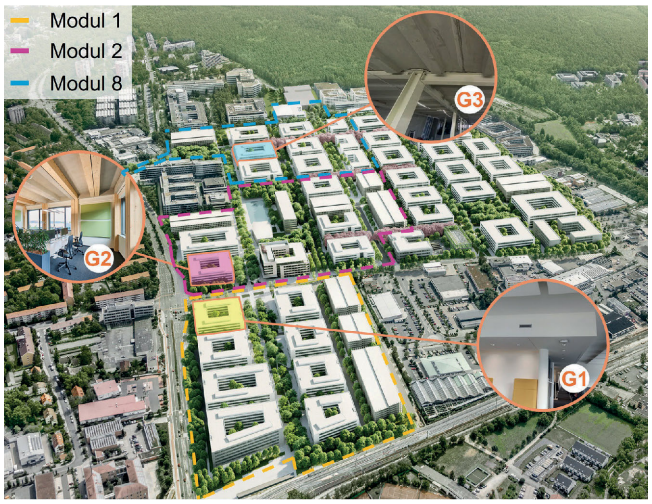

Bild 1. „Module“ und untersuchte Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen *Foto: Siemens Real Estate, bearbeitet*
Fig. 1. “Modules” and analyzed buildings G1 to G3 at Siemens Campus Erlangen *Source: Siemens Real Estate, edited*

zogen auf die Bruttogrundfläche (BGF) ausschließlich für die tragende Konstruktion ausgegeben.

In einem gemeinsamen Forschungsprojekt zwischen SRE und dem Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion der RPTU wurden im Zeitraum Januar bis September 2024 drei Büroimmobilien mit dem Schwerpunkt Graue Emissionen vergleichend ökobilanziert und wissenschaftlich ausgewertet. Die untersuchten Gebäude wurden innerhalb der letzten Dekade (2016 bis 2025) am Siemens Campus Erlangen errichtet und weisen eine identische äußere Architektur, Kubatur und Nutzung sowie dieselbe Auftraggeberin auf. Dies bietet die außergewöhnliche Gelegenheit, die Grauen Emissionen verschiedener Konstruktionsweisen des Tragwerks in real umgesetzten Bauvorhaben zu vergleichen, die sämtliche über Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit hinausgehende baulichen Anforderungen sowie nutzungsspezifische Aspekte berücksichtigen. Die sonst übliche variable Architektur und Nutzung, die den Vergleich von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken erschwert [3-6], ist aufgrund der besonderen Konstellation eliminiert.

2 Projektvorstellung

2.1 Siemens Campus Erlangen

Mit Beginn der Bauarbeiten im Jahr 2016 legte Siemens den Grundstein zur umfassenden Umgestaltung des Siemens Areals in Erlangen. Bis in die 2030er-Jahre entsteht auf einer Gesamtfläche von über 54 ha mit einem Investitionsvolumen von einer Mrd. Euro ein offener und lebendiger Stadtteil als Siemens Campus Erlangen (SCE) [7]. Die drei untersuchten Gebäude wurden jeweils von verschiedenen Generalunternehmern in unterschiedlichen Bauabschnitten, den sogenannten „Modulen“, umgesetzt. Die Umgestaltung des Campus wird in einem Masterplan in 8 „Module“ untergliedert und unterliegt den in der internen Richtlinie festgelegten Nachhaltigkeitsanforderungen [1]. Über die bloße Wiederverwendung von Materialien hinausgehend, etablieren die neuen Vertragsbestimmungen einen Paradigmenwechsel im Bauwesen: Erstmals werden von Auftraggeberinnenseite Zielwerte definiert und für „Modul 8“ sogar vertraglich festgelegte CO_2-Emissionsziele hinsichtlich der Grauen Emissionen für die Durchführung des Bauvorhabens vereinbart.

Entsprechend der chronologischen Reihenfolge startete die Firma Max Bögl mit dem „Modul 1“ im Jahr 2016, welches 2020 fertiggestellt wurde. Gleichzeitig begann der Hochbau für „Modul 2“ durch die Firma Zech Bau. Die Fertigstellung erfolgte 2022. „Modul 8“ wurde von 2024 bis Ende 2025 von der Firma Goldbeck errichtet und befand sich somit während der Bilanzierungsstudie noch im Bau. Trotz nahezu identischer architektonischer Rahmenbedingungen unterscheiden sich die untersuchten Gebäude in den drei „Modulen“ grundlegend in ihrer Konstruktionsweise.

2.2 Forschungsprojekt zum ökobilanziellen Vergleich

Die reine Variation der Konstruktionsweise der Gebäude am SCE erlaubt es erstmals, die konstruktiven Unterschiede unabhängig von der Architektur zu bewerten und sichtbar zu machen. Zur Bilanzierung der drei exemplarisch gewählten Gebäude arbeitete die RPTU in enger Abstimmung mit der SRE zusammen. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die wissenschaftliche Bewertung der Konstruktionsweisen mit dem Ziel, emissionsreduzierende Optimierungspotenziale zu identifizieren und Empfehlungen auszusprechen.

Der Untersuchungsrahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts sowie die vorliegende Veröffentlichung beschränken sich auf die „Module“ 1, 2 und 8 des SCE, woraus je ein Gebäude bilanziert wurde. Aufgrund der begrifflichen Überschneidung mit dem Modulbegriff der Ökobilanz werden die untersuchten Bauwerke im Folgenden als Gebäude 1, 2 und 3 (G1, G2, G3) bezeichnet. G1 und G2 bezeichnen die Gebäude aus den gleichnamigen „Modulen“, G3 das Gebäude aus „Modul 8“. **Bild 1** zeigt die Lage der „Module“ sowie untersuchten Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen.

Um die Methodik der Ökobilanzierung und die daraus resultierenden Ergebnisse angemessen in den Gesamtkontext einordnen zu können, werden in **Tabelle 1** und Abschnitt 2.3 die zentralen Parameter sowie die konstruktiven Unterschiede von G1, G2 und G3 dargestellt. Zur vereinfachten Übersicht werden die Unterschiede in der Konstruktionsweise von G1 bis G3 zusätzlich anhand der schematischen Darstellung der Regelgeschossgrundrisse und Schnitte der Deckensysteme gezeigt (**Bild 2**). Bei mehrgeschossigen Gebäuden verantworten diese mit circa 40 % [8] den Großteil an tragwerksbedingten Emissionen und sind folglich von hoher Relevanz für die Bilanzierung und den gebäudeübergreifenden Vergleich [9-11].

2.3 Konstruktionsweisen

2.3.1 G1: Stahlbetonskelettbau

Bei G1 wurde das Tragwerk in Stahlbeton-Skelettbauweise ausgeführt. Charakteristisch für das von Max Bögl errichtete Gebäude sind Stahlbeton-Flachdecken in Ortbetonbauweise. Diese wurden schlaff bewehrt und mit einer Betondruckfestigkeitsklasse C30/37 sowie einer Dicke von 24 cm ausgeführt. Dabei wurden alleine bei der Ausführung der Stahlbeton-Flachdecke bereits 3 100 m³ Beton verbaut.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

Tabelle 1. Konstruktionsweise und Materialeinsatz bei G1 bis G3
Table 1. Design and material used in G1 to G3

	Stahlbetonskelettbau (G1)	Holz-Beton-Hybridbau (G2)	Stahlbetonsystembau (G3)
Rohdecken	Stahlbetonflachdecke h = 24 cm. Deckenquerschnitt im Gebäude einheitlich. ca. 7 500 t Beton (C30/37), 430 t Bewehrung.	Cree-Deckenelemente (HBV) h_{ges} = 40 cm, h_c = 13 cm, h_t = 30 cm, Deckenquerschnitt variiert im Gebäude, ca. 5 200 t Beton (C40/50), 290 t Holz (GL28c) und 360 t Bewehrung.	Flach – und Rippendecken, h_{Rippe} = 25 bzw. 32,5 cm, h_{Platte} = 10 cm. Teilweise vorgespannt. Deckenauflagerung auf Stahlprofil-Unterzügen. Ca. 4 800 t Beton (C40/50), 280 t Bewehrung und 250 t Stahlunterzüge
Bodenaufbau	ca.10 500 m² Hohlböden; ca. 430 m³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 10 900 m² Hohlböden; ca. 358 m³ Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen.	ca. 12 930 m² Hohlböden; ca. 1 900 m² Zement- und CAF-Estrich; Oberbeläge Teppich, Linoleum und Fliesen, bituminöse Abdichtung
Stützen	273 Stahlbetonstützen (C20/25 – C40/50); Abnahme der Festigkeit mit zunehmender Geschosshöhe. Ca. 250 t Beton.	172 Stahlbetonstützen (C35/45 oder C50/60) sowie 94 Holzstützen (GL25h).	103 Stahlbetonstützen (C50/60), 480 Stahlstützen im Innenbereich und 337 Stahlstützen zum Anschluss der Außenwand. Ca. 100 t Beton und 200 t Stahlprofile. Für die Stahlstützen ist eine Brandschutzverkleidung berücksichtigt.
Wände	FT-Außen- und Innenwände, ergänzt durch vereinzelte Ortbetonwände. Attika als Halbfertigteil (Doppelwand). vereinzelt Kalksandstein-Mauerwerkswände im Keller. Festigkeitsklassen C35/45 und C40/50. ca. 3 600 t Beton.	ca. 501 t Cree-Holzwandelemente (zementgebundene Spanplatten, KVH, BSH, OSB3) sowie ca. 2 400 t Stahlbetonwände in den aussteifenden Bereichen der Treppenhäuser mit den Festigkeitsklassen C30/37 und C50/60.	Wände überwiegend in Systembauweise errichtet. Bei den Außenwänden sind die Fertigteile mit Stahlstützen ergänzt. Insgesamt ca. 2 760 t Beton (C30/37 und C35/45) sowie 230 t KS-Mauerwerk.
Wanddämmung	Reine Außendämmung auf Massivwänden als Teil der Alcobond Fassade (Außenansicht) & des WDVS (Fassade Innenhof). Mineralfaserdämmung 16-18 cm.	Cree-Wandelemente (Ständerbauweise) mit Dämmmaterial gefüllt, zusätzliche Dämmschicht auf Wandinnenseite. WDVS auf Außenseite (Bereich Innenhof).	18 cm Mineralwolldämmung der Kassetten der Außenfassade. Zum Innenhof hin ebenfalls Kassettendämmung (kein WDVS).
Gründung	Block- & Balkenfundamente, Bodentrasse & Bodenplatten. Fun-damente unter EG C30/37 und unter KG C35/45. Ca. 3 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Überwiegend Streifenfundamente der Festigkeitsklassen C30/37, C35/45 und C40/50. Ca. 4 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.	Einzel- und Streifenfundamente aus Beton der Festigkeitsklasse C25/30. Ca. 2 000 t Beton. Gegen Erdreich Perimeterdämmung aus XPS.
Treppen	ca. 145 t Beton C40/50.	ca. 145 t Beton C30/37.	ca. 225 t Beton C35/45.
Fenster	ca. 2 500 m² Fensterfläche.	ca. 1 935 m² Fensterflächen.	ca. 2 220 m² Fensterfläche.
Fassadenoberfläche	ca. 3 100 m² Aluminiumverbundbleche & ca. 1 300 m² WDVS-Oberfläche (abzgl. Wandaußendämmung).	ca. 3 200 m² Aluminiumverbundbleche und ca. 1 300 m² WDVS-Oberfläche.	ca. 5 350 m² Aluminiumverbundbleche (einheitliche Fassade, kein WDVS).
Abhangdecken	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel mit Akustik- und Kühlfunktion.	Deckenkoffer, bereichsweise abgehängte Decken und Deckensegel, Bandrasterdecken, Mineralfaserplatten, GK-Platten und Feuchtraumplatten.	Mineralfaser-Deckenplatten, Gipskarton-Platten oder gelochte Gipskarton-Platten. Im EG zusätzlich gelochte Metallrasterdecken.
Dachausbau	Gründach (Mineralwolle, Dicht- & Schweißbahnen, Filterflies, Rundkies 16/32, Einschichtsubstrat, Foamglas, PVC-Folie, Drainagematten), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründach (analog G1), Dachaufbauten zur Einhausung TGA aus Stahlprofilen.	Gründachaufbau (analog zu G1), Dachaufbauten für TGA aus Stahlprofilen und Trapezblech.

2.3.2 G2: Holz-Beton-Hybridbau

Das von der Firma Zech Bau errichtete G2 ist durch ein hybrides Holz-Beton-Verbund-Rippendeckensystem und Holztafelwände charakterisiert. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C30/37, C40/50 und C50/60. Im Cree-Deckensystem (HBV) sind 13 cm dicke Stahlbetonplatten mit Brettschichtholzträgern der Güte GL 28c verbunden. Die Stützen sind einreihig ausgeführt. Insgesamt wurden bei G2 etwa 2 170 m³ Beton im Deckensystem eingebaut.

2.3.3 G3: Stahlbetonsystembau

Charakteristisch für G3 ist die von der Firma Goldbeck angewandte Systembauweise mit teilweise vorgespannten Stahlbeton-Flach- und -Rippendecken und integrierten Stahlunterzügen so-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

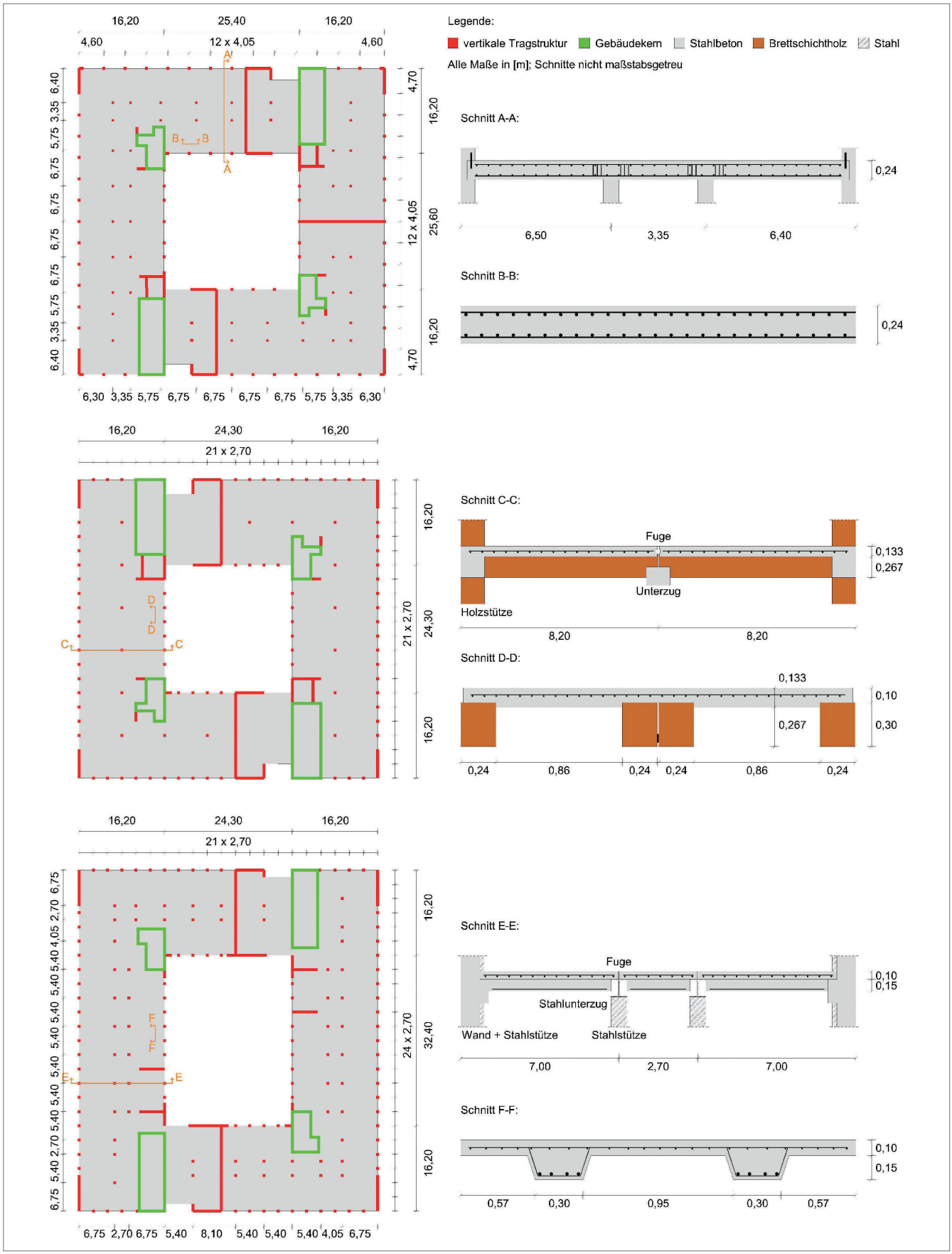

Bild 2. Grundrisse und Schnitte der Gebäude G1 (oben), G2 (Mitte) und G3 (unten) schematisch *Grafik: RPTU*
Fig. 2. Schematic floor plans and sections of buildings G1 (top), G2 (middle) and G3 (bottom) *Source: RPTU*

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

wie Stahlstützen. Die Betondruckfestigkeitsklassen variieren zwischen C35/45, C40/50 und C50/60. Insgesamt kamen etwa 2 000 m³ Beton im Deckensystem zum Einsatz.

3 Ökobilanzierung der Grauen Emissionen

3.1 Definition des Untersuchungsziels

Die Ökobilanzierung der drei Gebäude wurde in Anlehnung an die Grundsätze und Anforderungen nach DIN EN ISO 14040 [12] und DIN EN ISO 14044 [13] durchgeführt. Als Ziel der Bilanzstudie wurden als signifikanteste Größe im Zusammenhang der Klimaverträglichkeit [14] die Grauen Emissionen betrachtet. Letztere werden im Rahmen der Studie in Anlehnung an [8] definiert als diejenigen Treibhausgasemissionen, welche durch die Herstellung, Errichtung und Entsorgung der Gebäude, nicht aber deren Betrieb, anfallen und in CO_2-Äquivalenten angegeben. Somit war eine Bewertung der Gebäude G1 bis G3 in Bezug auf den KPI „Embodied Carbon" der SRE möglich [1]. Die Bilanzierung der Grauen Emissionen erfolgte anhand des Indikators Global Warming Potential (GWP-total) als Summe der Anteile aus fossilem und biogenen GWP sowie des GWP aus Landnutzung und Landnutzungsänderung (engl. „land use and land use change", GWP-luluc). Die Auswertung der Ökobilanz zielte auf die Identifikation der relevantesten GWP-Treiber unter den Bauteilgruppen sowie zwischen den Gebäuden verschiedener Konstruktionsweisen ab. Hierdurch werden sowohl konstruktions- als auch materialspezifische Handlungsempfehlungen für die SRE als Bauherrin abgeleitet, um die Grauen Emissionen ihrer Büroimmobilien weiter senken zu können als auch die Effektivität ihrer diesbezüglichen KPIs zu reflektieren.

3.2 Festlegung des Untersuchungsrahmens

3.2.1 Bilanzierte Bauteile

Der Untersuchungsrahmen umfasste initial die möglichst vollständige Bilanzierung sämtlicher Bauteile in jedem der drei Gebäude, wobei sich entsprechend der verfügbaren qualifizierten Datengrundlage Einschränkungen ergaben. Im Sinne valider Ergebnisse sowie einer Sicherstellung der objektiven Vergleichbarkeit der bilanzierten Gebäude wurde der Betrachtungsfokus auf den Rohbau gelegt und nur ausgewählte und direkt mit dem Rohbau im Zusammenhang stehende Positionen des Ausbaus in die Berechnung einbezogen. Auf die Bilanzierung der TGA wurde verzichtet, da diese bei den Beispielprojekten nicht in direktem Zusammenhang mit den baukonstruktiven Unterschieden der verglichenen Gebäude steht. Zudem galt es zu vermeiden, dass der Gesamtvergleich durch im TGA-Bereich teilweise nur bedingt vergleichbare Gebäudedokumentation verfälscht würde.

Auf Bauteilebene wurden innerhalb aller Gebäude einheitlich folgende elf Bauteilgruppen bilanziert: Rohdecken, Bodenaufbauten, Stützen, Wände und Wanddämmung, Gründung, Treppen, Fassadenoberfläche, Fenster, Abhangdecken, Dachausbau. Die Rohdecken umfassten dabei sämtliche tragenden Deckenplatten mit zugehörigen Unterzügen beziehungsweise Rippenteilquerschnitten sowie die tragende Platte als oberen Gebäudeabschluss im Flachdach. Folglich enthielt die Kategorie Dachausbau noch die Abdichtung, Dämmung und Schüttungen auf dieser obersten Platte sowie die im Stahlbau ausgeführte Einhausung auf dem Dach befindlicher TGA. Unter der Kategorie Gründung wurden sowohl Einzel- und Streifenfundamente als auch Bodenplatten zuzüglich der Dämmung gegen das Erdreich erfasst. Die Wanddämmung umfasste sämtliche vertikal angeordnete Dämmung an oder in Wandquerschnitten, auch die Dämmung im WDVS, dessen übrige Bestandteile zusammen mit den Aluminiumpaneelen in der Fassadenoberfläche subsummiert wurden. Da in G2 Holzständerwände ausgeführt sind, deren Dämmung teilweise innerhalb des Wandquerschnitts liegt, zeigt sich die direkte Zuordnung der übrigen Wandaußendämmung zur Fassade im Sinne der Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen als nicht zweckmäßig. Die Kategorie Bodenaufbauten enthielt alle Estriche und Beläge oberhalb der Rohdecken oder Bodenplatten.

3.2.2 Angesetzte Lebensdauer der Bauteile und Lebenszyklusphasen

Die Komplexität in der Bilanzierung mehrschichtiger Bauteile trug dazu bei, dass auf den materialspezifischen Ansatz von Austauschhäufigkeiten während des Gebäudelebenszyklus bewusst verzichtet wurde. Entsprechend des Untersuchungsziels sollte der Betrachtungsfokus auf die Konstruktionsweisen der Neubauten und die damit verbundenen Grauen Emissionen gelegt werden. Es ist anzumerken, dass sich das Gesamtergebnis der Ökobilanzierung bei Berücksichtigungen von Bauteilaustauschen verändert.

Alle ökobilanziellen Berechnungen mit Blick auf das GWP-total wurden jeweils vollständig für die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (Lebenszyklusphasen A), Cradle to Grave (Lebenszyklusphasen A-C) und Cradle to Cradle (Lebenszyklusphasen A-D) nach [15] für eine Lebensdauer von 50 Jahren durchgeführt.

3.2.3 Verwendete Datensätze

Insbesondere für die Bilanzierung der Materialien der Tragstruktur – Beton, Betonstahl, verschiedene Holzwerkstoffe und Baustahl – wurden generische Datensätze aus der Ökobaudat, Version 2023, zum Ansatz gebracht [16]. Die generischen Datensätze, die einer theoretischen Modellierung entstammen und nicht auf Industriedaten basieren, enthalten aufgrund der Modellierungsunsicherheit je nach Vollständigkeit Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % auf die GWP-Anteile GWP-fossil und GWP-luluc [17]. Auf durchschnittliche und repräsentative Datensätze wurde lediglich mangels Alternativen vereinzelt zurückgegriffen. Nur bei den Materialien des Ausbaus und konkreten Bauprodukten, die aufgrund ihrer speziellen Funktionen verbaut wurden, wie beispielsweise Akustik-Deckensegel mit Kühlfunktion, wurden in Teilen auch spezifische Datensätze der jeweiligen Hersteller verwendet. Für den Vergleich der Konstruktionsweisen zwischen den drei bilanzierten Gebäuden ist der Ansatz von Datensätzen, die in gleichem Maße für ein vielfach verwendetes Material repräsentativ sind, essentiell. Andernfalls droht die Vergleichsrechnung und deren wissenschaftliche Auswertbarkeit durch spezifische Datensätze verschiedener Hersteller verzerrt zu werden. Die Bilanzierung der Fenster erfolgte vereinfacht durch Umlegung eines herstellerspezifischen Datensatzes der primär in

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

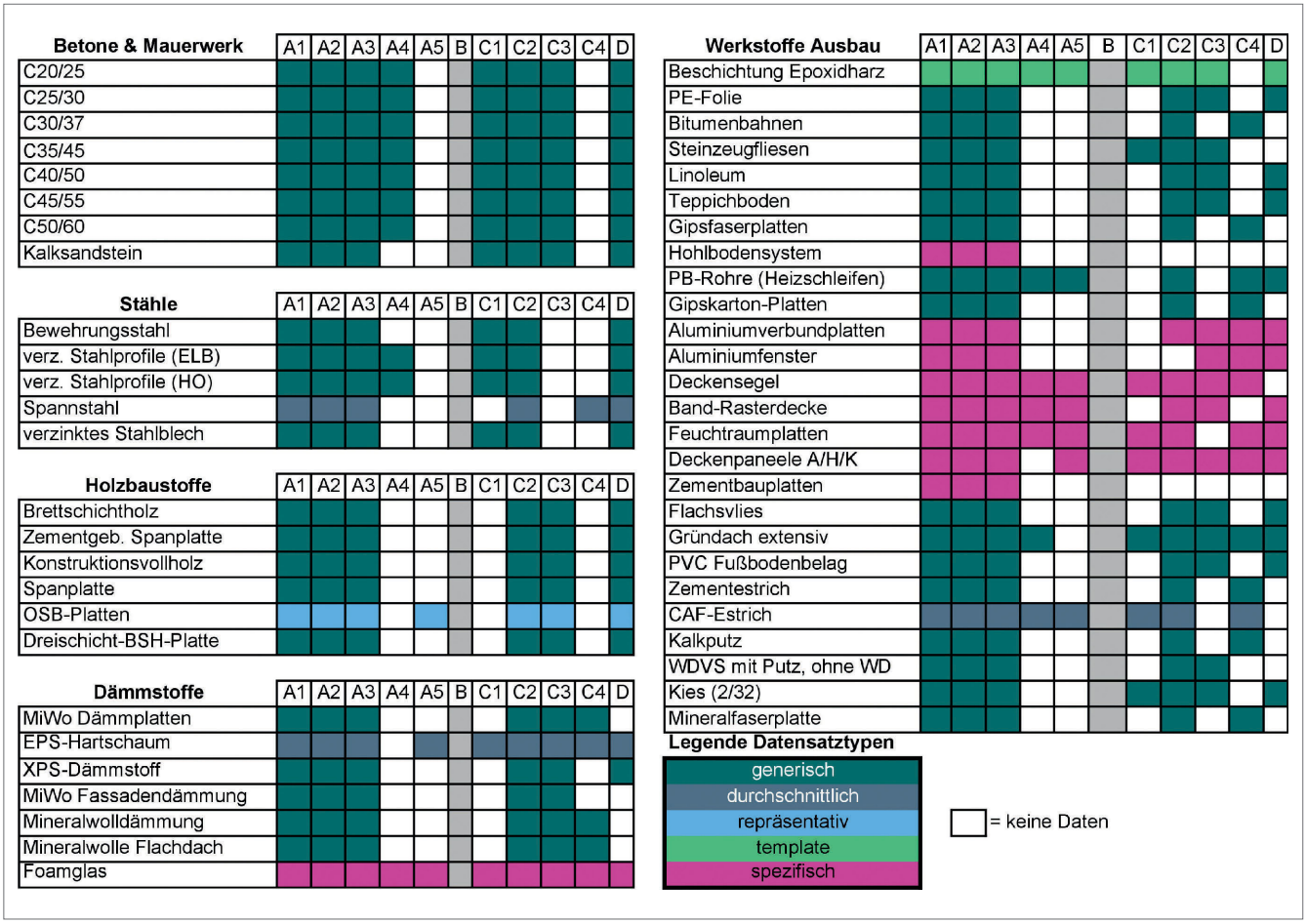

Bild 3. Qualitative Übersicht der Typen verwendeter Datensätze und enthaltener Lebenszyklusdaten *Grafik: RPTU*
Fig. 3. Qualitative overview of the types of data sets used and the life cycle data contained *Source: RPTU*

G1 verbauten Fenster auf die Fensterfläche der anderen Gebäude, da für die übrigen Gebäude kein entsprechender Datensatz verfügbar war. Anhand der Relevanz des Baustoffs Beton für das Bilanzierungsergebnis ist zu erwähnen, dass die ermittelten Betonvolumina im Rahmen der Untersuchungen ausschließlich in Abhängigkeit der angegebenen Betondruckfestigkeitsklasse differenziert wurden. Weiterführende Informationen zu den Betonrezepturen, insbesondere zu den verwendeten Zementen oder zum Einsatz von RC-Beton, lagen nicht vor. Die Datensätze für die Betondruckfestigkeitsklassen C35/45, C40/50 und C45/55 wurden mangels Verfügbarkeit in der Ökobaudat durch Interpolation zwischen den Datensätzen der übrigen Druckfestigkeitsklassen abgeleitet. Dies trägt dem Zusammenhang Rechnung, dass Zementgehalt und Betondruckfestigkeit positiv korrelieren.

Da die generischen Datensätze für die Ökobaudat als Gesamtheit vom BBSR beauftragt und vom selben Lieferanten bereitgestellt werden [18], kann von einer kontrollierten und einheitlichen Qualität der Datensätze als Vergleichsgrundlage ausgegangen werden. Zudem sind die generischen Datensätze hinsichtlich enthaltener Bilanzmodule einheitlich ausgelegt. Dennoch ist anzumerken, dass die Gesamtheit der verwendeten Datensätze in Bezug auf die ausgewiesenen Module lückenhaft ist, lediglich die Module der Herstellung A1-A3 sind in jedem Fall enthalten. Diesen Umstand sowie die Verteilung der Datensatztypen zeigt **Bild 3** auf. Hierdurch verfügt das Bilanzszenario A gegenüber A-C und A-D über eine erhöhte Aussagekraft.

3.3 Durchführung der Sachbilanz

Im Sinne größtmöglicher Transparenz wurden sowohl Sachbilanz als auch Wirkungsabschätzung aufwändig händisch in MS Excel durchgeführt, spezielle Software zur Ökobilanzierung wurde bewusst nicht verwendet. Hierdurch sollte die vollständige Nachvollziehbarkeit aller Rechenschritte und Ergebnisse gewährleistet werden. Zudem unterschieden sich die vorliegenden BIM-Modelle der drei bilanzierten Gebäude signifikant im Grad sowie der Vollständigkeit der Attribuierung und Detaillierung, sodass die Bilanzierung händisch unter ständigem Abgleich der Bilanzgrenze erfolgen musste. Primäre Grundlage der Massenermittlung waren die Planunterlagen. Sofern BIM-Modelle mit hinreichender Eignung vorlagen, konnten diese durch Export von Bauteillisten und Anwendung von Filtern für schwer überschaubare Positionen, wie zum Beispiel die Gründung, ergänzt werden. Die ermittelten Massen wurden fortlaufend anhand der Nutzfläche der Gebäude, im Vergleich zwischen den Gebäuden oder im Austausch mit Vertreter:innen der SRE plausibilisiert. Vereinzelt mussten fundierte Annahmen zu Materialgüten, insbesondere Betonfestigkeitsklassen, oder Ausführungsvarianten beziehungsweise Planungsständen getroffen werden. In der Betrachtung von Massen beziehungsweise Volumina muss bei G3 die um 14 % größere Nutzfläche beachtet werden, da G3 eine geringfügig abweichende Grundfläche aufweist. In weiterführenden Vergleichen auf Ebene des GWP pro m² korrigiert sich diese Differenz im Vergleich zu G1 und G2.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

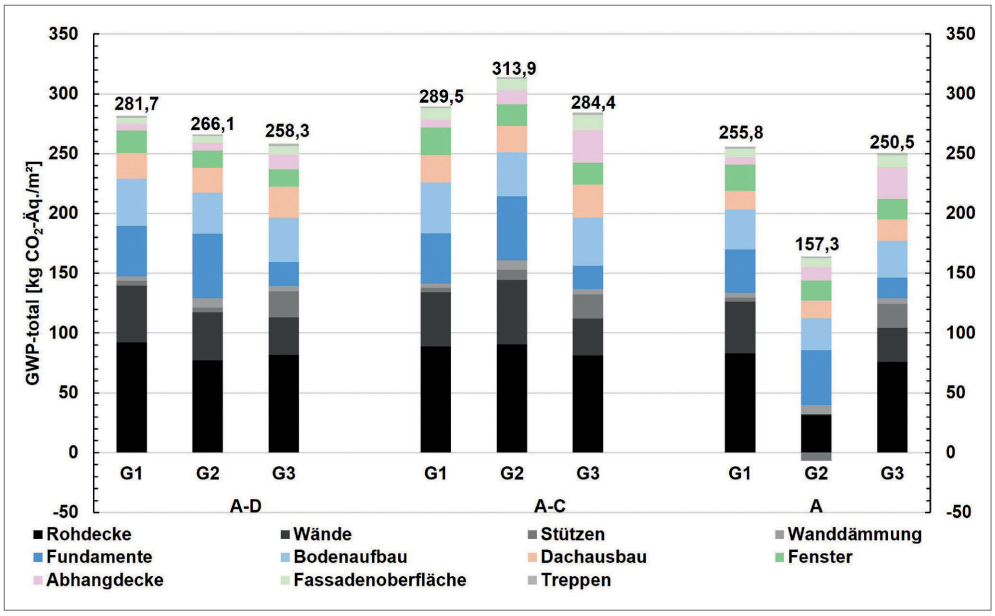

Bild 4. GWP-total pro m² Nutzfläche der Gebäude G1 bis G3, differenziert nach Bilanzierungsszenarien und Bauteilgruppen *Grafik: RPTU*
Fig. 4. GWP-total per m² of usable floor space in buildings G1 to G3, differentiated by scenarios and component groups *Source: RPTU*

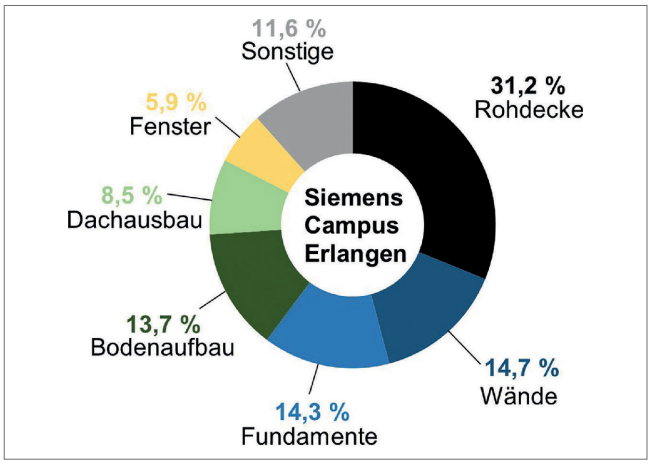

Bild 5. Anteile der Lebenszyklusphasen (A-D) am GWP-total pro m² Nutzfläche: Durchschnittswerte der Referenzgebäude G1 bis G3 *Grafik: RPTU*
Fig 5. Proportion of life cycle phases (A-D) in total GWP per m² of usable floor space: Average values for buildings G1 to G3 *Source: RPTU*

4 Ergebnisse der Ökobilanzierung

4.1 Gebäudevergleich

Die folgenden Ergebnisse zeigen den quantitativen Vergleich der Grauen Emissionen je m² Nutzfläche anhand des Indikators GWP-total unter Berücksichtigung der definierten Systemgrenzen. Die Bezugsfläche wurde für dieses Forschungsprojekt in Anlehnung an die SRE-Richtlinie [1] von Siemens und abweichend von der DAfStb-Richtlinie [2] vorgegeben. Der Gesamtgebäudevergleich in **Bild 4** umfasst alle bilanzierten Bauteilgruppen und differenziert zwischen den Bilanzierungsszenarien Cradle to Site (A), Cradle to Grave (A-C) und Cradle to Cradle (A-D).

Im Gesamtgebäudevergleich des Szenarios A-D wird ersichtlich, dass insgesamt 82 % bis 93 % des GWP-total in Summe durch die Bauteilgruppen Rockdecke, Wände, Fundamente, Bodenaufbauten, Dachausbau und Fenster verursacht werden (**Bild 5**).

Die Position Rohdecke entspricht rund einem Drittel des GWP-total (A-D). Diese sechs Positionen können damit für alle Konstruktionsweisen als relevanteste Treiber des GWP innerhalb der untersuchten Büroimmobilien identifiziert werden. Bei G3 zeigt sich zudem in allen Szenarien ein erhöhter Anteil der Stützen am Gesamtergebnis, was der primären Verwendung von Baustahl geschuldet ist. Sowohl im Szenario A-D als auch A erzielt G1 mit 281,7 beziehungsweise 255,8 kg CO_2-Äq./m² das höchste GWP-total der drei Gebäude. Das GWP von G3, welches in diesen beiden Szenarien mit dem geringsten Gesamtergebnis abschneidet, weist jedoch mit einer maximalen Differenz von bis zu 9 % (A-D) keine erhebliche Reduktion gegenüber G1 auf. Im Szenario A-D ordnet sich G2 im Mittelfeld ein, während mit den Bilanzgrenzen A-C der größte absolute GWP-Wert von 313,9 kg CO_2-Äq./m² hervorgerufen wird. Bei exklusiver Berücksichtigung der Herstellungsphase (A1-A3) wiederum halbiert sich das GWP-total von G2 auf den insgesamt kleinsten Einzelwert. Diese Inkohärenz ist durch die Erfassung der biogenen Kohlenstoffspeicherung und entsorgungsbedingten Wiederfreisetzung in Holzwerkstoffen von unterschiedlicher Vollständigkeit sowie der Anrechenbarkeit energetischer Vorteile aus der Verwertung begründet [8, 19].

4.2 Bauteilvergleich

4.2.1 Allgemeines

Im Sinne einer detaillierteren Betrachtung werden für das Referenzbilanzierungsszenario A-D nachfolgend die Grauen Emissionen der einzelnen Bauteilgruppen Rohdecken, Stützen und Wände inklusive Wanddämmung dargestellt. Als zugehöriges Zwischenergebnis der Sachbilanz wird der absolute Verbrauch der Baustoffe der Deckensysteme wiedergegeben. Anhand dieser Positionen werden die Auswirkungen auf die Grauen Emissionen der verschiedenen Deckensysteme und des daran anschließenden vertikalen Tragwerks als wesentliches Unterscheidungsmerkmal der drei untersuchten Gebäude ersichtlich. Die Wanddämmung als einzig nichttragende Bauteilgruppe wird als Bestandteil der Gebäudehülle, deren Ausgestaltung direkt von der Materialität der tragenden Wände abhängig ist, zur Betrachtung bauartspezifischer Vor- und Nachteile ebenfalls dargestellt. Im Gegensatz dazu sind die übrigen Bauteilgruppen wie zum Beispiel Bodenaufbau, Fens-

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

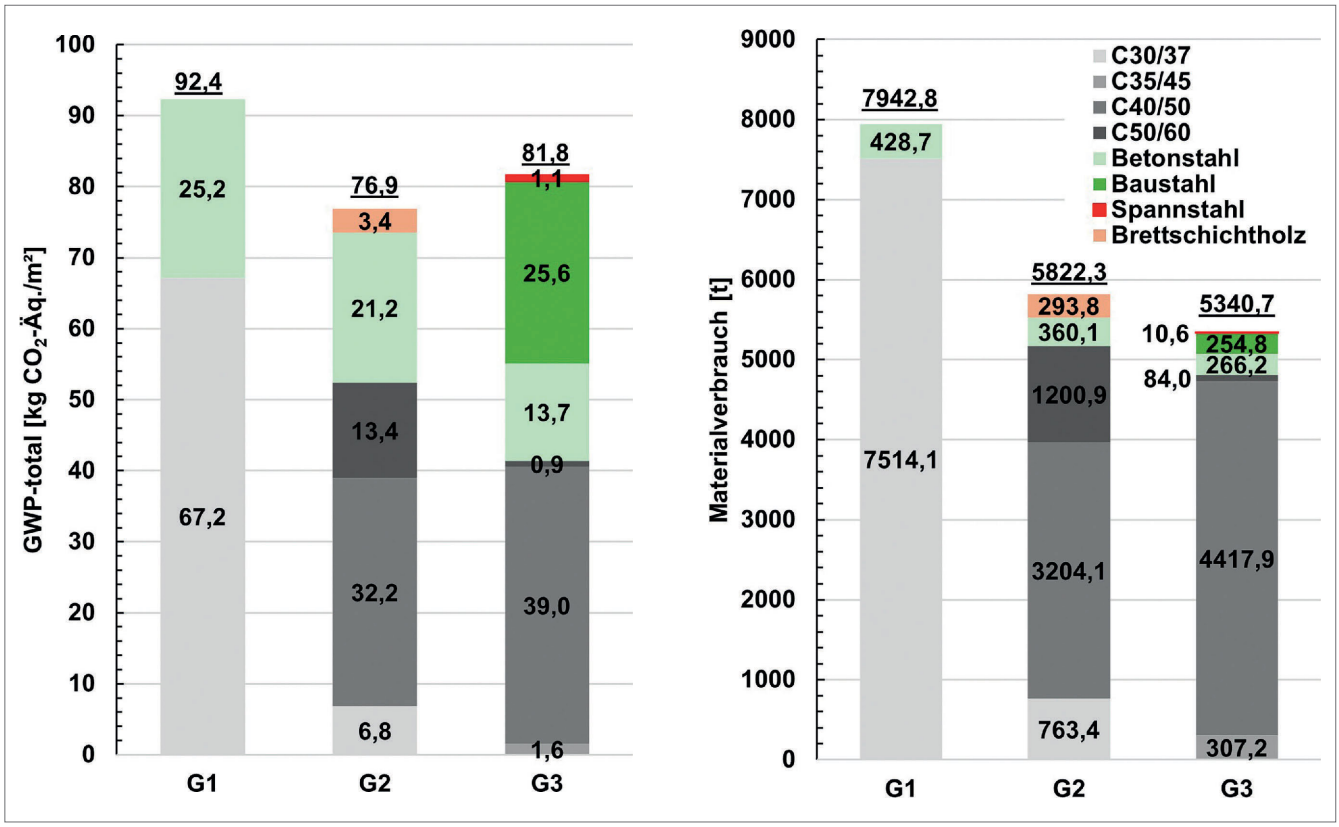

Bild 6. GWP-total (links) und Materialverbrauch (rechts) der Deckensysteme in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*
Fig. 6. GWP-total (left) and material consumption (right) for ceiling systems in buildings G1 to G3, scenario A-D *Source: RPTU*

ter, Dachausbau weitgehend unabhängig von der gewählten Tragstruktur durchgebildet und werden trotz teilweise größeren GWP-Ergebnissen nicht gesondert diskutiert. Die vorgefundenen Unterschiede in der Gründung der Gebäude entspringen primär baubetrieblichen Abwägungen und zeigen keine direkte Abhängigkeit von den verschiedenen Gesamtmassen der Gebäude auf. Folglich wird hierauf in der vorliegenden Veröffentlichung, die sich auf konstruktions- und materialspezifische Unterschiede der Gebäude konzentriert, nicht näher eingegangen.

4.2.2 Rohdecken

Die Gegenüberstellung von Masse und GWP-total am Beispiel der Deckensysteme in **Bild 6** verdeutlicht einen starken Einfluss bestimmter, emissionsintensiver Materialien. So erbringen die Rohdecken in G1 mit knapp 8 000 t signifikant mehr Masse als in den anderen beiden Gebäuden. Durch den Einsatz einer vergleichsweise niedrigen und damit zementärmeren Betondruckfestigkeitsklasse reduziert sich dieser Abstand bei Betrachtung des GWP-total in Bild 6 allerdings signifikant. In den Rohdecken von G1 wurde ausschließlich die Betonfestigkeitsklasse C30/37 eingesetzt, während in den übrigen Deckensystemen, auch bedingt durch die Fertigteilbauweise, höhere Festigkeiten bis hin zu C50/60 eingesetzt wurden. Dennoch erreicht die Ortbetonflachdecke in G1 mit 92,4 kg CO_2-Äq./m² das größte GWP-total. Obgleich in G3 trotz erhöhter Nutzfläche am wenigsten Masse in den Decken verbaut wurde, ergibt sich ein höheres GWP-total als für die schwereren Decken in G2. Als signifikanter GWP-Treiber ist hierbei der Baustahl in den Decken von G3 zu nennen, während G2 vom Anteil an Brettschichtholz (BSH) in den Holz-Beton-Verbunddecken profitiert. Im direkten Vergleich mit BSH emittiert der Baustahl bei nahezu identischer Masse mehr als das Siebenfache an CO_2-Äquivalenten.

4.2.3 Stützen

Die Analyse der Grauen Emissionen der Stützen (**Bild** 7) unterstreicht die ökologische Relevanz der Materialwahl. Trotz nahezu identischer Massen von jeweils circa 300 t in allen drei Modulen treten bei der Verwendung von Stahlstützen gravierende Unterschiede in der Bilanz auf. Die Stützen von G3 verursachen aufgrund des hohen Stahlanteils etwa das Fünffache der Grauen Emissionen im Vergleich zu den anderen Konstruktionsweisen. Die Ausbildung der Stützen in Ortbeton- bzw. teilweiser Holzbauweise in G1 und G2 führt mit rund 4 kg CO_2-Äq./m² zu einem insgesamt vernachlässigbaren Ergebnis für die Bauteilgruppe, wobei das durch Stützen verursachte GWP-total von 21,9 kg CO_2-Äq./m² auch bei Betrachtung des Gesamtgebäudes G3 eine relevante Position darstellt. Auch in diesem Vergleich wird deutlich, wie entscheidend die Wahl der Baustoffe ist und die Bilanzierung signifikant beeinflusst; auch welch großes Potenzial die Verwendung von „grünem“ Beton und Stahl hinsichtlich einer CO_2-Reduzierung haben.

4.2.4 Wände und Wanddämmung

Die vertikal abtragende Baustruktur wird neben den Stützen durch die Darstellung der Grauen Emissionen der Wände in **Bild 8** vervollständigt. G1 verzeichnet hierbei trotz zonierter Bauweise wegen der Verwendung hoher Betondruckfestigkeiten

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

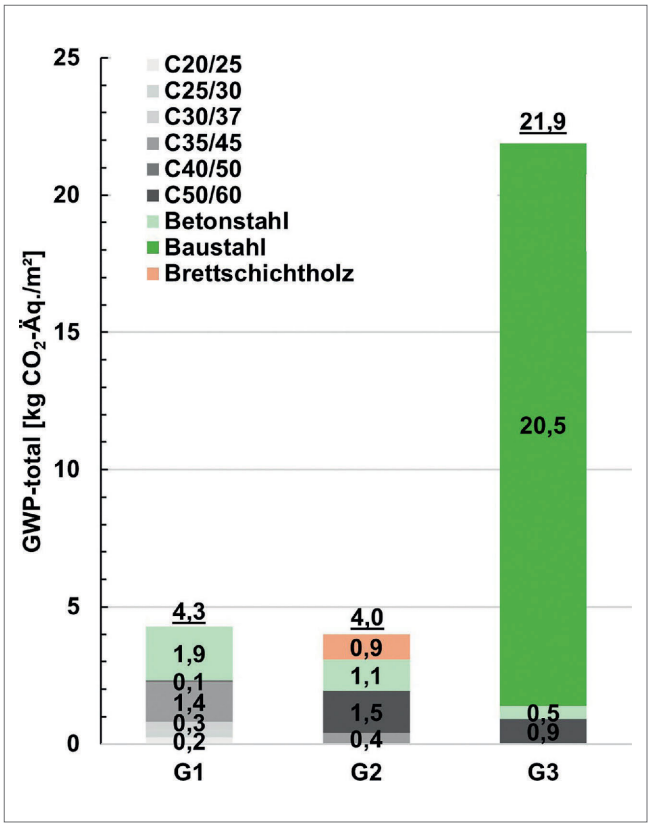

Bild 7. GWP-total der Stützen in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*
Fig. 7. GWP-total of columns in buildings G1 to G3, scenario A-D *Source: RPTU*

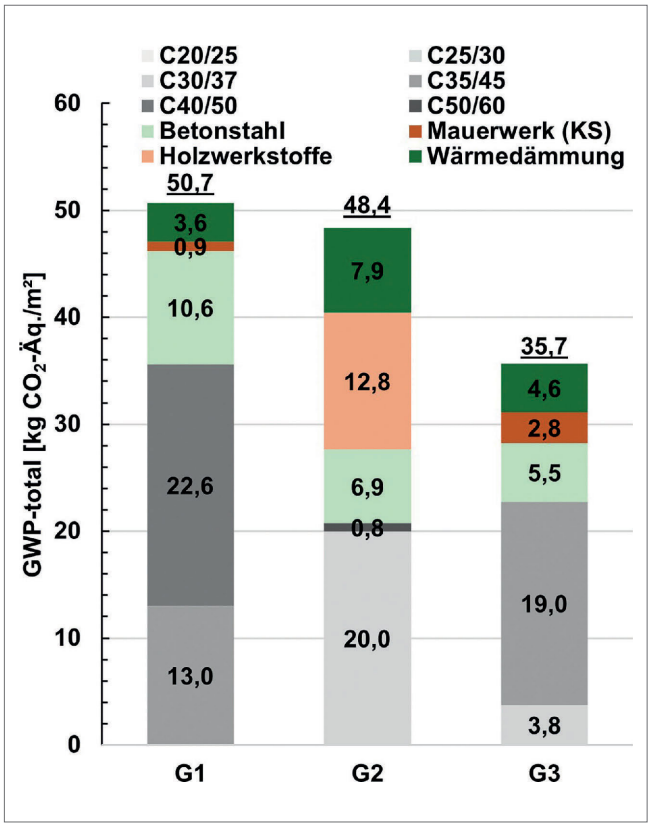

Bild 8. GWP-total der Wände inkl. Dämmung in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*
Fig. 8. GWP-total of walls incl. insulation in buildings G1 to G3, scenario A-D *Source: RPTU*

mit 50,7 kg CO_2-Äq./m² das Maximum. Die überwiegend in Holzständerwandkonstruktion ausgeführten Wände von G2 ordnen sich mit 48,4 kg CO_2-Äq./m² ins Mittelfeld ein. Stahlbetonwände sind hier vor allem im Bereich der aussteifenden Gebäudekerne vorzufinden. In G3 kommen relativ wenige Stahlbetonwände aus nur mittleren Festigkeitsklassen vor, sodass sich mit 35,7 kg CO_2-Äq./m² das Minimum dieser Position ergibt. Möglicherweise konnte bei G3 der Umfang tragender Wände durch hohe Tragfähigkeiten der Stahlstützen reduziert werden.

Die Grauen Emissionen im Bereich der Wanddämmung variieren zwischen 3,6 und 7,9 kg CO_2-Äq./m². Wie Bild 8 verdeutlicht, markiert G2 hierbei den oberen Grenzwert. Die signifikante Abweichung von bis zu 211 % resultiert primär aus den grundverschiedenen Konstruktionsaufbauten. Während G1 und G3 ein konventionelles Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit einer reinen Außendämmung nutzen, kommt in G2 eine Holzständerbauweise zum Einsatz. Bei dieser wurde der Hohlraum der Tragstruktur zusätzlich zur äußeren Dämmschicht vollständig mit Dämmmaterial gefüllt. In Kombination mit teilweise gedämmten Innenbereichen führt dies in G2 zu einem deutlich höheren Materialeinsatz, was sich unmittelbar in der Ökobilanz widerspiegelt.

5 Bewertung und Empfehlungen

5.1 Konstruktionsweisen

Die detaillierte Analyse der Grauen Emissionen der drei untersuchten Bürobauten als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau ermöglicht eine fundierte Bewertung der ökologischen Vor- und Nachteile der verschiedenen Konstruktionsweisen. Bild 4 veranschaulicht die Unterschiede innerhalb der Szenarienbetrachtung.

Bemerkenswert ist, dass trotz unterschiedlicher Konstruktionsweisen, welche auf Materialien mit grundverschiedenem Treibhausgaspotenzial beruhen, die Gesamtergebnisse auf Gebäudeebene im Schwerpunktszenario A-D um weniger als 10 % voneinander abweichen. Die Größenordnung dieser Unterschiede ist angesichts der vorgefundenen Daten- und Modellierungsunsicherheiten als sehr gering einzustufen. Folglich kann in diesem Betrachtungsszenario keine der Konstruktionsweisen mehr als eine andere empfohlen werden, vielmehr kommt es darauf an, aus welchen spezifischen Materialvarianten die jeweilige Konstruktionsweise hergestellt wird und dass diese optimiert geplant und umgesetzt werden. Die verwendeten Materialien sowie die Tragwerksplanung sind hier von zentraler Bedeutung. Beispielsweise würde die Verwendung von Ökobetonen mit reduzierten Grauen Emissionen oder „green steel“ die Gesamtergebnisse mehr beeinflussen als die Konstruktionsweise selbst. Daher werden zukünftige Entwicklungen im Bereich der Ökobetone auch darüber entscheiden, ob es aus Sicht der Grauen Emissionen vorteilhafter ist, Decken aus Ortbeton mit tendenziell geringerer Festigkeit oder Decken als Betonfertigteilen mit Anforderungen an die Frühfestigkeit herzustellen. Jedoch ist zu beachten, dass die Betone in der Studie bedingt durch die Datengrundlage lediglich anhand der Druckfestigkeitsklassen und nicht in höherer Detaillierung nach Rezepturen oder Herstellverfahren unterschieden wurden und das

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

Bilanzierungsergebnis dies somit nicht differenziert abbilden kann.

5.2 Bedeutung der Systemgrenze in Abhängigkeit der Datensätze

Die größten Schwankungen sowohl je Gebäude als auch im Vergleich der Gebäude untereinander geht bei Mitbetrachtung der Szenarien A und A-C mit der Wahl der Bilanzgrenzen einher. Beispielsweise profitieren Holzwerkstoffe ökobilanziell stark von einer erheblichen Gutschrift durch angenommene Einsparungen anderer Energieträger in Lebenszyklusphase D, welche direkt aus der ökologisch zu hinterfragenden thermischen Verwertung in Phase C3 resultiert. Zum Bilanzierungszeitpunkt können Aussagen zur Materialverwertung in der zukünftigen Entsorgungsphase sowie deren Auswirkungen auf den Energiesektor jedoch nur reine Prognosen darstellen, während zur bereits abgeschlossenen Herstellungsphase eine breite Datengrundlage vorliegt. Dahingegen enthalten beispielsweise die generischen Datensätze, welche für die Bilanzierung der Betone zum Ansatz kamen, keine negativen GWP-Anteile zur Berücksichtigung der CO_2-Aufnahme im Zuge der Karbonatisierung.

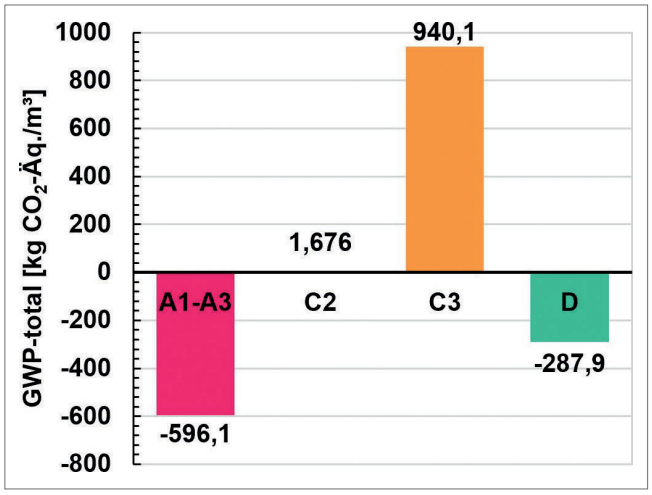

Bild 9. Gewählter generischer Datensatz für Brettschichtholz *Grafik: [20]*
Fig. 9. Selected generic data set for laminated timber *Source: [20]*

Bild 9 veranschaulicht, dass bei Aufsummieren aller verfügbaren Lebenszyklusphasen (A–D) lediglich rund 60 kg CO_2-Äq./m³ für Brettschichtholz anfallen, da sich die biogene Kohlenstoffspeicherung in A1-A3, das Freiwerden u.a. dieses Kohlenstoffs in der Entsorgungsphase C3 und die Gutschrift in Phase D nahezu vollständig ausgleichen. Berücksichtigt man nur A-C, wird lediglich die Gutschrift in D vernachlässigt und es fallen mehr als 340 kg CO_2-Äq./m³ an, was in etwa dem GWP-total eines m³ Beton C50/60 gleich kommt. Dessen GWP entstammt allerdings zu rund 95 % der Herstellungsphase A1-A3, wo sich beim Brettschichtholz ein negativer Wert ergibt, sodass auch Cradle to Site kein objektives Vergleichsszenario bei Vorkommen dieser beiden Materialien darstellt.

Ebenfalls ist eine Beeinflussung des Szenarienvergleichs durch die Wahl des Datensatzes für Betonstahl möglich. Der generische Datensatz [21] nimmt die Produktion im Elektrostahlwerk durch Einschmelzen von Schrott an, sodass bereits in der Herstellungsphase A1-A3 und nicht erst in Phase D implizit eine Gutschrift durch Recycling des Rohmaterials enthalten ist [22].

5.3 Einfluss der Datensätze

Bezüglich der Vergleichbarkeit der Endergebnisse ist zudem die Unvollständigkeit der verwendeten Datensätze hervorzuheben; Bild 3 zeigt diese Lückenhaftigkeit auf. Problematisch an nicht vorhandenen Lebenszyklusdaten ist, dass diese in die Gesamtbilanz mit Null eingehen müssen, das Bilanzergebnis also limitieren und damit gegebenenfalls eine nicht zutreffende Einhaltung einer Benchmark herbeiführen könnten. Aufgrund der Verschiedenheit der eingesetzten Materialien und damit angesetzten Datensätzen für die unterschiedlichen Gebäude und Konstruktionsweisen kann sich die Unvollständigkeit der Datensätze bestimmter Materialgruppen ungleichmäßig auswirken. Dem wird entgegengewirkt, indem schwerpunktmäßig auf generische Datensätze, die einer Qualitätskontrolle unterliegen und die relevantesten Stoffströme abbilden müssen, zurückgegriffen wurde. Bezüglich dieses Datensatztyps ist erwähnenswert, dass in deren Modellierung Sicherheitszuschläge zwischen 10 % und 30 % vorgenommen werden. Im Hinblick auf den Indikator GWP-total betrifft dies die Anteile GWP-fossil und GWP-luluc, nicht aber den biogenen Anteil des GWP. Dieser Umstand hemmt die Vergleichbarkeit der Konstruktionsweisen bei Verwendung mineralischer, metallischer und hölzerner Baustoffe, deren GWP-Anteile grundverschieden in diesen Kategorien verteilt sind. Dennoch bietet der einheitliche Ansatz generischer Datensätze eine verbesserte Objektivität und erhöhte Transparenz gegenüber der Auswahl spezifischer Datensätze, die einen abweichenden Umfang an Lebenszyklusdaten enthalten und von Interessen der Hersteller an Repräsentation und Marktanteilen geprägt sein könnten. Darüber hinaus konnte in der Massenermittlung nicht jedem Bauelement das korrekte Produkt zugeordnet werden und eine Vielzahl von Produkten verfügten noch nicht über gültige EPDs.

Abschließend ist festzuhalten, dass der im Forschungsprojekt im Sinne der Vergleichbarkeit gewählte Ansatz generischer Datensätze für die emissionstreibenden Baustoffe Beton und Stahl zur Folge hat, dass auch keine positive Auswirkung der Nutzung von ökologischeren Materialalternativen wie „Ökobetonen“ oder „green steel“ im Bilanzergebnis abgebildet werden kann. Im konkreten Projekt ist dies allerdings sehr empfehlenswert, daher können die vorliegenden Ergebnisse von den tatsächlichen Werten der analysierten Gebäude unter Verwendung projektspezifischer Datensätze abweichen. Zugleich zeigen die erheblichen Anteile insbesondere von Beton und Bau- beziehungsweise Bewehrungsstahl an den Gesamtergebnissen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen durch Materialoptimierung auf. Diese Potenziale sollten gehoben werden und können sich stärker auswirken als die geringen Unterschiede, die in den vorliegenden Untersuchungen mit Fokus auf die Konstruktionsweise erzielt wurden.

5.4 Dokumentationsanforderungen

Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, ließ die Heterogenität der BIM-Modelle bezüglich Vollständigkeit der Attribuierung die Anwendung entsprechender Bilanzierungstools nur bedingt zu. Daher sollten zukünftig bereits im Zuge von Ausschreibung und Vergabe einheitliche Dokumentationsanforderungen gestellt werden, die eine lückenlose Durchführbarkeit der Massenbilanz und

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

damit der Ökobilanzierung gewährleisten. Angaben zu den verbauten Volumina, welche aus der Projektkalkulation vorhanden sein müssen, sollten strukturiert, vollständig und entsprechend der Ausführungsplanung abgelegt werden. Insbesondere im Kontext verschiedener Betonfestigkeitsklassen, welche mit steigenden Zementgehalten erhöhten Einfluss auf das Bilanzierungsergebnis des GWP-total nehmen, müssen BIM-Modelle vollständig und stringent attribuiert werden. Auch Bewehrungsgehalte von Stahlbetonbauteilen sollten prioritär hinterlegt werden.

Da die Abgrenzung von Bauteilgruppen in Abhängigkeit des Projekts und Untersuchungsziels variieren und von den in dieser Studie verwendeten Bilanzierungskategorien abweichen können, sollten Bauteile in BIM-Modellen zudem funktionellen Bauteilkategorien und Kostengruppen zugeordnet werden. Durch die Anwendbarkeit von Filtern können Bauteillisten effektiv und vollständig erstellt und direkt der Massenbilanz zugeführt werden. Die Ergänzung einer individuellen Bauteil-ID sowie die Attribuierung der zugehörigen Plannummer beugt Missverständnissen und damit Bilanzierungsfehlern vor.

Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass in den verwendeten BIM-Modellen Attribuierungen vorhanden waren, die nicht vollständig abgerufen werden konnten. Hier gilt es, die Verwendung von Open BIM zu stärken, um die Kompatibilität der Modelle mit verschiedener Software zu verbessern. Da allerdings bereits bei verschiedenen Versionen derselben Software nach wenigen Jahren Kompatibilitätsprobleme offenkundig wurden, ist eine zusätzliche Dokumentation der wesentlichen Eigenschaften der relevantesten Bauteilgruppen, wie in Abschnitt 4 erläutert, außerhalb von Modelldateien zu empfehlen.

5.5 Empfehlungen zur Ausschreibung emissionseffizienter Gebäude

Im Vergleich der verschiedenen Konstruktionsweisen hat sich gezeigt, dass deren Auswirkungen auf das GWP-total des Gesamtgebäudes im Referenzszenario Cradle to Cradle gering sind. Dies impliziert, dass eine funktionelle Ausschreibung ohne Vorgabe einer vermeintlich ökologisch vorteilhaften Konstruktionsweise zielführend sein kann. Die vertragliche Festlegung einer GWP-Obergrenze, wie durch Siemens beim „Modul 8“ am SCE umgesetzt, motiviert alle Planenden und Ausführenden zu einer Optimierung der Grauen Emissionen bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und liefert systemimmanent eine transparente, bilanzierungsgeeignete Dokumentation der verbauten Massen und Volumina. Eine Beschränkung auf die Vorgabe des Zielwerts ohne Vorgaben zu den Konstruktionsweisen lässt dabei Raum für Optimierung in der Planung und Ausführung, die gesamtheitlich betrachtet und vergeben werden sollten und bei denen die Expertise aller Fachunternehmen genutzt werden sollte.

6 Fazit

Die vorliegende Veröffentlichung zeigt die Vorgehensweise und Ergebnisse der vergleichenden Bilanzierung der Grauen Emissionen dreier Büroneubauten unterschiedlicher Konstruktionsweisen für verschiedene Bilanzierungsszenarien anhand überwiegend generischer Datensätze aus der Ökobaudat. Die Bilanzierungsergebnisse werden auf Gebäudeebene als auch für ausgewählte, relevante Bauteilgruppen gegenübergestellt und wissenschaftlich bewertet.

Als wesentliches Resultat der vergleichenden Studie konnte gezeigt werden, dass die äußerlich nahezu identischen drei Büroneubauten in den unterschiedlichen Konstruktionsweisen Stahlbetonskelettbau, Holz-Beton-Hybridbau und Stahlbetonsystembau im Referenzszenario A-D keine signifikant verschiedenen Graue Emissionen aufweisen. Vielmehr entscheidend sind die verwendeten Materialmengen, -arten und -güten, dabei stellen Beton und Bau- bzw. Bewehrungsstahl aufgrund ihres großen Anteils am Gesamtergebnis auf Gebäudeebene aller drei Konstruktionsweisen den wesentlichen Hebel zur Senkung der Grauen Emissionen dar. Dies unterstreicht die Bedeutung der ressourcenoptimierten Tragwerksplanung mit effizienten Systemen sowie die Weiterentwicklung emissionsärmerer, ökologischerer Baustoffrezepturen oder Herstellungsverfahren [23, 24]. Im Sinne der Nutzung der Potenziale zur Reduktion der Grauen Emissionen sind daher funktionale Wettbewerbe und Ausschreibungen mit Vorgabe von GWP-Obergrenzen oder -Zielen zur tragwerksplanerischen Optimierung anstelle der Vorgabe bestimmter Konstruktionsweisen zu bevorzugen. Dabei sind spezifische Dokumentationsanforderungen zur transparenten Bilanzierung und dem Nachweis der Grauen Emissionen einzuhalten.

Entsprechend bisheriger Forschung und Erfahrungen kann auch bei allen drei analysierten Beispielgebäuden der Bauteilgruppe der Rohdecken das absolut größte GWP-total zugeordnet werden; ihr Anteil liegt im Bereich von 20 %-33 % der Gesamtbilanz. Dabei ist bemerkenswert, dass auch dem Bodenaufbau aus Estrichen und Hohlbodensystemen ein vergleichsweise bedeutender Anteil an Grauen Emissionen zugerechnet werden kann. Zusammenfassend zeigt sich, dass bereits mit den marktverfügbaren Baustoffen und Konstruktionsweisen großes Potenzial zur Senkung der Grauen Emissionen genutzt werden kann, sofern entsprechende Anreizmechanismen gesetzt werden.

DANKSAGUNG

Abschließend möchten die Autor:innen der Siemens Real Estate für das Interesse und die Mitwirkung an den Untersuchungen sowie die finanzielle Förderung des gemeinsamen Projekts danken.

LITERATUR

[1] Siemens Real Estate: Sustainability Standard – for Development, Construction & Major Renovation Projects. (Internes Dokument). Siemens AG, 2023.

[2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton. Ausgabe August 2024.

[3] *Krause, K.; Hartmann, C.; Hafner, A.:* Eine Ökobilanz, viele Ergebnisse – Ergebnis und Vergleich der Ökobilanz desselben Einfamilienhauses durch verschiedene Bearbeitende. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 326-336. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-56.

[4] *Zitterl, T.; Bauer, P.:* Ökologische Optimierung von Tragwerken im Infrastrukturbau am Beispiel von Brücken und Portalkonstruktionen. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 10, S. 317-326. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-53.

[5] *Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.:* CO_2-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-40.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

[6] *Görtz, S.; Bardenhewer, E.K.; Volkenhoff, T. et al.:* CO_2-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 03, S. 62-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-03-56.
[7] Siemens AG: Siemens Campus in Erlangen, 2025, https://press.siemens.com/de/de/feature/siemens-campus-erlangen [Zugriff am: 20.02.2026].
[8] *Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. et al.:* Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 12, S. 969-977. doi.org/10.1002/best.202100065.
[9] *Heckmann, M.; Glock, C.:* Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
[10] *Heckmann, M.; Glock, C.:* Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
[11] *Haist, M.; Glock, C.; Wiens, U. et al.:* Die neue DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton" – Meilenstein für den Klimaschutz. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 55-59. doi.org/10.1002/best.202400090.
[12] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe Februar 2021.
[13] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe Februar 2021.
[14] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Sixth Assessment Report – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/ [Zugriff am: 27.02.2026].
[15] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe März 2022.
[16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat, www.oekobaudat.de/ [Zugriff am: 24.09.2024].
[17] *Figl, H.; Kusche, O.:* Ökobaudat-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur Ökobaudat-Datenbank. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Wien, Freiburg, 2.1 Ausgabe 2023.
[18] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat Datenlieferanten, www.oekobaudat.de/anleitungen/datenlieferanten.html [Zugriff am: 20.02.2026].
[19] *Heckmann, M.:* Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen, DIN Media GmbH; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Dissertation.
[20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Brettschichtholz Nadelholz (generisch), https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c816b036-6bdf-48e5-8ef8-a76d7872f589&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de [Zugriff am: 26.02.2026].
[21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (generisch), https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21–48d7–94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de.
[22] *Bielak, J.; Ros, H.; Hiester, M.:* Ressourceneffiziente Gebäudehülle durch nichtmetallisch bewehrte Sandwichfassaden – Von der Forschung zum Pilotprojekt. *In:* Bauingenieur 101 (2026), Heft 03, S. 41-51. doi.org/10.37544/0005-6650-2026-06.
[23] *Bayer, D.; Berns, K.; Carrigan, S. et al.:* Building the Future – an interdisciplinary research initiative/Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 10, E 1-E 10. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-10-41.
[24] *Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.:* Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. *In:* Bauingenieur 100 (2025), 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.

Rebecca Müller, M.Sc.

rebecca.mueller@rptu.de

Aaron Dernbach, M.Sc.

aaron.dernbach@rptu.de

Daniel Jochum, M.Sc.

daniel.jochum@rptu.de

Erik Wagner, M.Eng.

erik.wagner@rptu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

DOI 10.37544/0005-6650-2026-22

Bauingenieur Beitrag auf Eng-

Scientific Environmental Assessment of Three Office Building Construction Methods Based on Embodied Emissions: A Project Case Study

R. Müller, A. Dernbach, D. Jochum, E. Wagner, C. Glock

ABSTRACT At the Siemens Campus in Erlangen, new office buildings of equivalent architecture, cubature and purpose but differing structural systems were constructed. This provided a unique opportunity for systematic life cycle assessment (LCA) comparing structural systems with regard to embodied carbon. For this purpose, a research project conducted jointly by Siemens Real Estate (SRE) and the University of Kaiserslautern-Landau (RPTU) carried out a detailed LCA of three realised reference buildings: a reinforced concrete frame construction, a timber-concrete hybrid construction and a systemized reinforced concrete construction. The assessment was based on the total Global Warming Potential (GWP-total). The comparison of embodied carbon covered the assessment scenarios Cradle to Site, Cradle to Grave and Cradle to Cradle. At building level, the analysis focused on the structural design of the load-bearing system and the directly associated construction elements. Notably, in the Cradle to Cradle reference scenario, the embodied carbon of the entire building differed by less than 10 % between the three structural systems. In contrast, the Cradle to Grave scenario clearly illustrates the effects of the choice of life cycle stages in LCA involving timber building material. In addition to floor slabs, walls, foundations, windows and roof structures, floor build-up was identified as an emission-intensive component group. Based on the assessment, robust and practice-oriented findings and recommendations were derived regarding the selection of structural systems, procurement methods, and documentation requirements for low-emission construction.

KEYWORDS

Reinforced concrete, Greenhouse gas emissions, Embodied emissions, Life cycle assessment

Wissenschaftlich-ökologische Bewertung dreier Konstruktionsweisen für Bürobauten anhand Grauer Emissionen am Projektbeispiel

ZUSAMMENFASSUNG Am Siemens Campus Erlangen wurden Büroneubauten von äquivalenter Architektur, Kubatur und Nutzung aber unterschiedlicher Konstruktionsweisen des Tragwerks errichtet. Diese bieten die einmalige Chance der systematischen vergleichenden ökologischen Bewertung der Konstruktionsweisen hinsichtlich der Grauen Emissionen. Zu diesem Zweck wurde in einem Forschungsprojekt zwischen der Siemens Real Estate (SRE) und der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) jeweils ein realisiertes Referenzgebäude als Stahlbetonskelettbau, als Holz-Beton-Hybridbau und als Stahlbetonsystembau detailliert in einer Ökobilanzierung anhand des Indikators GWP-total analysiert. Der Vergleich der Grauen Emissionen umfasste die Bilanzierungsszenarien Cradle to Site, Cradle to Grave und Cradle to Cradle. Auf Gebäudeebene lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der konstruktiven Durchbildung des Tragwerks sowie der direkt zugehörigen Ausbauelemente. Bemerkenswert ist, dass sich die Grauen Emissionen auf Gebäudeebene im Referenzszenario Cradle to Cradle zwischen den drei unterschiedlichen Konstruktionsweisen um weniger als 10 % unterscheiden. Im Szenario Cradle to Grave werden im Kontrast dazu die Effekte der Wahl der Systemgrenzen bei Ökobilanzierung mit Holzbaustoffen deutlich. Neben den Rohdecken, Wänden, Fundamenten, Fenstern und dem Dachaus- und -aufbau zeigten sich auch die Bodenaufbauten als emissionsintensive Bauteilgruppe. Auf Basis der Auswertungen konnten fundierte und praxisrelevante Ergebnisse und Empfehlungen zur Wahl der Konstruktionsweise, aber auch zu Vergabe- und Dokumentationsanforderungen zum emissionsreduzierten Bauen abgeleitet werden.

1 Introduction

Siemens company is pursuing its self-imposed goal of greenhouse gas neutrality by the year 2030. Consequently, SRE has established a sustainability guideline for its own buildings, defining various Key Performance Indicators (KPIs) and target values [1]. Under the KPI „Embodied Carbon“, SRE specifies a maximum target value of 300 kg CO_2-eq./m²NFA (Net Floor Area) for the entire building in development and construction projects, as well as extensive renovations. In comparison, the DAfStb guideline „Greenhouse gas-reduced structures made of concrete, reinforced concrete, or prestressed concrete“ [2] cites a reference value of 320 kg CO_2-eq./m²GFA (Gross Floor Area) for office and non-residential buildings. However, this value refers exclusively to the load-bearing structure.

In a joint research project between SRE and the Institute of Concrete Structures and Structural Design at RPTU, a comparative LCA study was conducted between January and

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

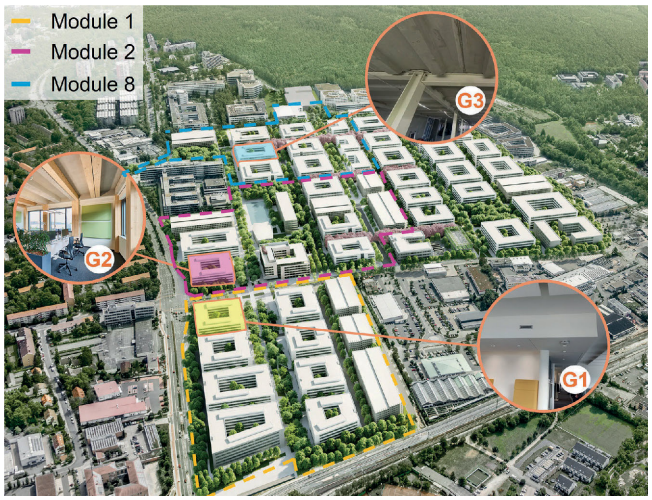

Fig. 1. "Modules" and analyzed buildings G1 to G3 at Siemens Campus Erlangen *Source: Siemens Real Estate, edited*
Bild 1. „Module" und untersuchte Gebäude G1 bis G3 am Siemens Campus Erlangen *Foto: Siemens Real Estate, bearbeitet*

September 2024 for three office properties, focusing on embodied emissions. The buildings examined were constructed at the Siemens Campus Erlangen within the last decade (2016 to 2025) and feature identical external architecture, cubature, and use, as well as the same client. This offers an extraordinary opportunity to compare the embodied carbon of different structural systems in real construction projects that account for all structural requirements beyond load-bearing capacity and serviceability, alongside specific operational and functional criteria. The typical variables of architecture and building utilisation, which often complicate the comparison of buildings and infrastructure projects [3-6], are eliminated due to this unique constellation.

2 Project Presentation

2.1 Siemens Campus Erlangen

With the start of construction in 2016, Siemens initiated a comprehensive redevelopment of the Siemens area in Erlangen. Through the 2030s, an open and vibrant district known as the Siemens Campus Erlangen (SCE) is being developed across a total area of over 54 ha with an investment volume of one billion euros [7]. The three buildings examined were realised by different general contractors in various construction phases. These construction phases are referred to as „Modules". The campus redevelopment is subdivided into 8 „Modules" within a master plan and is subject to the sustainability requirements defined in internal guidelines [1]. Going beyond the mere reuse of materials, the new contractual provisions establish a paradigm shift in the construction industry. For the first time, target values have been defined by the client side, and for „module 8", contractually binding CO_2 emission targets regarding embodied carbon have even been agreed upon for the execution of the construction project.

Following the chronological order, Max Bögl began with „Module 1" in 2016, which was completed in 2020. At the same time, structural construction for „Module 2" began by Zech Bau and reached completion in 2022. „Module 8" was constructed by Goldbeck from 2024 to the end of 2025 and was therefore still under construction during the life cycle assessment study. Despite nearly identical architectural boundary conditions, the buildings examined in the three „Modules" differ fundamentally in their construction methods.

2.2 Research project on the comparative life cycle assessment (LCA)

The sole variation in the construction methods of the buildings at SCE makes it possible to evaluate and visualize structural differences independently of the architecture for the first time. For the LCA of the three selected exemplary buildings, RPTU worked in close coordination with SRE. The focus of the investigations is the scientific evaluation of the construction methods, aiming to identify emission-reducing optimization potentials and providing recommendations.

The scope of investigation for the joint research project, as well as this publication, is limited to „Modules" 1, 2, and 8 of the SCE. From each "Module" one building was assessed. Due to the conceptual overlap with the term „module" used in life cycle assessments, the investigated structures are hereinafter referred to as building 1, 2, and 3 (G1, G2, G3). G1 and G2 refer to the buildings from the „modules" of the same number, while G3 refers to the building from „Module 8". **Figure 1** shows the location of the „Modules" and the investigated buildings G1 to G3 at the Siemens Campus Erlangen.

To properly contextualize the LCA methodology and the resulting findings, the key parameters as well as the structural differences of G1, G2, and G3 are presented in **Table 1** and Section 2.3. For a simplified overview, the differences in the construction methods of G1 to G3 are presented via a schematic representation of the standard floor plans and cross-sections of the floor slab systems (**Figure 2**). In multi-story buildings, these slab systems account for the majority of structural emissions at approximately 40 % [8] and are consequently of high relevance for LCA and cross-building comparisons [9-11].

2.3 Construction methods

2.3.1 G1: Reinforced concrete skeleton construction

For G1, the load-bearing structure was designed as a reinforced concrete skeleton construction. The building erected by Max Bögl is characterised by in-situ concrete flat slabs. These were designed with non-prestressed reinforcement, a concrete compressive strength class of C30/37, and a thickness of 24 cm. The construction of the reinforced concrete flat slabs consumed 3 100 m³ of concrete.

2.3.2 G2: Timber-concrete hybrid construction

G2, erected by Zech Bau, is characterised by a timber-concrete composite (TCC) ribbed floor system and a timber frame wall structure which is partially prefabricated. The concrete compressive strength classes vary between C30/37, C40/50, and C50/60. Within the commercial Cree slab system, which utilises TCC technology, reinforced concrete slabs with a thickness of 13 cm are connected to glued laminated timber beams with a grade of GL 28c. The columns are arranged in a single row. In total, approximately 2 170 m³ of concrete were installed in the floor system of G2.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

Table 1. Design and material used in G1 to G3
Tabelle 1. Konstruktionsweise und Materialeinsatz bei G1 bis G3

	Reinforced concrete skeleton construction (G1)	Timber-concrete hybrid construction (G2)	Systemized reinforced concrete construction (G3)
Structural floor slabs	Reinforced concrete flat slab h = 24 cm. Uniform slab cross-section throughout the building. 7 500 t concrete (C30/37), 430 t reinforcement.	Cree ceiling elements (TTC) h_{ges} = 40 cm, h_c = 13 cm, h_t = 30 cm. ceiling cross-section varies throughout the building. 5 200 t concrete (C40/50), 290 t timber (GL 28c) and 360 t reinforcement.	Flat and ribbed slabs, h_{rib} = 25 or 32,5 cm, h_{plate} = 10 cm. Partially prestressed. Slabs supported on steel-profile beams. 4 800 t concrete (C40/50), 280 t reinforcement and 250 t steel beams
Floor build-ups	10 500 m² hollow floors; 430 m³ cement and calcium sulphate (CAF) screed; finishings: carpet, linoleum and tiles.	10 900 m² hollow floors; 358 m³ cement and CAF screed; finishings: carpet, linoleum, and tiles.	12 930 m² hollow floors; 1 900 m² cement and CAF screed; finishings: carpet, linoleum, and tiles; bituminous waterproofing
Columns	273 reinforced concrete columns (C20/25 – C40/50); strength decreases with increasing floor height. 250 t concrete.	172 reinforced concrete columns (C35/45 or C50/60) as well as 94 timber columns (GL25h).	103 reinforced concrete columns (C50/60), 480 interior steel columns, and 337 steel columns for the outer wall connection. 100 t concrete and 200 t steel profiles. Fire protection cladding is included for the steel columns.
Walls	Precast exterior and interior walls, supplemented by occasional cast-in-place concrete walls. Parapet as semi-precast element (double wall). Occasional sand-lime brick masonry walls in the basement. Strength classes C35/45 and C40/50. 3 600 t concrete.	501 t Cree timber wall elements (cement-bonded particle boards, solid structural timber (KVH), glued laminated timber (BSH), OSB3) as well as 2 400 t reinforced concrete walls in the bracing areas of the stairwells with strength classes C30/37 and C50/60.	Walls predominantly built using system construction. For exterior walls, precast elements are supplemented with steel columns. Total 2 760 t concrete (C30/37 and C35/45) as well as 230 t sand-lime brick masonry.
Wall insulation	Pure exterior insulation on solid walls as part of the Alucobond facade (exterior view) & ETICS (courtyard facade). Mineral fibre insulation 16-18 cm.	Cree wall elements (timber frame construction) filled with insulation material, additional insulation layer on the inner wall surface. ETICS on the exterior (courtyard area).	8 cm mineral wool insulation of the exterior facade cassettes. Cassette insulation also facing the courtyard (no ETICS).
Foundations	Block & beam foundations, floor trenches & floor slabs. Founda-tions under ground floor C30/37 and under basement C35/45. 3 000 t concrete. Perimeter in-sulation against soil made of XPS.	Predominantly strip foundations of strength classes C30/37, C35/45, and C40/50. 4 000 t concrete. Perimeter insulation against soil made of XPS.	Single and strip foundations made of concrete strength class C25/30. 2 000 t concrete. Perimeter insulation against soil made of XPS.
Stairs	145 t concrete C40/50.	145 t concrete C30/37.	225 t concrete C35/45.
Windows	2 500 m² window area.	1 935 m² window area.	2 220 m² window area.
Facade surfaces	3 100 m² aluminium composite panels & 1 300 m² ETICS surface (excluding exterior wall insulation).	3 200 m² aluminium composite panels and 1 300 m² ETICS surface.	5 350 m² aluminium composite panels (uniform facade, no ETICS).
Suspended ceilings	Bulkheads, partially suspended ceilings and ceiling sails with acoustic and cooling functions.	Bulkheads, partially suspended ceilings and ceiling sails, linear grid ceilings, mineral fibre boards, gypsum plasterboard (GK), and moisture-resistant boards.	Mineral fibre ceiling tiles, gypsum plasterboard, or perforated gypsum plasterboard. Additional, perforated metal grid ceilings on the ground floor.
Roof build-ups	Green roof (mineral wool, sealing & welding membranes, filter fleece, round gravel 16/32, single-layer substrate, cellular glass, PVC foil, drainage mats), roof structures for housing MEP made of steel profiles.	Green roof (analogous to G1), roof structures for housing MEP made of steel profiles.	Green roof build-up (analogous to G1), roof structures for MEP made of steel profiles and trapezoidal sheeting.

2.3.3 G3: Systemized reinforced concrete construction

The construction of G3 is characterised by a systemized and partially prefabricated construction method applied by Goldbeck, featuring partially prestressed reinforced concrete flat as well as ribbed slab systems with integrated steel beams and steel columns. The concrete compressive strength classes vary between

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

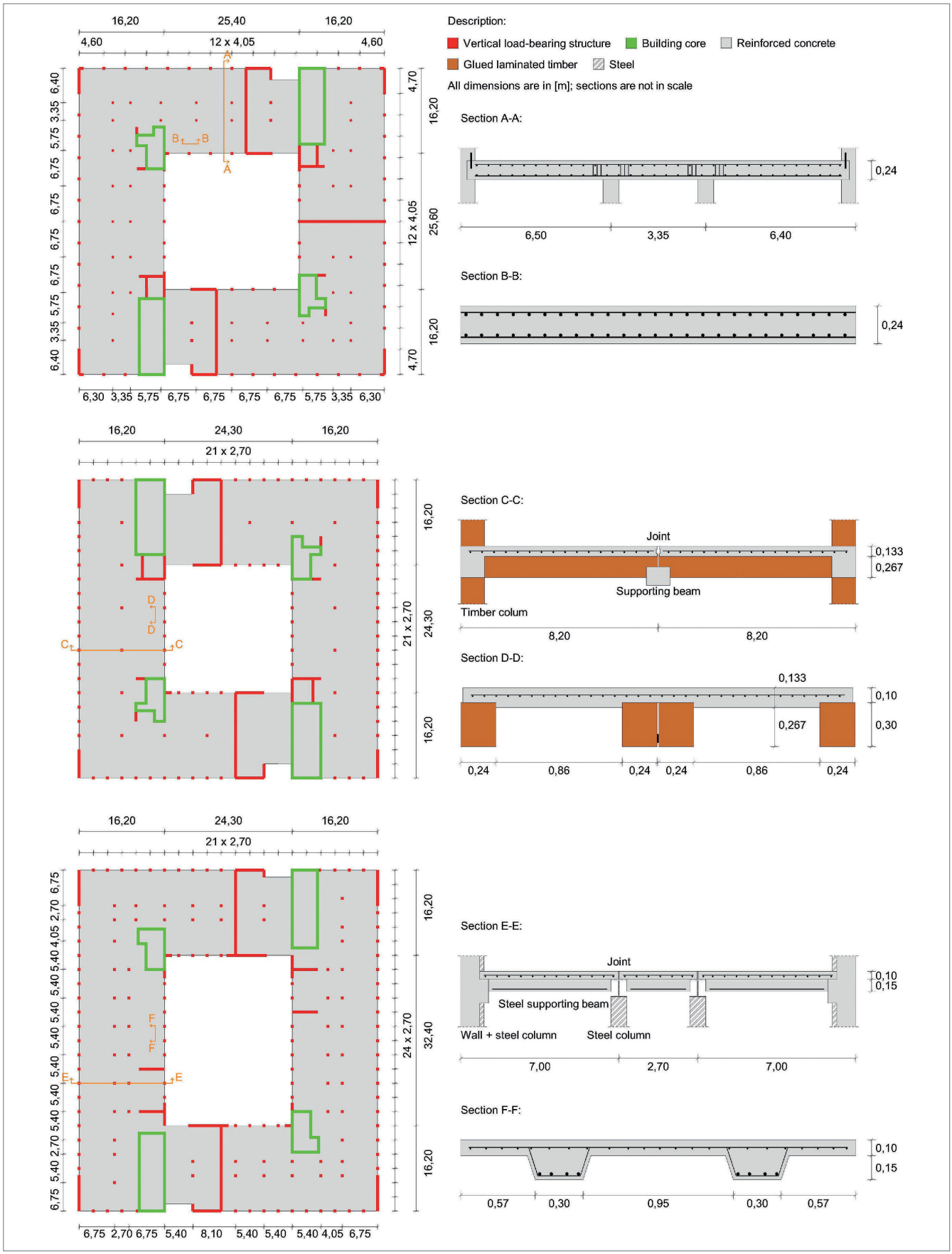

Fig. 2. Schematic floor plans and sections of buildings G1 (top), G2 (middle) and G3 (bottom) *Source: RPTU*
Bild 2. Grundrisse und Schnitte der Gebäude G1 (oben), G2 (Mitte) und G3 (unten) schematisch *Grafik: RPTU*

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

C35/45, C40/50, and C50/60. A total of approximately 2 000 m³ of concrete was used in the floor system.

3 Life cycle assessment (LCA) of embodied emissions

3.1 Research Objective of the LCA

The LCA of the three buildings G1 to G3 was conducted in accordance with the principles and requirements of DIN EN ISO 14040 [12] and DIN EN ISO 14044 [13]. As the primary objective of the assessment, embodied emissions were considered the most significant variable concerning climate compatibility [14]. In the context of the presented study and following [8], embodied emissions are defined as the greenhouse gas emissions resulting from the production, construction, and end-of-life stages of the buildings, excluding their operation phase, and are expressed in CO_2 equivalents (CO_2-eq.). This facilitated an evaluation of buildings G1 to G3 against the „Embodied Carbon" KPI established by SRE [1].

The LCA of the embodied emissions was carried out using the indicator Global Warming Potential (GWP-total), calculated as the sum of fossil and biogenic GWP, as well as GWP from land use and land use change (GWP-luluc). The evaluation of the LCA aimed to identify the most relevant GWP drivers both across the individual building elements and between the different construction methods. This facilitates the derivation of both construction-specific and material-specific recommendations for SRE as the client, aiming to further reduce the embodied emissions of future office properties and evaluate the effectiveness of the associated KPIs.

3.2 Definition of the scope of the LCA

3.2.1 Investigated building elements

The scope of investigation initially encompassed a comprehensive LCA of all building elements across the three buildings. However, limitations arose due to the availability of reliable data. To ensure valid results and a meaningful comparison between the buildings, the focus was placed on the structural building shell, with only selected interior fit-out elements directly connected to the primary structure. The LCA of mechanical, electrical, and plumbing systems (MEP) was omitted, as these were not directly related to the structural design of the compared buildings. Furthermore, it was necessary to ensure that the overall building comparison was not distorted by the MEP sector, which was at times only limitedly comparable.

For a detailed breakdown, the building elements were subdivided into eleven sub-elements that were consistently assessed across all buildings, including the structural floor slabs, floor build-ups, columns, walls and wall insulation, foundations, stairs, facade surfaces, windows, suspended ceilings, and roof build-ups. The structural floor slabs encompassed all load-bearing slabs, including associated beams or ribs, as well as the roof slab that form the upper boundary of the building envelope. Consequently, the roof build-up category included the waterproofing, insulation, and fill on top of this slab, as well as the steel-frame enclosures for roof-mounted MEP equipment. Under the foundations category, both isolated and strip foundations as well as floor slabs, including insulation against the ground, were accounted for. Wall insulation comprised all vertically arranged insulation on or within wall cross-sections, including insulation in external thermal insulation composite systems (ETICS), the other components of which were subsumed under facade surfaces along with the aluminium panels. Since G2 utilizes timber frame walls where insulation is partially located within the wall cross-section, the direct assignment of additional external wall insulation to the facade was deemed inappropriate for the purpose of comparing construction methods. The floor finishes category included all screeds and floor coverings above the structural slabs or base plates.

3.2.2 Assumed service lives of building elements and life cycle stages

Due to the complexity of assessing multi-layered assemblies, a deliberate decision was made to omit the material-specific replacement cycles during the building life cycle. In line with the objective of this study, the focus was placed strictly on the construction methods of the new buildings and their associated embodied emissions. However, the overall LCA results may vary if component replacements are accounted for.

All LCA calculations regarding GWP-total were performed for each of the following assessment scenarios according to [15] for a reference service life of 50 years: Cradle to Site (life cycle stages A), Cradle to Grave (life cycle stages A-C), and Cradle to Cradle (life cycle stages A-D).

3.2.3 Used datasets

Generic datasets from "Ökobaudat (Version 2023)" were applied, particularly for the LCA of the structural materials like concrete, reinforcing steel, various timber products, and structural steel [16]. These generic datasets, which are derived from theoretical modelling rather than direct industry data, include safety margins between 10 % and 30 % for the GWP components GWP-fossil and GWP-luluc due to modelling uncertainty and varying levels of completeness [17]. Average and representative datasets were only utilized in cases where no alternatives were available. Specific manufacturer datasets were used partially only for interior fit-out materials and specific construction products installed for specialized functions, for example acoustic ceiling sails with cooling functions. For the comparison of construction methods across the three assessed buildings, it is essential to use datasets that are equally representative of widely used materials. Otherwise, the comparative analysis and the validity of the scientific evaluation could be compromised by manufacturer-specific datasets. The assessment of the windows was simplified by applying the manufacturer-specific dataset of the windows installed in G1 to the window areas of the other buildings, as no corresponding datasets were available for the other products. Given the relevance of concrete to the overall LCA results, it should be noted that the determined concrete volumes were differentiated solely based on the specified concrete compressive strength class. Further information regarding concrete mix designs, especially the types of cement used, or the application of recycled aggregate concrete (RC concrete) was not available. Due to a lack of availability in "Ökobaudat", the datasets for concrete strength classes C35/45, C40/50, and C45/55 were derived through interpolation between the datasets of the other strength classes.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

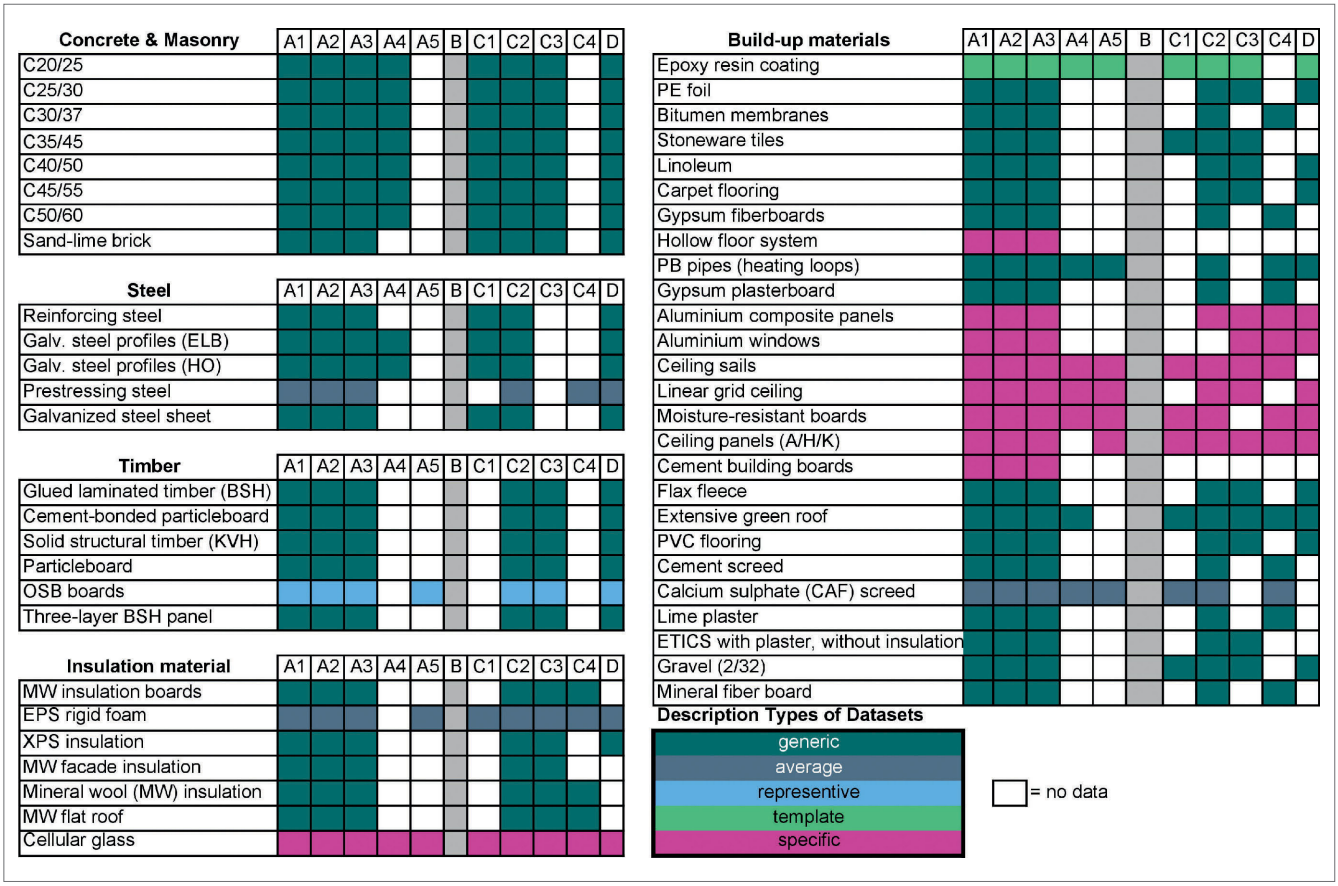

Fig. 3. Qualitative overview of the types of data sets used and the life cycle data contained *Source: RPTU*
Bild 3. Qualitative Übersicht der Typen verwendeter Datensätze und enthaltener Lebenszyklusdaten *Grafik: RPTU*

This accounts for the positive correlation between the cement content and the concrete compressive strength.

Since the generic datasets for "Ökobaudat" are commissioned by the BBSR and provided by the same supplier [18], a controlled and uniform quality of the datasets can be assumed as a basis for comparison. Furthermore, the generic datasets feature a consistent modular structure regarding the life cycle stages. However, data availability varies across the individual datasets with respect to the reported modules. Only the production modules A1–A3 are consistently available across all datasets. This variation, as well as the distribution of dataset types, is illustrated in **Figure 3**. Consequently, assessment scenario A possesses a higher degree of explanatory power compared to scenarios A-C and A-D.

3.3 LCA execution

In the interest of maximum transparency, both the LCA and the following investigations were meticulously carried out manually in MS Excel. Specialized LCA software was deliberately not used. This was intended to guarantee the complete traceability of all calculation steps and results. Furthermore, the available BIM models of the three assessed buildings differed significantly in their level of development and detail, and completeness of attribution (LOD), meaning that the LCA had to be performed manually while continuously aligning the system boundaries.

The primary basis for the quantity take-off consisted of the planning and design documents. Where BIM models exhibited adequate data fidelity, they served to supplement the assessment through automated quantity take-off and the application of filters for structurally complex elements such as foundations. The determined masses were continuously verified for plausibility against the net floor area of the buildings through cross-building comparisons, and consultations with specialists from SRE. In isolated cases, well-founded assumptions had to be made regarding material grades, particularly concrete strength classes as well as design variants or planning stages.

When comparing masses or volumes, it must be noted that G3 has a 14 % larger net floor area due to a slightly differing gross ground area. In subsequent comparisons at the level of GWP per square meter, this difference is normalized relative to G1 and G2.

4 Results of the LCA

4.1 Building Comparison

The following results show the quantitative comparison of embodied emissions per square meter (m^2) of net floor area, based on the GWP-total indicator and considering the defined system boundaries. For this research project, the reference area was specified in accordance with the SRE guideline [1], which deviates from the DAfStb guideline [2]. The overall building comparison in **Figure 4** encompasses all assessed component groups and differentiates between the assessment scenarios Cradle to Site (A), Cradle to Grave (A-C), and Cradle to Cradle (A-D).

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

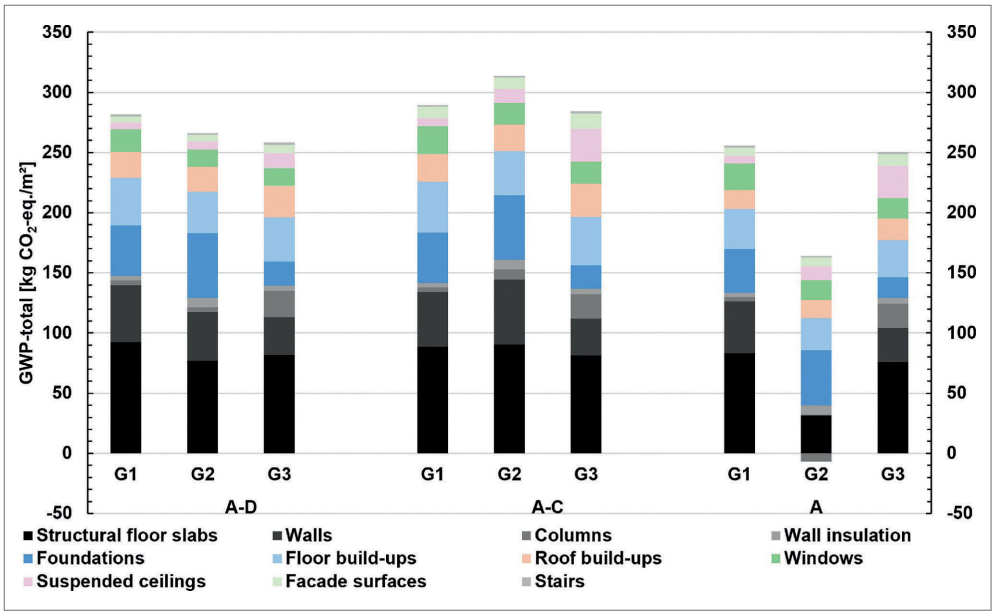

Fig. 4. GWP-total per m² of usable floor space in buildings G1 to G3, differentiated by scenarios and component groups *Source: RPTU*
Bild 4. GWP-total pro m² Nutzfläche der Gebäude G1 bis G3, differenziert nach Bilanzierungsszenarien und Bauteilgruppen *Grafik: RPTU*

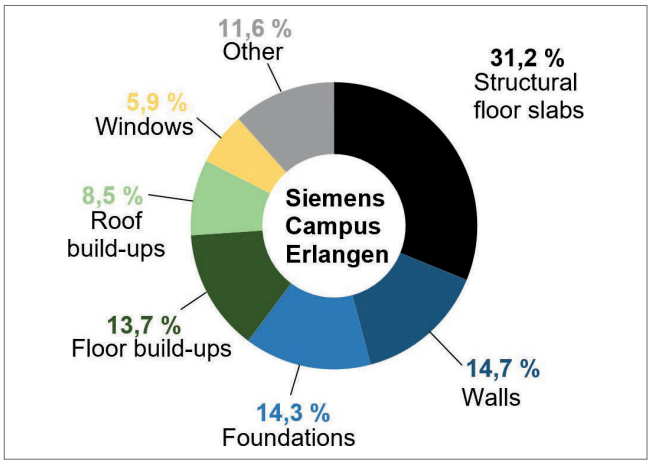

Fig 5. Proportion of life cycle phases (A-D) in total GWP per m² of usable floor space: Average values for buildings G1 to G3 *Source: RPTU*
Bild 5. Anteile der Lebenszyklusphasen (A-D) am GWP-total pro m² Nutzfläche: Durchschnittswerte der Referenzgebäude G1 bis G3 *Grafik: RPTU*

In the overall building comparison for scenario A-D, it becomes evident that a total of 82 % to 93 % of the GWP-total is caused by the component groups: structural floor slabs, walls, foundations, floor finishes, roof build-up, and windows (**Figure 5**).

These six items can be identified as the most relevant GWP drivers across all construction methods within the investigated office properties. The structural floor slab alone accounts for approximately one third of the GWP-total (A-D). Furthermore, in all scenarios, G3 exhibits an increased share of column related emissions in the overall result, which is related to the primary use of structural steel.

In both scenarios A-D and A, G1 achieves the highest GWP-total of the three buildings, with 281,7 and 255,8 kg CO_2-eq./m². However, the GWP of G3, which yields the lowest overall result in these two scenarios, shows no significant reduction compared to G1, with a maximum difference of only up to 9 % (A-D). In scenario A-D, G2 ranks in the middle, whereas under the system boundaries of A-C, it results the highest absolute GWP value of 313,9 kg CO_2-eq./m². Conversely, if only the production phase (A) is considered, the GWP-total of G2 is halved to the lowest individual value overall.

This discrepancy is caused by the inconsistent tracking of biogenic carbon storage and disposal related release within wood-based products alongside varying approaches to accounting for energy benefits from recovery processes [8, 19].

4.2 Component Comparison

4.2.1 General

For a more detailed analysis, the embodied emissions of the individual component groups structural floor slabs, columns, and walls including wall insulation is presented for the reference assessment scenario A-D. As a corresponding intermediate result of the LCA, the absolute consumption of construction materials for the slab systems is reported. Based on these components, the impact on the embodied emissions of the various slab systems and the dependent vertical load-bearing structure emerges as the primary distinguishing feature of the three examined buildings.

As the only non-load-bearing component category, wall insulation is also included to evaluate construction-specific advantages and disadvantages, representing an envelope element whose design dependents directly on the material composition of the load-bearing walls. In contrast, the other component categories, such as floor build-ups, windows, and roof build-ups, are designed largely independently of the chosen load-bearing structure and are not discussed separately, despite occasionally higher GWP results. The differences found in the foundations of the buildings resulted primarily from construction management considerations and show no direct dependency on the various total masses of the buildings. Consequently, these will not be addressed further in this publication, which focuses on construction and material specific differences between the buildings.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

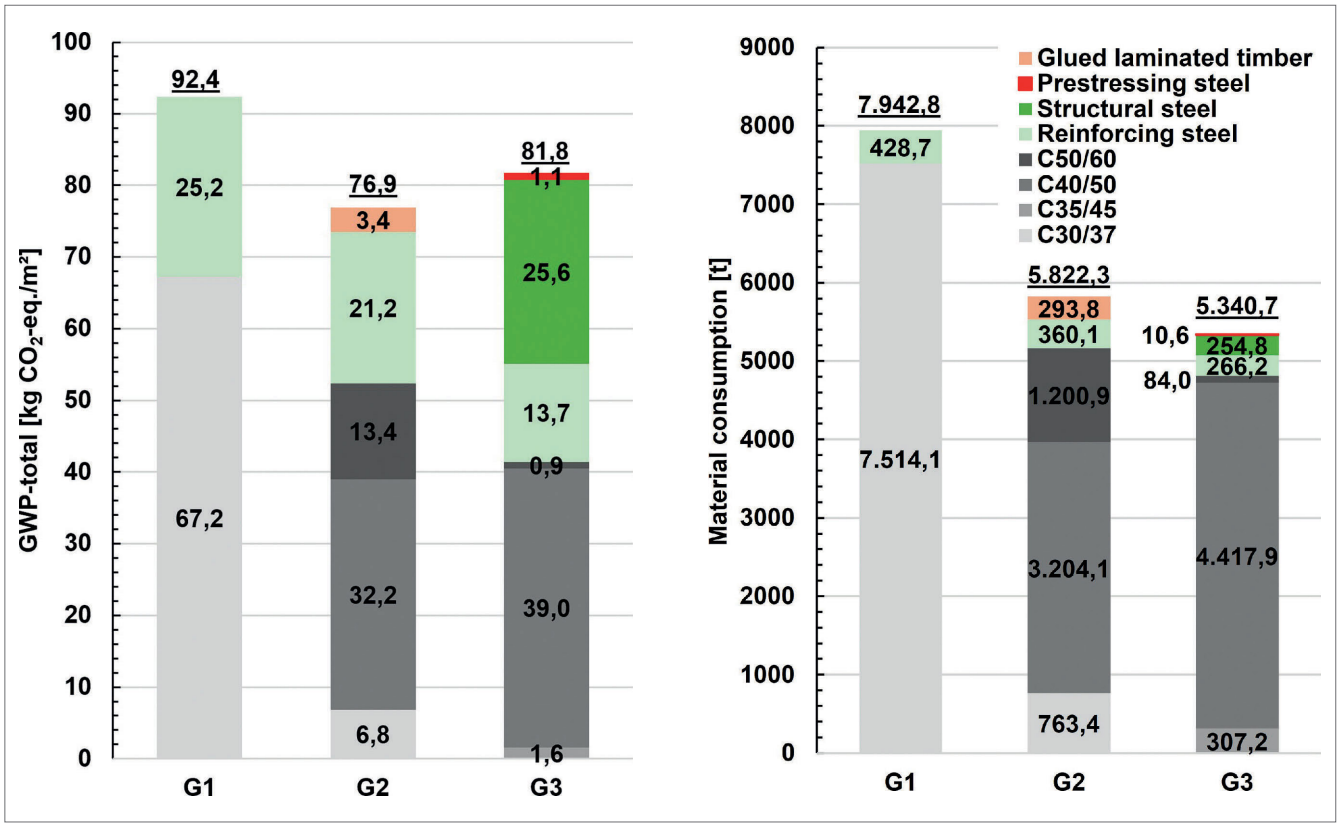

Fig. 6. GWP-total (left) and material consumption (right) for ceiling systems in buildings G1 to G3, scenario A-D *Source: RPTU*
Bild 6. GWP-total (links) und Materialverbrauch (rechts) der Deckensysteme in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*

4.2.2 Structural floor slabs

The comparison of mass and GWP-total of the slab systems in **Figure 6** illustrates the strong influence of emission-intensive materials. The slabs in G1, at nearly 8 000 t, contribute significantly more mass than those in the other two buildings. However, due to the selection of a comparatively low concrete compressive strength class and consequently lower cement content, this gap narrows significantly when considering the GWP-total in **Figure 6**. In the slabs of G1, only concrete strength class C30/37 was used, whereas the other floor systems utilized higher strengths up to C50/60, partly due to the use of precast elements. However, the in-situ concrete flat slab in G1 achieves the highest GWP-total at 92,4 kg CO_2-eq./m².

Although G3 utilised the least mass in its slabs despite an increased net floor area, it generated a higher GWP-total than the heavier slabs in G2. Structural steel within the slabs of G3 is identified as a significant GWP driver here, while G2 benefits from the proportion of glued laminated timber in its timber-concrete composite floors. In a direct comparison with the timber, structural steel emits more than seven times of CO_2 equivalents for nearly identical masses.

4.2.3 Columns

The analysis of the embodied emissions of the columns (**Figure 7**) underlines the ecological relevance of material choice. Despite nearly identical masses of approximately 300 t each in all three buildings, serious differences occur in the LCA when steel columns are used. Due to the high steel content, the columns in G3 cause approximately five times the embodied emissions compared to the other construction methods. The design of the columns using in-situ concrete or partial timber construction in G1 and G2 results in an overall negligible total for this component group at around 4,0 kg CO_2-eq./m², whereas the GWP-total of 21,9 kg CO_2-eq./m² caused by columns in G3 represents a significant portion even when considering the building as a whole. This comparison also highlights how decisive the choice of building materials is and how significantly it influences the LCA. It further demonstrates the significant carbon reduction potential inherent in the use of eco-concrete and "green steel".

4.2.4 Walls and wall insulation

The vertical load-bearing structure, in addition to the columns, is completed by the representation of the embodied emissions of the walls in **Figure 8**. Despite a zoned construction approach, G1 records the maximum value here at 50,7 kg CO_2-eq./m² due to the use of high concrete compressive strengths. The walls in G2, which are predominantly designed as timber frame walls, rank in the middle at 48,4 kg CO_2-eq./m². In this case, reinforced concrete walls are primarily found around the stiffening building cores. In G3, relatively few reinforced concrete walls of only medium strength classes are used, resulting in the minimum value for these components at 35,7 kg CO_2-eq./m². It is possible that the extent of load-bearing walls in G3 can be reduced due to the high load-bearing capacities of the steel columns.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

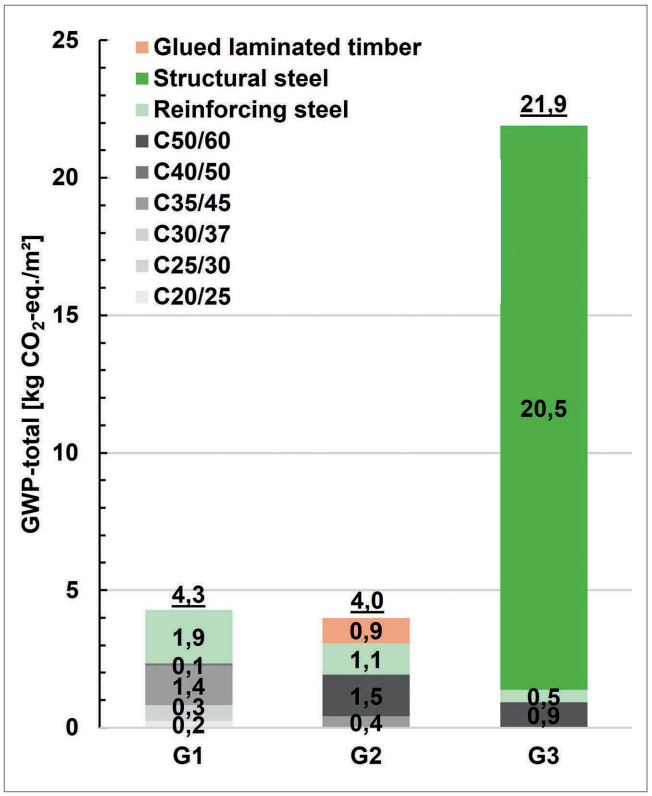

Fig. 7. GWP-total of columns in buildings G1 to G*3*, scenario A-D *Source: RPTU*
Bild 7. GWP-total der Stützen in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*

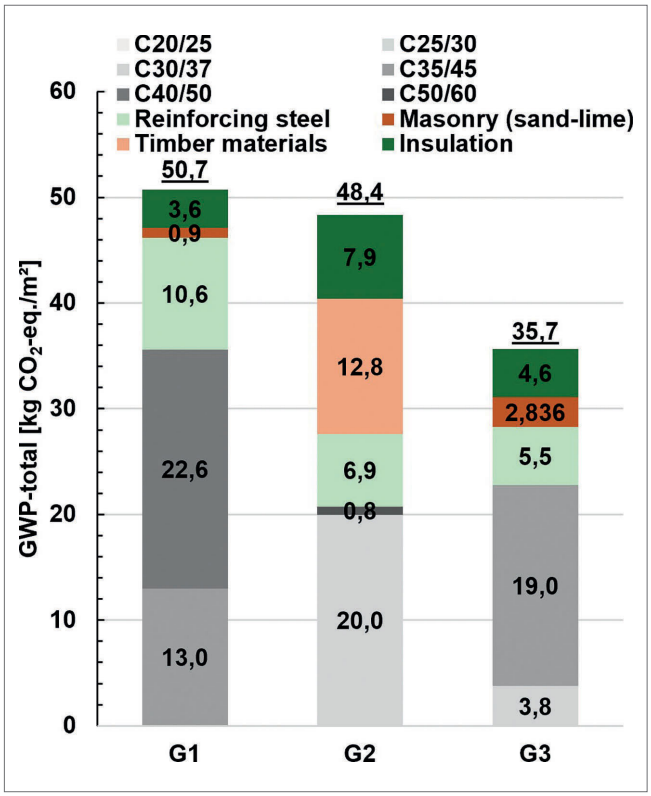

Fig. 8. GWP-total of walls incl. insulation in buildings G1 to G3, scenario A-D *Source: RPTU*
Bild 8. GWP-total der Wände inkl. Dämmung in den Gebäuden G1 bis G3, Bilanzierungsszenario A-D *Grafik: RPTU*

The embodied emissions for wall insulation varies between 3,6 and 7,9 kg CO_2-eq./m². As **Figure 8** illustrates, G2 marks the upper limit here. The significant deviation of up to 211 % results primarily from the fundamentally different structural designs. While G1 and G3 utilize a conventional external thermal insulation composite system (ETICS) with purely external insulation, a timber frame construction is used in G2. In the latter, the cavity of the load-bearing structure was filled with insulation material in addition to the outer insulation layer. In combination with partially insulated interior areas, this leads to a significantly higher use of materials in G2, which is directly reflected in the LCA.

5 Evaluation and recommendations

5.1 Construction methods

The detailed analysis of the embodied emissions enables a well-founded assessment of the ecological advantages and disadvantages inherent in construction methods, focussing on the three investigated office buildings built as a reinforced concrete skeleton construction, a timber-concrete hybrid construction, and a systemized reinforced concrete construction. Figure 4 illustrates the differences within the scenario analysis.

It is remarkable that despite the differing construction methods, which are based on materials with fundamentally different global warming potentials, the total results at the building level in the scenario A-D deviate from one another by less than 10 %. Facing the encountered data and modelling uncertainties, the magnitude of these differences is to be classified as very low. Consequently, within this evaluation scenario, no single construction method can be recommended over another. Rather, the decision depends on the specific material variants used for the respective construction method and the optimised planning and implementation of these systems. The selected materials as well as the structural design play a pivotal role in this regard. For instance, the use of eco-concretes with reduced embodied emissions or „green steel“ would influence the overall results more than the construction method itself. Therefore, future developments in the field of eco-concretes will also determine whether, it is more advantageous for the embodied emissions to manufacture slabs from cast-in-place concrete which tends to have lower strength or as precast concrete elements with early strength requirements. However, it should be noted that, due to the underlying data, the concretes in the study were differentiated only by compressive strength classes and not in greater detail by mix designs or manufacturing processes. The LCA results therefore cannot reflect this with finer differentiation.

5.2 Importance of the system boundaries according to the datasets

The greatest variances both within each individual building and across the different structures emerge when comparing the system boundaries for scenarios A and A-C. For example, timber products benefit significantly in the LCA from substantial credit due to assumed displacements of alternative energy sources in life cycle stage D, which results directly from questionable thermal

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

utilisation in stage C3. However, at the time of the LCA, statements regarding material recovery in the future disposal stage and its impacts on the energy sector can only represent pure forecasts, whereas a broad data basis is available for the already completed manufacturing stage. In contrast, the generic datasets used for the assessment of the concretes, for example, do not contain any negative GWP components to account for CO_2 uptake during carbonation.

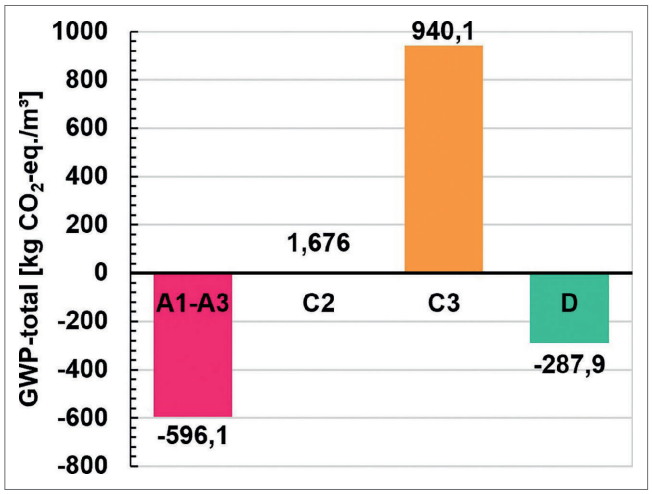

Fig. 9. Selected generic data set for laminated timber *Source: [20]*
Bild 9. Gewählter generischer Datensatz für Brettschichtholz *Grafik: [20]*

Figure 9 illustrates that when summing up all available life cycle stages (A-D), only around 60 kg CO_2-eq./m³ occur for glued laminated timber because the biogenic carbon storage in A1-A3, the release of this carbon in the disposal stage C3, and the credit in stage D almost completely offset each other. If only A-C is considered and only the credit in D is neglected, this results in more than 340 kg CO_2-eq./m³, which is roughly equivalent to the GWP-total of one m³ of C50/60 concrete. However, around 95 % of the concrete's GWP originates from the manufacturing stage A1-A3, where glued laminated timber shows a negative value, meaning that even Cradle to Site does not represent an objective comparison scenario when these two materials are present.

The comparison of scenarios can also be influenced by the choice of the dataset for reinforcing steel. The generic dataset [21] assumes production in an electric arc furnace by melting steel scrap, so that a credit for recycling the raw material is already implicitly included in the manufacturing stage A1-A3, rather than only in stage D [22].

5.3 Influence of the datasets

Regarding the comparability of the results, the incompleteness of the datasets used must also be highlighted. Figure 3 illustrates this fragmentation. The fundamental issue with data gaps is that missing values must enter the overall LCA as zero, thereby underestimating the environmental impact and potentially leading to a flawed benchmark compliance assessment. Due to the diversity of the materials used and consequently the datasets applied for the different buildings and construction methods the incompleteness of the datasets for certain material groups can have an uneven impact. This is counteracted by primarily relying on generic datasets, which are subject to quality control and must map the most relevant material flows. Regarding this type of dataset, it is worth noting that safety margins between 10 % and 30 % are applied in their generation. With respect to the indicator GWP-total, this affects the GWP-fossil and GWP-luluc components, but not the biogenic component of the GWP. This circumstance inhibits the comparability of the construction methods when using mineral, metallic, and timber building materials, whose GWP components are distributed fundamentally differently across these categories. Nevertheless, the uniform approach of generic datasets offers improved objectivity and increased transparency compared to selecting specific datasets, which contain a differing scope of life cycle data and could be influenced by manufacturers' interests in representation and market share. Furthermore, in the quantity calculation, it was not possible to assign the correct product to every structural element, and many products did not yet have valid environmental product declarations (EPD).

In conclusion, it should be noted that the approach of using generic datasets for the emission-driving construction materials concrete and steel chosen in the research project for the sake of comparability means that no positive impact from using more ecological material alternatives like „eco-concretes" or „green steel" can be reflected in the here presented LCA result. However, this is highly recommended. Therefore, the present results may deviate from the actual values of the analysed buildings if project-specific datasets were used. At the same time, the substantial amounts of concrete and structural or reinforcing steel in the overall results highlight levers for reducing embodied emissions through material optimization. These potentials should be leveraged and can have a greater impact than the minor differences achieved in this investigation focusing on the construction method.

5.4 Documentation requirements

As described in Section 3.3, the heterogeneity of the BIM models regarding the completeness of their attribution led to a limited application of corresponding LCA tools. Therefore, uniform documentation requirements should be established in the future as early as the tendering and awarding stage to ensure the seamless feasibility of the quantity calculation and the LCA. Information on the installed volumes, which must be available from the project costing, should be stored in a structured, complete manner and in accordance with the detailed design. Especially in the context of different concrete compressive strength classes which have a high impact on the LCA result with increasing cement contents. Therefore, BIM models must be completely and stringently attributed with the respective information. Reinforcement ratios of reinforced concrete components should be logged as a matter of priority, too.

Since the delineation of component groups varies depending on the project and the objective of the study and may deviate from the LCA categories used in this study, components in BIM models should additionally be assigned to functional component categories and cost groups. Through the applicability of filters, component schedules can be generated effectively and completely to be fed directly into the quantity calculation. Adding a unique component ID as well as attributing the corresponding plan number prevents misunderstandings and thus assessment errors.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

However, it cannot be ruled out that attributions were present in the BIM models used that could not be fully retrieved. In this regard, it is essential to strengthen the use of Open BIM to improve the compatibility of the models with different software. Since compatibility issues became apparent after just a few years even between different versions of the same software, additional documentation of the essential properties of the most relevant component groups outside of the model files is recommended as explained in section 4.

5.5 Recommendations for tendering emission-efficient buildings

Comparing the various construction methods has shown that their impacts on the GWP-total of the entire building are minor within the Cradle-to-Cradle reference scenario. This implies that a performance-based tendering process, without prescribing a supposedly ecologically advantageous construction method, can be effective. The contractual specification of a GWP cap as implemented by SRE for „Module 8“ at the SCE motivates all designers and contractors to optimize embodied emissions while simultaneously considering cost-effectiveness. Inherent to the system, it also provides a transparent documentation of the installed masses and volumes suitable for LCA. Restricting requirements to a target value without prescribing specific construction methods leaves room for optimization in design and construction. These aspects should be considered and assessed holistically, leveraging the expertise of all specialized contractors.

6 Conclusion

This publication presents the methodology and results of a comparative LCA of the embodied emissions of three new office buildings utilizing different construction methods. The LCA covers various accounting scenarios and is based primarily on generic datasets from Ökobaudat. The LCA results are compared and scientifically evaluated at the overall building level and for selected, relevant component groups.

A key result of this comparative study is the demonstration that the three new office buildings which are nearly identical in external appearance do not exhibit significantly different embodied emissions in the A-D reference scenario, despite their different construction methods as a reinforced concrete skeleton construction, a timber-concrete hybrid construction, and a systemized reinforced concrete construction. Rather, the decisive factors are the quantities, types, and grades of materials used. Due to their large share of the total result across all three construction methods, concrete and structural or reinforcing steel represent the primary levers for reducing embodied emissions. This underlines the importance of resource-optimized structural design using efficient systems, as well as the further development of lower-emission, more ecological material recipes or manufacturing processes [23, 24]. To leverage the potential for reducing embodied emissions, functional competitions and tenders that specify GWP caps or targets for structural optimisation are preferable to prescribing specific construction methods. In this context, specific documentation requirements must be met to ensure transparent LCAs and verifications of embodied emissions.

In line with previous research and experience, the floor slab component group accounts for the absolute highest total GWP in all three analysed buildings, representing between 20 % and 33 % of the GWP-total. Notably, the floor build-up comprising screeds and hollow floor systems also accounts for a comparatively significant share of embodied emissions. In summary, it is evident that considerable potential for reducing embodied emissions can already be realized with currently available building materials and construction methods, provided that appropriate incentive mechanisms are established.

ACKNOWLEDGEMENTS

In conclusion, the authors would like to thank Siemens Real Estate for their interest and cooperation in the investigations, as well as for the financial support of this joint research project.

LITERATURE

[1] Siemens Real Estate: Sustainability Standard – for Development, Construction & Major Renovation Projects. (Internes Dokument). Siemens AG, 2023.
[2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton. Ausgabe August 2024.
[3] *Krause, K.; Hartmann, C.; Hafner, A.:* Eine Ökobilanz, viele Ergebnisse – Ergebnis und Vergleich der Ökobilanz desselben Einfamilienhauses durch verschiedene Bearbeitende. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 11, S. 326-336. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-11-56.
[4] *Zitterl, T.; Bauer, P.:* Ökologische Optimierung von Tragwerken im Infrastrukturbau am Beispiel von Brücken und Portalkonstruktionen. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 10, S. 317-326. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-10-53.
[5] *Hoppe, J.; Sanio, D.; Hormel, A. et al.:* CO_2-Bilanzierung bei Straßenbrücken – Ein Bewertungsansatz für die Planungsphase von Baumaßnahmen. *In:* Bauingenieur 99 (2024), Heft 11, S. 354-365. doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-40.
[6] *Görtz, S.; Bardenhewer, E.K.; Volkenhoff, T. et al.:* CO_2-Emissionen von Infrastrukturprojekten im Straßenbau. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 03, S. 62-72. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-03-56.
[7] Siemens AG: Siemens Campus in Erlangen, 2025, https://press.siemens.com/de/de/feature/siemens-campus-erlangen [Zugriff am: 20.02.2026].
[8] *Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R. et al.:* Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 116 (2021), Heft 12, S. 969-977. doi.org/10.1002/best.202100065.
[9] *Heckmann, M.; Glock, C.:* Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2, S. 110-123. doi.org/10.1002/best.202200102.
[10] *Heckmann, M.; Glock, C.:* Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb-Richtlinie. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 22-32. doi.org/10.1002/best.202400076.
[11] *Haist, M.; Glock, C.; Wiens, U. et al.:* Die neue DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ – Meilenstein für den Klimaschutz. *In:* Beton- und Stahlbetonbau 120 (2025), Heft 1, S. 55-59. doi.org/10.1002/best.202400090.
[12] DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe Februar 2021.
[13] DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ausgabe Februar 2021.

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND

[14] Intergovernmental Panel on Climate Change: IPCC Sixth Assessment Report – Chapter 7: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021, www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-7/ [Zugriff am: 27.02.2026].
[15] DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Ausgabe März 2022.
[16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat, www.oekobaudat.de/ [Zugriff am: 24.09.2024].
[17] *Figl, H.; Kusche, O.:* Ökobaudat-Handbuch – Technisch/formale Informationen und Regeln zur Ökobaudat-Datenbank. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin, Wien, Freiburg, 2.1 Ausgabe 2023.
[18] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat Datenlieferanten, www.oekobaudat.de/anleitungen/datenlieferanten.html [Zugriff am: 20.02.2026].
[19] *Heckmann, M.:* Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen, DIN Media GmbH; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Dissertation.
[20] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Brettschichtholz Nadelholz (generisch), https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c816b036-6bdf-48e5-8ef8-a76d7872f589&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de [Zugriff am: 26.02.2026].
[21] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Ökobaudat – Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl (generisch), https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=8565038f-5c21–48d7–94cb-958498ba9dd3&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=de.
[22] *Bielak, J.; Ros, H.; Hiester, M.:* Ressourceneffiziente Gebäudehülle durch nichtmetallisch bewehrte Sandwichfassaden – Von der Forschung zum Pilotprojekt. *In:* Bauingenieur 101 (2026), Heft 03, S. 41-51. doi.org/10.37544/0005-6650-2026-06.
[23] *Bayer, D.; Berns, K.; Carrigan, S. et al.:* Building the Future – an interdisciplinary research initiative/Bauen der Zukunft – eine interdisziplinäre Forschungsinitiative. *In:* Bauingenieur 100 (2025), Heft 10, E 1-E 10. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-10-41.
[24] *Hegger, J.; Glock, C.; Curbach, M. et al.:* Innovativer Betonbau – Tradition und Zukunft. *In:* Bauingenieur 100 (2025), 07-08, S. 181-195. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-07-08-15.

Rebecca Müller, M.Sc.

rebecca.mueller@rptu.de

Aaron Dernbach, M.Sc.

aaron.dernbach@rptu.de

Daniel Jochum, M.Sc.

daniel.jochum@rptu.de

Erik Wagner, M.Eng.

erik.wagner@rptu.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Glock

christian.glock@rptu.de

Rheinland-Pfälzische Technische Universität
Kaiserslautern-Landau
Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion
Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/0005-6650-2026-22 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY-NC-ND