



1. Warum müssen wir nachhaltig bauen?

1.1. Verantwortung des Bausektors

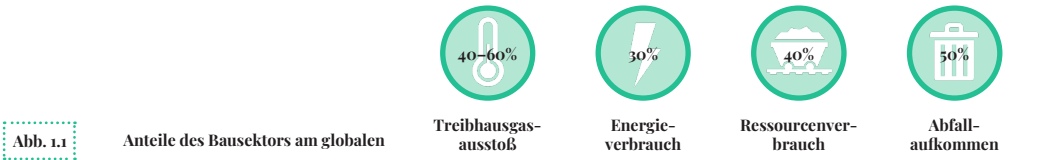


Abb. 1.1 Anteile des Bausektors am globalen Treibhausgas-ausstoß, Energie-verbrauch, Ressourcenver-brauch, Abfall-aufkommen

1.2. Hebel der Tragwerksplanung

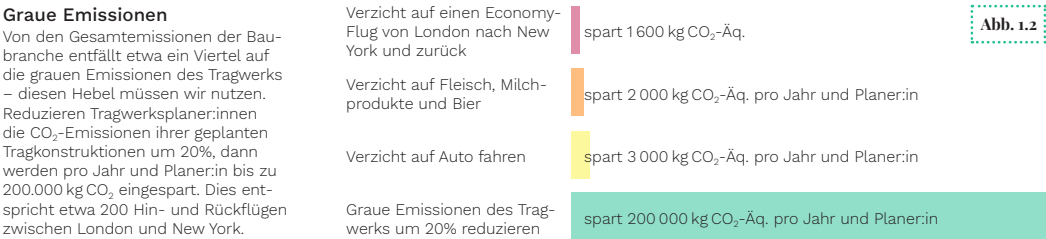


Abb. 1.2 Graue Emissionen

Von den Gesamtemissionen der Bau-
branche entfällt etwa ein Viertel auf
die grauen Emissionen des Tragwerks
– diesen Hebel müssen wir nutzen.
Reduzieren Tragwerksplaner:innen
die CO₂-Emissionen ihrer geplanten
Tragkonstruktionen um 20%, dann
werden pro Jahr und Planer:in bis zu
200.000 kg CO₂ eingespart. Dies ent-
spricht etwa 200 Hin- und Rückflügen
zwischen London und New York.

Verzicht auf einen Economy-
Flug von London nach New
York und zurück

Verzicht auf Fleisch, Milch-
produkte und Bier

Verzicht auf Auto fahren

Graue Emissionen des Trag-
werks um 20% reduzieren

spart 1600 kg CO₂-Äq.

spart 2 000 kg CO₂-Äq. pro Jahr und Planer:in

spart 3 000 kg CO₂-Äq. pro Jahr und Planer:in

spart 200 000 kg CO₂-Äq. pro Jahr und Planer:in

»Weltweit erbringen Ingenieur:innen Werke in Verantwortung vor der Menschheit, der Umwelt und sich selbst. Ihr Schaffen und Wissen ist eine kollektive Errungenschaft, dient dem Wohl der Gesellschaft und sollte transparent ohne Eigentumsansprüche weiterentwickelt werden.«
—Dresdner Moralkodex für europäische Ingenieur:innen von 1998 (modifiziert vom ABC)

1.3. Konzepte für klimaeffektives Bauen

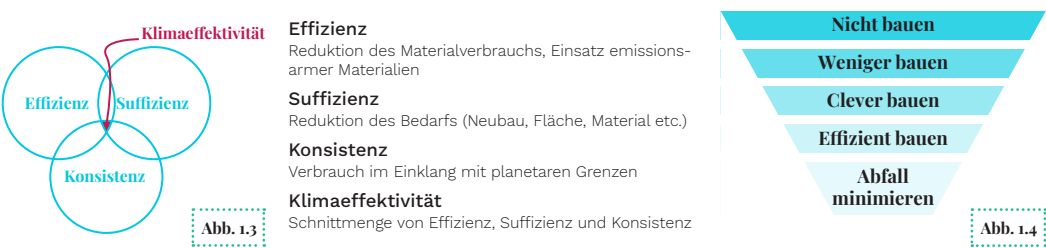


Abb. 1.3

Abb. 1.4

Diese Entwurfstafel legt den Fokus auf die Quantifizierung und Reduzierung der Treibhausgasemissionen von Tragwerken, indem die Methode der Ökobilanzierung für Tragwerksplaner:innen praxisnah erläutert wird. Dies ersetzt keine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung von Bauwerken, die nur im interdisziplinären Planungsprozess erreicht werden kann.



Das ABC möchte alle Bauschaffenden für die Transformation im Bauwesen mobi-
lisieren. Diese Arbeitshilfe wird kontinuierlich weiterentwickelt und erhebt keinen
Anspruch auf Vollständigkeit. Die aktuelle Version wird open source auf der Website
zur Verfügung gestellt. Dort sind die verwendeten Quellen angegeben. → QR-Code
Bei Hinweisen schreibt uns bitte an review@attitudebuildingcollective.org
Version: 2024-12



2. Ökobilanzierung

2.1. Begrifflichkeiten

Ökobilanzierung

(engl. Life Cycle Assessment = LCA)
Methode zur Erfassung der Umweltwirkungen eines Produktsystems, z. B. eines Gebäudes, Tragwerks oder Bauprodukts.

Umweltwirkungen

Wirkungen eines Produktsystems auf die Umwelt, die mittels Umweltindikatoren angegeben werden. Im Bauwesen werden in der Regel die Umweltindikatoren Treibhauspotenzial (GWP), Primärenergie – nicht erneuerbar (PE_{NE}), Ozonabbaupotenzial (ODP), Bodennahes Ozonbildungspotenzial (POCP), Eutrophierungspotenzial (EP) und Versauerungspotenzial (AP) verwendet.

Graue Emissionen

GWP eines Bauwerks über den gesamten Lebenszyklus abzüglich der betriebsbedingten Treibhausgasemissionen (B6–B8).

Treibhauspotenzial

(engl. Global Warming Potential = GWP)
Umweltindikator zur Erfassung aller klimawirksamen Emissionen. Das GWP eines Produktsystems wird in eine CO₂-äquivalente Umweltwirkung umgerechnet und erhält daher die Einheit CO₂-Äq., typischerweise je kg des Produktsystems.

Ökobaudat

Öffentliche Datenbank des Bundes mit geprüften Ökobilanzdaten-sätzen → oekobaudat.de

Funktionelle Einheit, funktionales Äquivalent

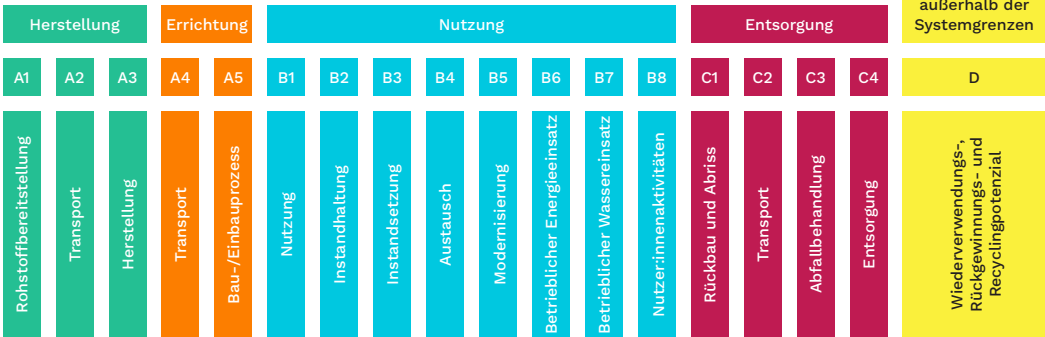
Festzulegende Bezugsgröße des Bauwerks zum Ökobilanzvergleich von Varianten, z. B. 1 m² Bruttogeschossfläche, 1 m² Brückenfläche oder 1 Person, die das Bauwerk nutzt.

2.2. Normen zur Nachhaltigkeit von Bauwerken

DIN EN 15643	Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken
DIN EN 15978-1	Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden – Teil 1: Umweltqualität
DIN EN 15804	Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

2.3. Lebenszyklusphasen

Treibhausgasemissionen entstehen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Der Lebenszyklus von Bauwerken wird nach DIN EN 15643 in fünf Lebenszyklusphasen, bestehend aus einzelnen Modulen, eingeteilt.



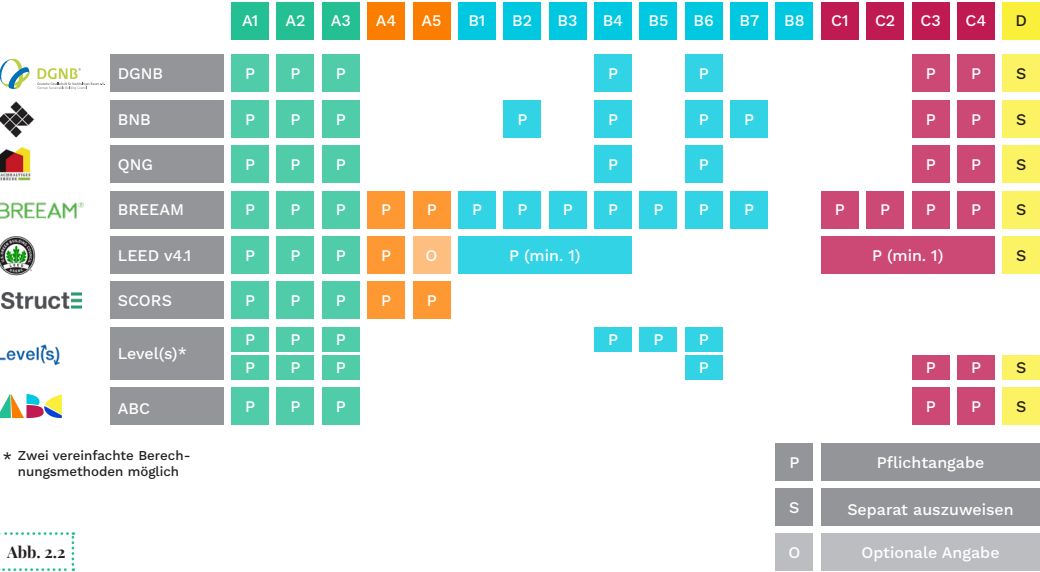
- A1–A3** Enthält die Herstellung vom Rohstoffabbau bis zum fertigen Bauprodukt. In dieser Phase fallen für Bauprodukte in der Regel die höchsten Umweltwirkungen an.
- A4** Enthält den Transport des Bauprodukts auf die Baustelle. Wenn Transportdistanz und Transportmittel bekannt sind, können die Auswirkungen dieses Moduls projektspezifisch berechnet werden.
- A5** Enthält die Errichtung auf der Baustelle mit Angaben zu Verpackungen und Materialverlusten. Werte für dieses Modul liegen oft nicht vor, weshalb es in der Regel vernachlässigt wird.
- B1–B7** Enthält die Auswirkungen in der Nutzungsphase eines Bauwerks. Für Bestandteile der Tragkonstruktion, welche in der Regel über die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks nicht ausgetauscht werden, entstehen hier keine Auswirkungen. Besitzt ein Bauprodukt eine geringere Nutzungsdauer als das Bauwerk, entstehen im Modul B4 Umweltwirkungen für das Ersatzprodukt (A1–A5) und das ausgetauschte Produkt (C+D).
- C1–C4** Enthält das Lebenszyklusende eines Bauwerks. Vor allem bei der Abfallbehandlung (C3) können große Umweltwirkungen entstehen.
- D** Können Komponenten wiederverwendet, recycelt oder zur Energiegewinnung genutzt werden, entstehen in Modul D Gutschriften für das Bauprodukt. Modul D liegt außerhalb der Systemgrenzen. Modul D muss daher getrennt von den anderen Lebenszyklusphasen angegeben werden.

Abb. 2.1

2.4. Systemgrenzen

Nicht alle Umweltwirkungen eines Bauwerks können aufgrund der Datenverfügbarkeit in einer ausreichenden Genauigkeit quantifiziert werden. Um Ökobilanzergebnisse miteinander verglichen zu können, müssen die Systemgrenzen definiert werden. Zeitliche

Systemgrenzen geben an, welche Lebenszyklusmodule bei der Ökobilanzierung eines Gebäudes berücksichtigt werden sollen. Unterschiedliche Bewertungssysteme wählen hier verschiedene Systemgrenzen (ergänzt durch eine Empfehlung des ABC):

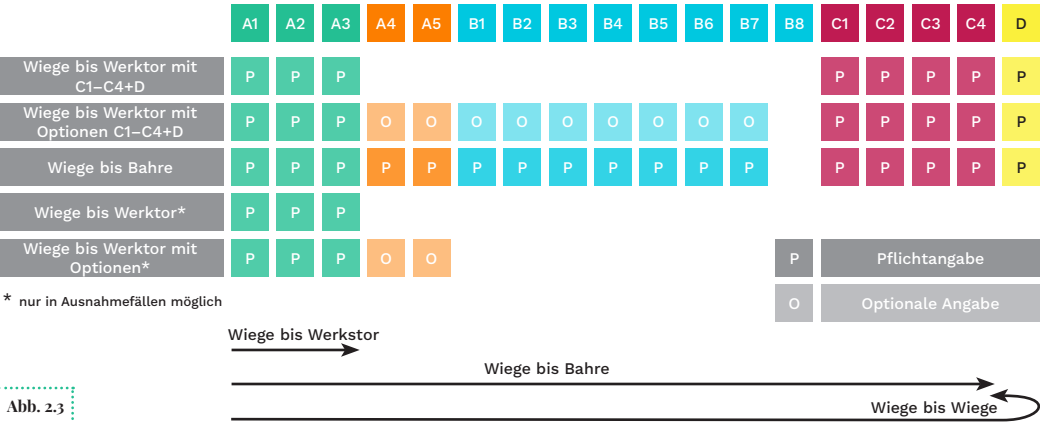


2.5. Umweltproduktdeklaration

Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration = EPD) enthalten quantifizierte Umweltwirkungen für ein Produktsystem, z. B. ein Bauprodukt. EPDs müssen nach DIN EN 15804 erstellt werden.

- EPDs werden aus realen Produktionsdaten oder Literaturquellen erstellt. Abhängig von der Datenerfassung unterscheidet man unterschiedliche Datensatztypen:
- spezifisch: Herstellerspezifischer Datensatz für ein konkretes Produkt eines Werkes
 - durchschnitt: Durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden, mehreren Firmen, mehreren Werken oder mehreren Produkten
 - repräsentativ: Datensätze, die repräsentativ für ein Land / eine Region sind (z. B. Durchschnitt DE)
 - generisch: Datensätze, die auf Basis von Literatur und Expertenwissen modelliert werden. Diese enthalten in der Ökobaudat einen Sicherheitszuschlag von 20% aufgrund der fehlenden Realdaten.

Nach DIN EN 15804 gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, welche Module in einer EPD enthalten sein müssen:



2.6. Vorgehen zur Bilanzierung der Gebäudekonstruktion (nur Tragwerk)

Schritte	Allgemeine Erklärung	Vorgehen für Tragwerksplaner:innen nach Empfehlung des ABC
Funktionales Äquivalent	Technische Eigenschaften, z. B. Quartier, Bürogebäude, Festlegung der Bezugsgrößen	Als Flächenbezugsgröße im Hochbau wird die BGF [m²] nach DIN 277 empfohlen.
Betrachtungszeitraum	Erweiterung um zeitbezogene Eigenschaften des funktionalen Äquivalents (z. B. Lebensdauer, Austauschzyklen, Nutzung, End-of-Life)	Die Lebensdauer des Tragwerks entspricht in der Regel der Lebensdauer des Bauwerks. Die Lebensdauer eines Gebäudes variiert abhängig von der Nutzung des Gebäudes. Gewöhnliche Hochbauten (Wohnen, Büro): 50 Jahre Industriebauten: 25 Jahre Anmerkung: Viele Gebäude werden deutlich länger als 50 Jahre genutzt. Bei einer späteren Sanierung dürfen die konstruktionsbedingten Emissionen vernachlässigt werden.
Systemgrenzen	Festlegung der Lebenszyklusphasen z. B. Wiege bis Werktor (A1–A3)	Die Empfehlung richtet sich nach den Rechenregeln des QNGs für die konstruktionsbedingten Emissionen: 1. Errichtung und Rückbau: A1–A3 + C3 + C4 2. Vorteil und Belastungen außerhalb der Systemgrenze: D
Gebäudemodell	Mengenbilanz: Es werden alle im Gebäude verbauten Materialien und deren Mengen ermittelt	Die zu ermittelten Mengen werden auf die Bauteile des Tragwerks reduziert. Das Tragwerk wird wie folgt definiert: Wände, Stützen, Decken, Dach, Gründung; alle weiteren tragende Bauteile ohne nichttragende Schichten aus Anforderung der Bauphysik, des Brandschutzes oder des Raumabschlusses. Achtung: Bei Vergleichen unterschiedlicher Bauweisen kann das beschriebene Vorgehen zu Verzerrungen der Ergebnisse führen. Für Bauteilvergleiche wird empfohlen, alle Schichten, die zu äquivalenten Bauteileigenschaften führen, zu berücksichtigen.
Abbildungstiefe/ Abschnideregeln	Grundsätzlich sind alle im Gebäude verbauten Bauteile zu bilanzieren	Anteil Masse < 1% und Anteil GWP < 1% kann vernachlässigt werden. Die Summe der vernachlässigten Baumaterialien darf den Anteil 5% am Gebäude GWP betragen. Kleinstteile < 1 kg bei z. B. Schrauben können vernachlässigt werden. Hinweis: Auswirkungen durch Spezialbeschichtungen (z. B. OS- oder Brandschutzbeschichtungen) sowie flächig angeordnete Verbindungsmittel bei z. B. HBV-Decken können leicht unterschätzt werden.
Auswahl der Umweltindikatoren	Entscheidung, welche Umweltindikatoren in die Ökobilanz aufgenommen werden	Bei QNG werden Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbare Primärenergie (PE _{ne}) untersucht. Andere Effekte sind auch wichtig, aber für eine Grundaussage nachrangig.
Auswahl der Umweltdaten	Umweltdaten werden den passenden EPDs entnommen	Die ÖKOBAUDAT bietet eine umfangreiche Datenbank für deutsche und europäische EPDs → oekobaudat.de Es sind unterschiedliche Datensatztypen verfügbar. Für Bauwerksvergleiche in frühen Planungsphasen sollten die Datensätze entsprechen der folgender Reihenfolge verwendet werden: Durchschnitt > Repräsentativ > Generisch Spezifische Datensätze können nur verwendet werden, wenn das Produkt feststeht.
Berechnung der Umweltindikatoren	Indikator = Menge _{Material} × Umweltwirkung _{EPD}	Betrachtung des Treibhausgaspotentials GWP _{total} Beispiel (Beton ohne Bewehrung): GWP _{total} = 10 m³ Beton × 286 kg CO ₂ -Äq./m³ = 2860 kg CO ₂ -Äq.
Auswertung	Nachvollziehbare Dokumentation der Ökobilanz	Beispiel: <ul style="list-style-type: none"> Funktionales Äquivalent: Bürogebäude 5000 m² BGF Betrachtungsgegenstand: Tragwerk Tragwerkspezifische Angaben: Hallentragwerk mit Fachwerkträger Betrachtungszeitraum: 50 Jahre Betrachtungsjahr: 2023 Lebenszyklusphasen: A1–A3 + C3–C4, D Umweltindikatoren: GWP Bevorzugter Datensatztyp: Durchschnitt DE GWP_{total} = 105 kg CO₂-Äq./m² BGF

Diese Entwurfstafeln verwenden die aktuell gültigen Datensätze der [DIN EN 15978 A2](#).

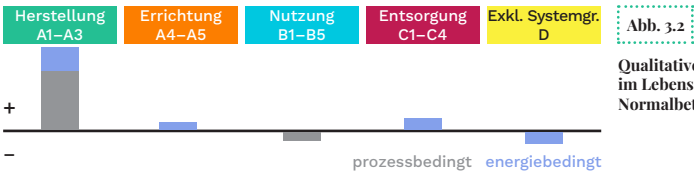
Durch die Mischung von Werten der älteren [DIN EN 15978 A1](#) können Fehlinterpretationen entstehen!

3. Materialspezifische Hinweise

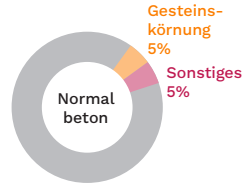
3.1. Beton und Zement

Beton- und Zementherstellung

- Die CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase des Betons (Module A1–A3) resultieren hauptsächlich aus der Zementherstellung. Höherfeste Betone erfordern einen höheren Zementgehalt, deswegen steigen die CO₂-Emissionen pro Betongüte ca. um 10%.
- Die prozessbedingten CO₂-Emissionen in der Zementproduktion entstehen bei der chemischen Entsäuerung zur Klinkerherstellung. Zusätzlich entstehen energiebedingt CO₂-Emissionen (v. a. Brennofen zzgl. Förderung, Verarbeitung, Transport). Der Klinkeranteil und somit die CO₂-Intensität von Zement können stark variieren (z. B. CEM I: 95% Klinker, CEM III/C: 5–19% Klinker).
- CO₂-Emissionen aus dem Einsatz von Abfällen als Brennstoff werden in Deutschland nach dem Verursacherprinzip in der Ökobilanz nicht direkt betrachtet, sondern gesondert angegeben.
- Werden Abfallprodukte anderer Industrien im Beton verwendet, z. B. Hüttensand oder Flugasche, so wird ihre CO₂-Bilanz mittels ökonomischer Allokation auf die beteiligten Akteure verteilt. Beton bekommt aufgrund des geringen Verkaufspreises i. d. R. einen geringen Anteil zugewiesen.
- Während der Nutzungsphase (Modul B1) nimmt Beton durch Carbonatisierung einen Teil des freigewordenen CO₂ wieder auf.
- Am Ende des Lebenszyklus (Modul D) wird von der Weiterverwertung als rezyklierte Gesteinskörnung ausgegangen und eine Gutschrift für eingesparte Energie gegenüber der Produktion neuer Gesteinskörnung vergeben.
- Bei Fertigteilen werden aktuell üblicherweise Betongüten > C30/37 und CEM I eingesetzt.



Hauptbestandteile der CO₂-Bilanz von Normalbeton und Portlandzement nach Herstellungsschritten



Zementherstellung 90%, davon:
2/3 prozessbedingt
1/3 energiebedingt

Abb. 3.1

Qualitative CO₂-Bilanz im Lebenszyklus von Normalbeton

GWP von Beton und Zement

Tab. 31: CO₂-Äq. Emissionen je 1 m³ unbewehrtem Konstruktionsbeton exkl. Abfallverbrennung in kg CO₂-Äq./m³

Datensatz Betonprodukt UID / Quelle	gültig bis	Datensatz- typ	GWP _{total} [kg CO ₂ -Äq./m ³]			
			A1–A3	C3–C4	A+C	D
Transportbeton C20/25 923e1c71-f172-4902-a5f5-c4a1e8a773bc	2024	generisch	201	14	215	-4
Transportbeton C25/30 d2ae1721-bb2a-4386-9d9f-abb1c774b0a8	2024	generisch	222	14	227	-4
Transportbeton C30/37 258b377e-ec3b-4e8c-b3fd-ddateb370f7d	2024	generisch	259	14	263	-4
Transportbeton C50/60 079ed601-8b92-49cd-9c09-ab8e067366cf	2024	generisch	326	14	340	-4
Normalbeton C25/30 (CSC, CO ₂ -Modul, Branchenreferenzwert) siehe CSC Hintergrundbericht CO ₂ -Modul	-	-	237	-	-	-
Normalbeton C25/30 (CSC, CO ₂ -Modul, Level 1) siehe CSC Hintergrundbericht CO ₂ -Modul	-	-	166	-	-	-
Normalbeton C25/30 (CSC, CO ₂ -Modul, Level 2) siehe CSC Hintergrundbericht CO ₂ -Modul	-	-	142	-	-	-
Normalbeton C25/30 (CSC, CO ₂ -Modul, Level 3) siehe CSC Hintergrundbericht CO ₂ -Modul	-	-	119	-	-	-
Normalbeton C25/30 (CSC, CO ₂ -Modul, Level 4) siehe CSC Hintergrundbericht CO ₂ -Modul	-	-	95	-	-	-

GWPA+C nach Betongüte ca. +10 %

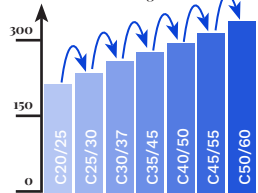


Abb. 3.3

Reduktion der CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung gemäß CSC CO₂-Modul exemplarisch für einen Beton C25/30

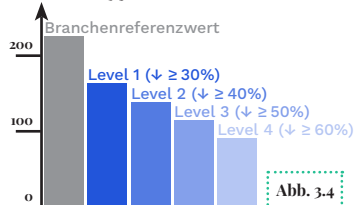


Abb. 3.4

Planerische Maßnahmen zum klimagerechten Bauen mit Beton und Zement

- **Material werkstoffgerecht einsetzen/Materialeinsatz minimieren:** z. B. Deckendicken optimieren; nicht oder gering belastete Wände z. B. aus ungebrannten Lehmziegeln anstatt Beton errichten.
- **Klinkerreduzierte Zemente und Betone CEM II/III** bevorzugen, CEM I vermeiden:
 - CO₂-Ersparnis von > 50 % möglich.
 - Weniger Rissbreitenbewehrung aus frühem Zwang erforderlich.
 - Langsameres Erhärtungsverhalten in der Planung berücksichtigen (Ausschulfristen beachten).
 - Anwendungsbereiche für Zementart und Expositionsklasse nach Zement-Merkblatt (09/2017), Tab. 10 überprüfen.
 - Ausschreibung nach Betoneigenschaften (z. B. CSC-Level), nicht nach Zementklassen.
- **Geringere Betongüten einsetzen**, um Zementgehalt und CO₂-Emissionen zu reduzieren (E-Modul und Zugfestigkeit (Rissbreiten) steigen nicht proportional mit Druckfestigkeit).
- **Beton als Hochleistungswerkstoff** nur dort einsetzen, wo er wirklich erforderlich ist.
- **RC-Beton:** Zusatzemissionen aus Transport/Verarbeitung gegen Ressourcenersparnis abwägen.
- **Betonfertigteile:** Einsatz lösbarer Verbindungen für einfacheren Rückbau prüfen, Betongüte und CEM II/III reduziert ausschreiben.

Materialeinsatz minimieren

Kreislauffähigkeit planen

Material anwendungsbezogen wählen

→ www.csc-zertifizierung.de/



3.2. Bau- und Bewehrungsstahl

Stahlherstellung

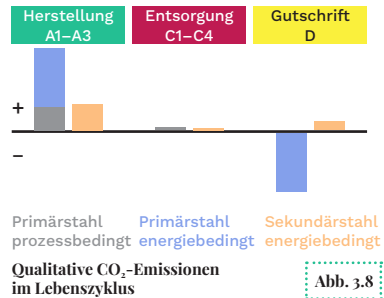
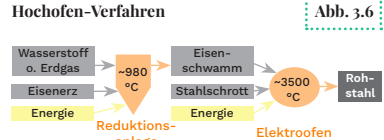
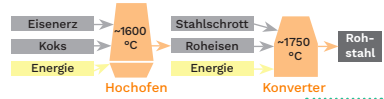
- Die Emissionen von Stahl werden hauptsächlich über das Herstellverfahren bestimmt.
- Baustahl wird in Deutschland primär über zwei Verfahrensrouten hergestellt:
 - 70 % Sekundärstahl durch Elektrolichtbogen-Verfahren aus Stahlschrott.
 - 30 % Primärstahl durch Hochofen-Verfahren aus Eisenerz.
 - <1 % Primärstahl durch Direktreduktion mit Erdgas oder zukünftig Wasserstoff.
- Für Primärstahl wird ein Stahlschrottanteil zum Kühlen eingesetzt.
- Beim **Hochofen-Verfahren** (Primärstahl) entstehen ca. 1/3 der Emissionen prozessbedingt durch die Reduktion des Eisenerzes: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$.
- Beim **Elektrolichtbogen-Verfahren** (Sekundärstahl) entstehen die Emissionen energiebedingt durch das Aufschmelzen des Stahlschrotts.
- Die Emissionen des Sekundärstahls sind fast ausschließlich energiebedingt und dementsprechend abhängig vom Strommix des Erzeugerlandes bzw. Stahlherstellers.
- Bei der **Direktreduktion mit Wasserstoff** (Primärstahl) wird Wasserstoff als Reduktionsmittel eingesetzt, wodurch die prozessbedingten Emissionen entfallen: $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$.
- Die Emissionen für Wasserstoffstahl hängen maßgeblich von den Emissionen der Wasserstoffproduktion ab. Hierfür gibt es aktuell keine verlässlichen Daten.

Recyclingpotenzial von Stahl

- Stahl wird am Lebenszyklusende je nach Quelle zu 83–97 % recycelt und zu 5–14 % wiederverwendet. 1–3 % gehen durch Sammelverluste verloren.
- Für Sekundärstahl wird eine geringe Menge mehr Schrott benötigt, als am Lebenszyklusende des Gebäudes wieder in den Kreislauf zurückgegeben wird, weshalb hier in Modul D (positive) Emissionen für den »verlorenen« Wertstoff angesetzt werden müssen.
- Primärstahl verursacht wesentlich höhere Emissionen als Sekundärstahl. Primärstahl erhält in Modul D eine hohe Gutschrift, da durch den am Lebensende des Gebäudes noch verfügbaren Stahlschrott im nächsten Lebenszyklus die Produktion von Primärstahl durch Sekundärstahl substituiert werden kann.

Hochfester Stahl

Für hochfeste Stähle werden thermomechanische Verfahren und/oder Legierungselemente verwendet. Über die Emissionen dieser Verfahren gibt es keine verlässlichen Daten. Die EPD-Datensätze umfassen alle Stahlgüten als Durchschnittswerte.



GWP von Stahl

- In Deutschland werden Bleche hauptsächlich aus Primärstahl, Profile und Bewehrungsstahl hauptsächlich aus Sekundärstahl hergestellt.
- Da in der Ökobaudat-15804+A2 aktuell kein Durchschnittsdatsatz für Stahlprofile vorliegt, wird empfohlen die nach 15804+A2 erstellten Durchschnittsdatsätze von [bauforumstahl](#) e.V. zu verwenden, die voraussichtlich beim nächsten Ökobaudat-Update aufgenommen werden.

Tab. 3.2: CO₂-Äq. Emissionen von 1t verschiedener Stahlprodukte

Datensatz Stahlbauprodukt UUID / Quelle	gültig bis	Datensatztyp	GWP _{total} [kg CO ₂ -Äq./t]				Anwendung
			A1–A3	C3–C4	A+C	D	
Structural Steel: Sections and merchant bars EPD-BFS-20230271-IBG1-EN		Durchschnitt	560	0	560	210	Gewalzte Träger aus S235–S500
Structural Steel: Heavy Plates EPD-BFS-20230270-IBG1-EN		Durchschnitt	2530	0	2530	-1470	Bleche (z. B. Kopfplatten, geschweißte Träger etc.) 5–510 mm aus S235–S960
Stahl Feinblech (0,3–3,0mm) ba0565e-e9e2-4b32-939e-60c67e503390	2024	generisch	245	-	245	-1494	Bleche 0,3–3 mm (alle Stahlgüten)
Bewehrungsstahl 8565038f-5c2f-48d7-94cb-958498ba9dd3	2024	generisch	609	-	609	145	

Planerische Maßnahmen zum klimagerechten Bauen mit Stahl

→ Materialeinsatz minimieren

- Einsatz von hochfesten Stählen, wenn Materialeigenschaften ausgenutzt werden können (zum Beispiel als Fachwerkträger, Zugglieder).
- Wenn Durchbiegung maßgebend wird, bieten hochfeste Stähle keinen Vorteil.

→ Kreislaufgerecht bauen

- Lösbare Verbindungen für eine zukünftige Wiederverwendung.
- Standardisierte Bauteile und Verbindungen für eine höhere Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Nutzung.
- Langfristiges Speichern der Abnahmeprüfzeugnisse für den nächsten Gebäudelebenszyklus.

→ Auswahl der Stahlprodukte

- Aufgrund der Abhängigkeit der Emissionen vom Strommix sollten Stahlprodukte vorrangig aus Ländern bzw. von Herstellern mit einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien bezogen werden. Dabei sollten ggf. die zusätzlichen Transportemissionen berücksichtigt werden.

Materialeinsatz minimieren

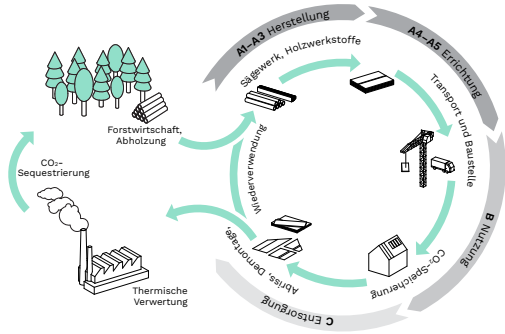
Kreislauffähigkeit planen

Sorgfältige Produktauswahl

3.3. Holz

CO₂-Ströme von Holz in der Ökobilanz

- Durch oxygene Photosynthese wird Kohlenstoff aus dem CO₂ in der Atmosphäre im Holz gebunden (= C-Sequestrierung). In der Ökobilanz entsteht durch dieses gespeicherte biogene CO₂ im Modul A1 der Herstellungsphase ein negatives GWP. Daher dient verbautes Holz als temporär zusätzlicher Kohlenstoffspeicher zum Wald.
- Im **Herstellungsprozess** von Holzprodukten entstehen CO₂-Emissionen, z. B. bei der Trocknung von Holz (bei gasbetriebenen Trocknungsöfen) und durch Bereitstellung von Prozessenergie. Die fossilen Herstellungsemissionen variieren je nach Holzdicke, Holzprodukt, Verarbeitungsgrad (siehe Tab. 3.3). Auch bei Bau und Rückbau entstehen durch Transporte und Prozesse weitere fossile CO₂-Emissionen.
- Mit der **Entsorgung** des Holzproduktes in Phase C3 wird die Gutschrift des sequestrierten CO₂ wieder abgezogen. Als Summe über den Lebenszyklus ergibt sich damit ein positives GWP, das rein fossile CO₂-Emissionen berücksichtigt.
- Das anschließende **Verwertungsszenario** (oder End of Life Szenario = EoL) entscheidet darüber, ob das sequestrierte CO₂ tatsächlich frei wird – wie es beim heutigen Standardszenario der thermischen Verwertung der Fall ist – oder ob das CO₂ durch die Wiederverwendung oder stoffliche Wiederverwertung (z. B. Kaskadennutzung) der Holzprodukte über den Gebäudelebenszyklus hinaus gespeichert bleibt.

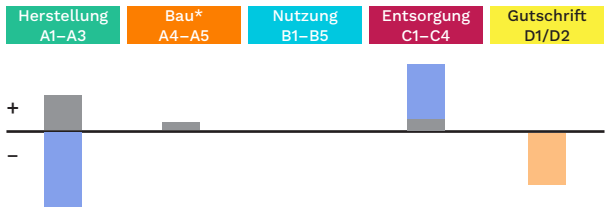


Lebenszyklus Holz als Kreislauf mit unterschiedlichen EoL-Szenarien

Abb. 3.9

Abb. 3.10

Qualitative Darstellung fossiler und biogener CO₂-Ströme im Lebenszyklus von Holz



* Es entstehen Emissionen bei Transport und Bau. Diese sind nicht in den Standarddatensätzen vorhanden und können projektspezifisch berechnet werden.

fossil
biogen
Gutschrift

GWP von Holz und Holzwerkstoffen

Tab. 3.3: CO₂-Äq.-Emissionen und CO₂-Sequestrierung von 1 m³ unterschiedlicher Holzbauprodukte

Datensatz Holzbauprodukt UUID / Quelle	gültig bis	Datensatz- typ	GWP _{total} [kg CO ₂ -Äq./m ³]					Sequestrierung A1 GWP _{biogen}
			A1-A3	C3-C4	A+C	D _{energetisch}	D _{stofflich}	
Nadelschnittholz – getrocknet (Durchschnitt DE) 2bd4c91f-16e5-4e01-b8b5-0c01aac363ce	2028	repräsentativ	-741	803	62	-282	-13	-793
Laubschnittholz – getrocknet (Durchschnitt DE) e131431f-4d99-4d7a-ae0a-744a06de3524	2028	repräsentativ	-1136	1257	121	-452	-20	-1247
Konstruktionsvollholz (Durchschnitt DE) 7aba3603-0689-4da5-8d24-fd92ae398d07	2028	repräsentativ	-727	816	89	-283	-13	-806
Brettspertholz (Durchschnitt DE) 8c4eb262-9ae6-4ace-8f3d-0b06f2007f3e	2028	repräsentativ	-670	799	129	-239	-11	-789
Brettschichtholz – Standardformen (Durchschnitt DE) c836b484-773f-4a07-9baa-c70da743ccea	2028	repräsentativ	-663	821	158	-220	-11	-811

1 m³ Vollholz aus Nadelholz hat im Baumwachstum ca. 800 kg CO₂ durch Photosynthese gespeichert

Abb. 3.11

Planerische Maßnahmen zum klimagerechten Bauen mit Holz

- **Materialeffizient und tragwerksoptimiert planen mit Holz**
 - Angemessene Spannweiten wählen.
 - Geringen Verarbeitungsgrad von Holzprodukten bevorzugen.
 - Anteil der Stahl-Verbindungs-mittel der Konstruktion in Ökobilanz berücksichtigen.
- **Entwerfen für eine Wiederverwendung** der Holzbauteile nach dem Lebenszyklusende, z. B. durch einfache reversible Knotenpunkte, demontierbare Verbindungen, Stapeln, etc.
- **Bauen mit dem Bestand** bevorzugen: Holz ist als leichter Baustoff für Aufstockungen gut geeignet.
- **Lebensdauer** durch langlebige und dauerhafte Konstruktionen **verlängern** (konstruktiver Holzschutz).
- **Rohstoffherkunft** mitplanen:
 - Nur durch nachhaltige Forstwirtschaft wird der Erhalt der Wälder und die Fähigkeit des Waldes als dauerhafte CO₂-Senke zu dienen sichergestellt.
 - Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft ausschreiben. Die wichtigsten Zertifizierungen sind **PEFC** (Program for the Endorsement of Forest Certification) und **FSC** (Forest Stewardship Council).
 - Lokales Holz einsetzen: Reduktion von Emissionen durch kurze Transportwege. Regionale Hersteller können über → holz-von-hier.eu gefunden werden.

Materialeinsatz minimieren

Kreislauffähigkeit planen

Holz aus zertifizierter nachhaltiger Forstwirtschaft



3.4. Mauersteine

Ziegel (Z)

- Ziegel machen mit 42 % den Großteil am verbauten Mauerwerk im Wohnungsbau aus. Die CO₂-Emissionen bei der Herstellung resultieren v.a. aus der technischen Trocknung der Steinrohlinge und dem Brennvorgang.
- Bei Füllung des Loch- oder Kammeranteils mit Dämmstoffen (GZ) müssen weitere dämmstoffbedingte Emissionen berücksichtigt werden.
- Die deklarierte Gutschrift im Modul D ergibt sich aus der Weiterverwendung des Bruchmaterials als technische Gesteinskörnung oder als Sekundärrohstoff für die Herstellung von Vegetationssubstraten.

Porenbeton (PB)

- Porenbeton besitzt einen Anteil von 30 % am verbauten Mauerwerk. Die CO₂-Emissionen resultieren aus der Herstellung von Zement und Brantkalk (prozess- & energiebedingt) als Ausgangsmaterialien. Zusätzlich wird für die technische Dampferzeugung in den Autoklaven weitere Energie oftmals fossilen Ursprungs benötigt.

Kalksandstein (KS)

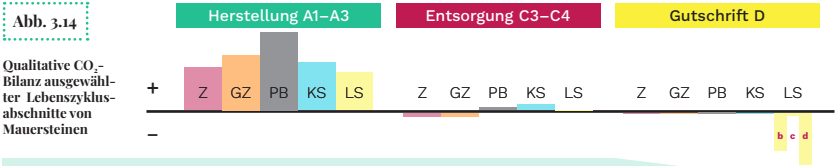
- Kalksandsteine haben einen Anteil von 24 % am errichteten Mauerwerk im Wohnungsbau. Die wesentlichen Emissionen resultieren aus der Herstellung des Brantkalks und der technischen Dampferzeugung in den Autoklaven zur Dampferhärtung der Steine.
- In der Nutzungsphase (Modul B1) wird aufgrund des Recarbonisierungspotentials eine Gutschrift von 47,5 kg CO₂-Äq./m³ deklariert. Für die Weiterverwendung des Bruchmaterials zur erneuten Steinherstellung oder als technische Gesteinskörnung wird im Modul D eine Gutschrift angerechnet. Bei einer vollständigen Deponierung (100%) sind diese Gutschriften höher ^a.

Leichtbeton- & Betonstein (LB/B)

- Die Verwendung von Betonsteinen ist prozentuell rückläufig und macht lediglich einen Anteil von 4 % am Mauerwerksbau aus. Die Ökobilanzierung von Beton und Zement werden in 31 genauer betrachtet und daher in diesem Abschnitt nicht näher beleuchtet.

Lehmstein (LS)

- Die CO₂-Emissionen der Lehmsteinherstellung fallen primär bei der technischen Trocknung an. Aktuell werden Lehmsteine mit fossilen Energieträgern getrocknet. Durch die Trocknung mit erneuerbaren Energien kann jedoch mehr als 76 % der ausgewiesenen CO₂-Emissionen (A1–A3) eingespart werden.
- Lehmsteine werden mit Lehmmauermörtel vermauert, der geringere CO₂-Emissionen aufweist als Zement- oder Dünnbettmörtel, welcher beim Vermauern von Kalksandsteinen oder Mauerziegeln verwendet werden.
- Die Gutschriften im Modul D variieren in Abhängigkeit des Szenarios am Lebensende (Abb. 314):
 - Wiederverwendung sortenrein rückgewonnener Lehmsteine, * Wiederverwertung des rückgewonnenen Abbruchmaterials als Sekundärrohstoff oder
 - Wiederverwertung des trocken rückgewonnenen Abbruchmaterials als Sekundärrohstoff (Trockendosierverfahren).



GWP von Mauersteinen

Tab. 3.4: CO₂-Äq.-Emissionen von 1 m³ verschiedener Mauersteine

Datensatz Mauerstein UID / Quelle	gültig bis	Datensatz- typ	Dichte ρ [kg/m³]	GWP _{total} [kg CO ₂ -Äq./m³]					
				A1–A3	C3–C4	A+C	D	A+D	
Mauerziegel ungefüllt (Z) 30514538-fcb4-483b-b5d5-c108d2037536	2026	Durchschnitt	575	113,0	-9,6	103,4	-1,5	111,5	
Mauerziegel gefüllt (GZ) ccce13d3-1e5b-41e2-a867-0d844ee6c1bf	2026	Durchschnitt	605	146,0	-9,6	136,4	-1,5	144,5	
Porenbeton (PB) e6819670-e6c6-4104-adea-f78bb2f49e6	2028	Durchschnitt	428	206,9	7,7	214,6	-3,2	203,7	
Kalksandstein (KS) c00d7baa-755a-4a4a-baf3-4fe53d68a041	2026	Durchschnitt	1800	126,0	14,0	140,0	-0,9 -2,7	125,3 123,3	
Lehmstein Anwendungsklasse Ib (techn. Trocknung) (LS) – UPD_LS_DVL2023001_PKRÜ5-DE [Muster-UPD Dachverband Lehm e.V. nach DIN 18945]	2028	Durchschnitt	1800	99,4	0,3	99,7	-99,4 -5,3 -137,5	0,0 94,1 38,3	

Abb. 3.12
Lehmstein- und Ziegelherstellung

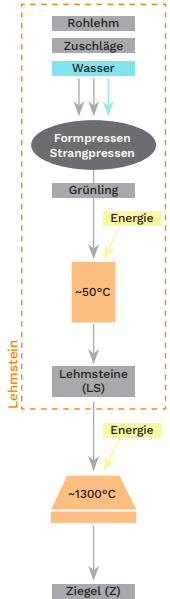
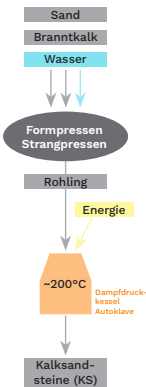


Abb. 3.13
Kalksandsteinherstellung



Planerische Maßnahmen zum klimagerechten Bauen mit Mauerwerk

- **Materialeinsatz minimieren/Material anwendungsspezifisch wählen**
 - Bei bis zu 4-geschossigen Gebäuden ist der Einsatz von Lehmsteinen nunmehr normativ (DIN 18940:2023) und aufgrund von vergleichbar geringer Lasten möglich.
 - Wärmedämmeigenschaften und technische Erfordernisse pro m² Mauerwerk vergleichen.
 - Mauerziegel oder Leicht- bzw. Porenbetonsteine können ggf. ohne zusätzliche Dämmebene ausgeführt werden (Kalksandstein- und Lehmsteinmauerwerk benötigt eine zusätzliche Dämmschicht).
- **Kreislaufgerecht bauen**
 - Lehmbaustoffe können in derselben Produktebene bleiben, auch wenn die Steine beschädigt entnommen werden, was bei Kalksandstein oder Mauerziegel nicht möglich ist.
 - Beim Rückbau sollte eine sortenreine Trennung von Mauersteinen, -mörtel sowie Dämmstoffen stattfinden, um eine Wiederverwendung zu ermöglichen (Mörtelfestigkeit).

Materialeinsatz
minimieren

Kreislaufgerecht bauen

Funktionales Äquivalent:
kg CO₂-Äq./m² Wandfläche

Wir würden gerne in den nächsten Ausgaben dieser Tafeln **weitere Baumaterialien und Bauprodukte** ergänzen, wie zum Beispiel Naturstein, Bambus, andere Metalle als Stahl, Faserverstärkte Kunststoffe oder auch nichttragende Bauprodukte. Parallel arbeiten wir an Entwurfstafeln für **Brücken und Zirkularität**. Wir freuen uns auch sehr über Eure Unterstützung!

5.1. GWP eines Tragwerks am Beispiel eines Bürogebäudes

[illegible]

Quelle: Abschlusssarbeiten Simeon Werner und Jakob Fluck bei der Hochschule Karlsruhe in Zusammenarbeit mit der Ingenieurgruppe Bauen

5.2. GWP von gängigen Deckensystemen

CO₂-optimierte Bemessung

Bemessungsannahmen

Ausbaulast: 1,5 kN/m²

Nutzlast: 3,0 kN/m²

System: 2-Feldträger



Abb. 5.2

Holz-Beton-Verbunddecke (HBV)

5,0 kg/m² konstr. Bewehrung

GZG: $w < L/300$ bzw. $w < L/200$

Verbund über Kernen

Brettspertholzdecke (BSP/CLT)

GZG: $w < L/300$

Schwingungsnachweis erfüllt

mit > 8 Hz bzw. $< 0,05$ m/s²

Stahlbetondecke (StB)

GZG: $w_{\text{Punkt A}} < L/250$ bzw. $w_{\text{Punkt B}} < L/500$

Rissbreite max. 0,4 mm

Tab. 51: Global Warming Potential (GWP) für verschiedene Deckensysteme

Länge L [m]	Holz-Beton-Verbunddecke (HBV) ¹					Brettspertholzdecke (BSP)			Stahlbeton _s (w < L/250)			Stahlbeton _s (w < L/500)		
	Beton	Höhe [cm]	Holz	Höhe [cm]	GWP ³	Lagen	Höhe [cm]	GWP ³	Beton	Höhe [cm]	GWP ³	Beton	Höhe [cm]	GWP ³
4	C20/25	6	BSPH C24	10	30	3s: 4-4-4	12	17	C16/20	14	35	C16/20	16	39
6	C20/25	6	BSPH C24	18	40	5s: 6-4-4-4-6	24	33	C16/20	24	56	C16/20	28	64
8	C20/25	6	BSPH C24	26	51	5s: 8-3-8-3-8	30	41	C16/20	32	77	C16/20	36	85
10	C20/25	6	BSPH C24	32	59	5s: 8-6-8-6-8	36	49	C16/20	44	102	C16/20	58	129
12	C20/25	8	BSPH C24	38	72	4	4	4	C16/20	52	122	C20/25	70	171

Faustformeln

Näherungsweise Berechnung der Ökobilanz einer Decke

$$GWP_{HBV}^3 = h_{BSP} [\text{cm}] \times 1,345 + 3,4 + h_{\text{Beton}} [\text{cm}] \times \ddot{o}$$

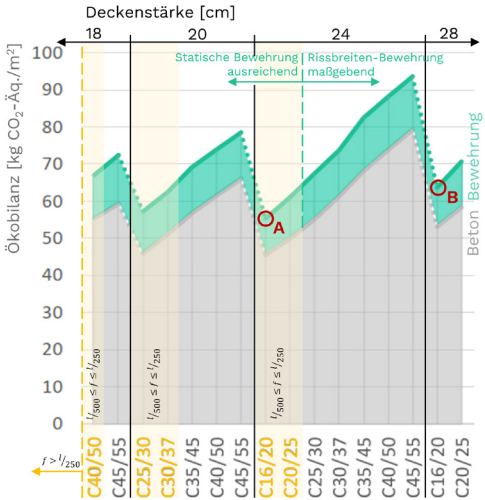
$$GWP_{BSP}^3 = h [\text{cm}] \times 1,345$$

$$GWP_{\text{Beton}}^3 = m_{\text{Stahl}} [\text{kg/m}^2] \times 0,683 + h [\text{cm}] \times \ddot{o}$$

(Bewertungssystem: QNG; EPD nach ÖKOBAUDAT 2022)

$$m_{\text{Stahl}} [\text{kg/m}^2] = \text{Spannweite} [\text{m}] \times 3,2 - 0,8$$

$$\ddot{o} = \begin{cases} 1,9 & \text{für C16/20} \\ 2,1 & \text{für C20/25} \\ 2,3 & \text{für C25/30} \\ 2,6 & \text{für C30/37} \\ 2,9 & \text{für C35/45} \\ 3,1 & \text{für C40/50} \\ 3,3 & \text{für C45/55} \end{cases}$$



Ökobilanz für einachsige, 6m spannende Betondecke

Abb. 5.3

Optimierungsgrundsätze

Grundsätze zur Verbesserung der Ökobilanz einer Decke

- Möglichst geringe Betongüte wählen (für Expositionsklasse XC1 ist C16/20 zulässig)
- Möglichst hohe Durchbiegung zulassen (L/250)
- Möglichst geringe Spannweiten planen
- Auf Mindestrissbreitenbewehrung verzichten (Abstimmung Bauherr:in)

- 1 Bei BSPH-Decke: Ausbaulast = 3,0 kN/m² (Schüttung für erf. Schwingungseigenschaften).
- 2 Statisches System: Einfeldträger (Zweifeldträger normativ nicht zulässig).
- 3 Einheit: kg CO₂-Äq./m²
- 4 Nicht möglich mit bestehenden Randbedingungen und gängigen Holzprodukten.

6. Checkliste Tragwerksentwurf

6.1. Globale Entwurfsparameter (integral, frühe Planungsphase, Entwurf)

Projektgrundlagen

- ☐ Umnutzung: Kann das Gebäude saniert oder umgenutzt werden?
- ☐ Nutzung: Können Nutzungen im Grundriss sinnvoll angeordnet werden?
- ☐ Untergeschoss: Kann auf das Untergeschoss ganz oder teilweise verzichtet werden (Technikgeschoss, Alternatives Mobilitätskonzept)? Kritisches Hinterfragen der Notwendigkeit von WU-Anforderungen
- ☐ Lastannahmen: Kritisches Hinterfragen von Lastannahmen vs. Flexibilität?
- ☐ Gebrauchstauglichkeit: Wurden Gebrauchstauglichkeitsanforderungen kritisch hinterfragt, wenn diese maßgebend für die Bauteildimensionen sind (z. B. Verformungsgrenzwerte lockern)?
- ☐ Gutachten: Wurden Angaben im Baugrundgutachten und Brandschutzkonzept kritisch hinterfragt und ggf. optimiert?

Material

- ☐ Materialgerechtes Bauen: Können wir Baustoffe nach ihren materialspezifischen Stärken sinnvoll einsetzen?
- ☐ Emissionsarme Baustoffe: Funktioniert der Entwurf für emissionsarme Baustoffe (z. B. Holz / Lehm...)?
- ☐ Leichtbau: Kann das Konstruktionsgewicht reduziert werden und so die Gründung optimiert werden?
- ☐ Kreislauf und Demontierbarkeit: Können Bereiche, Bauteile oder Baustoffe aus dem Bestand neu genutzt werden? Sind Bauteile demontierbar und ist der Entwurf kreislaufgerecht konstruiert?
- ☐ Ökobilanzierung: Wird die Ökobilanzierung entwerfsbegleitend und -optimierend genutzt?

Statisches System

- ☐ Lastabtrag: Gibt es einen durchgängigen vertikalen und horizontalen Lastabtrag?
- ☐ Tragaster: Können Stützenraster und Spannweiten reduziert werden?
- ☐ Gründung: Kann die Gründung optimiert werden (z. B. Flachgründung vs. Tiefgründung / Bodenplatte vs. Einzel- und Streifenfundamente)?
- ☐ Statische Höhen: Können statische Höhen für effiziente Deckensysteme früh im Entwurf vorgesehen werden (z. B. Rippendecke vs. Flachdecke)? Können Rippenzwischenräume genutzt werden (z. B. für TGA)?
- ☐ Spannweitengerechte Tragsysteme: Können für große Spannweiten effiziente Systeme eingesetzt werden (z. B. Fachwerkträger)?
- ☐ Flexibilität: Kann das Tragwerk für spätere Flexibilität ausgelegt werden (z. B. tragender Skelettbau und nichttragende Wände aus emissionsarmen Baustoffen)?
- ☐ Statisch unbestimmte Systeme: Können durch statisch unbestimmte Systeme Bauteildimensionen reduziert werden (z. B. Durchlaufträger vs. Einfeldträger)?

6.2. Lokale Entwurfsparameter (tragwerksspezifisch, spätere Planungsphase)

- ☐ Bauteildimensionen: Können in der Genehmigungsstatik noch Bauteildimensionen reduziert werden?
- ☐ Ausnutzung: Können Ausnutzungen abgewogen und Bemessungstypen sinnvoll gestaffelt werden?
- ☐ Gebrauchstauglichkeit: Kann die Gebrauchstauglichkeit mittels realitätsnaher Modellbildung rechnerisch optimiert werden (z. B. Ansatz von Teileinspannung / zusätzliche Steifigkeiten)?
- ☐ Materialgüten: Erfolgte eine bewusste Wahl von Materialgüten und ein Variantenvergleich mittels Ökobilanzierung?
- ☐ Vorspannung: Kann das Verformungsverhalten mittels Vorspannung verbessert werden?
- ☐ Grundbewehrung: Können Rissbreitenanforderungen für Stahlbetonbauteile reduziert werden und so flächige Grundbewehrung eingespart werden?
- ☐ Ausschreibung: Wurden Hinweise auf emissionsarme Baustoffe (z. B. CO₂-reduzierter Beton nach Eigenschaften) gegeben?
- ☐

Das Tragwerk bietet enormes Optimierungspotenzial bezüglich der CO₂-Emissionen. Um dieses auszuschöpfen, sind die sinnvolle Festlegung der Projektgrundlagen, die Wahl eines effizienten statischen Systems und der größtmögliche Einsatz von emissionsarmen Materialien wichtig. Globale Entwurfsparameter sind in frühen Projektphasen integral im gesamten Planungsteam abzustimmen und bieten das größte Potenzial. Lokale Entwurfsparameter können in späteren Planungsphasen tragwerksspezifisch optimiert werden.

7. Argumente für Bauherr:innen

*Projekterfolgsriterien oder Ziele von Bauherr:innen sind die drei Dimensionen **Qualität, Zeit und Kosten**. In einer ganzheitlichen Betrachtung wird noch eine vierte Dimension, z.B. in Form von gesellschaftlicher oder ökologischer **Wirkung** ergänzt. In jeder dieser Kategorien gibt es Argumente, um Bauherr:innen von einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Bauweise zu überzeugen.*

Kosten

- Materialeinsparungen haben positiven Effekt auf Kosten und auf Einsparung von grauen Emissionen
- Fördermöglichkeiten durch Bund und Länder, EU-Taxonomie
- Langfristige Wertsteigerung durch erhöhte Nachfrage nach nachhaltigen Immobilien
- Potenzielle CO₂-Steuer absehbar
- Bei früher Einbeziehung in Planung nur geringe Mehrkosten oder kostenneutral
- Potenzielles Materiallager, das bei kreislauffähiger Konstruktion zukünftig ein Investment darstellt

Zeit

- Mehr Zeitinvestment in frühe Planungsphasen lohnt sich
- Bei bestimmten Bauweisen z. B. vorgefertigter Holzbau beschleunigte Bauzeiten möglich

Qualität

- Vorteile bei Zertifizierungen z. B. QNG und somit höhere Qualität z. B. für Vermietung
- Durch geschickte Planung keine Einschränkungen in Qualität z. B. kleinere Stützenraster
- Bessere Planung durch erhöhte Identifikation im Planungsteam

Wirkung

- Beitrag zum Klimaschutz und zur Nachhaltigkeitsstrategie
- Höhere Identifikation der Nutzer:innen
- Vorbild- und Vorreiterfunktion
- Motivation und Identifikation im Planungsteam

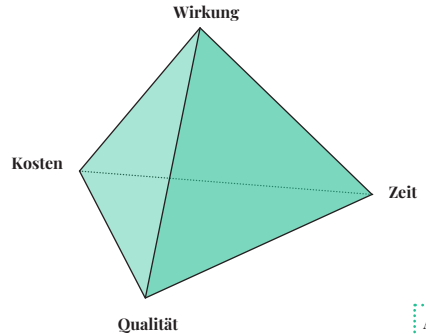


Abb. 7.1

*Bauherr:innen haben großen Handlungsspielraum für Entwurfsentscheidungen durch bewusste Wahl der entsprechenden Zielvorgaben. Werden nachhaltige Zielvorgaben **früh im Projekt** definiert, kann der Entwurf gut in Einklang mit den Zielen gebracht werden.*

8. Einfluss früher Planungsphasen auf die Reduktion der Grauen Emissionen

Die folgende Grafik zeigt auf, wie wichtig frühes nachhaltiges Handeln in Projekten ist. Die Planungsphasen und Leistungsphasen

nach HOAI sind als Anhaltspunkte zu verstehen, der genaue Ablauf ist projektspezifisch, z. B. wenn eine GU-Vergabe durchgeführt wird.

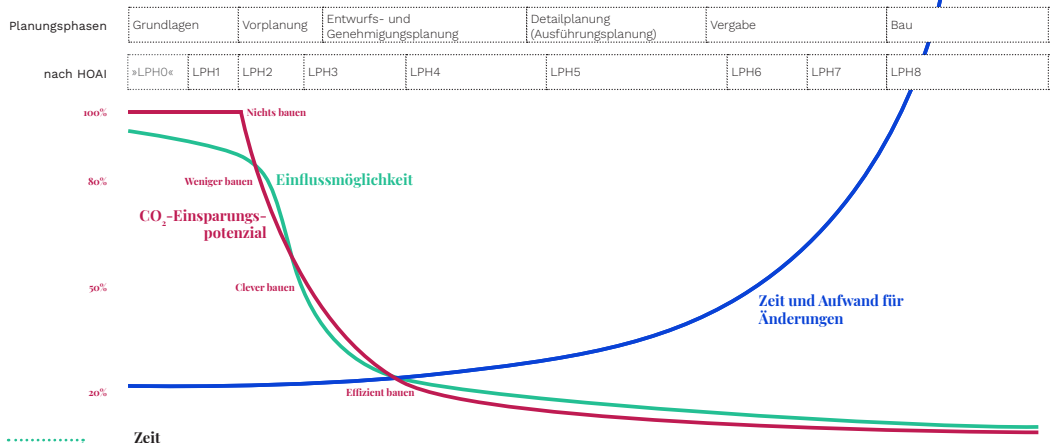


Abb. 8.1

Basierend auf DGNB und IStructE

Um nachhaltige Projekte zu planen und zu bauen, müssen sich Tragwerksplanende verstärkt in der »Leistungsphase 0« einbringen. Im Tragwerk steckt großes Potenzial, welches nur durch frühe Einbindung der Fachplaner:innen ausgeschöpft werden kann. Je später im Projektverlauf über nachhaltige Lösungen nachgedacht wird, desto unwahrscheinlicher, teurer und komplizierter ist ihre Umsetzung.