

Kapitel 2

KLIMASCHUTZ UND NACHHALTIGKEIT

Stand: 08/2025

Dr. Sebastian Pohl, Darmstadt



1. Einleitung

Die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (UN Sustainable Development Goals, kurz: UN SDGs [1]) und die Klimaschutzziele des Pariser Abkommens von 2015 [2] stecken global den politischen Rahmen für eine dauerhaft zukunftsfähige Lebens- und Wirtschaftsweise ab.

Als Teil der Klimaschutzgesetzlich maßgeblichen Sektoren

- Gebäude
- Industrie
- Energie-/Abfallwirtschaft
- Verkehr

kommt der Bau- und Immobilienwirtschaft eine Schlüsselrolle im Transformationsprozess zu. Hintergrund ist ihre sozioökonomische Bedeutung sowie insbesondere Ressourcenintensität und der Anteil an der Emittierung von schädlichen Treibhausgasen (Bild 1).

Im Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung [4] wird den sogenannten Handlungsfeldern Industrie und Gebäude eine zentrale Position zugeordnet. Für die Baustoffindustrie wird ein Schwerpunkt auf die Bereiche Zement/Kalk (als Bindemittel für viele mineralisch basierte Baustoffe wie z.B. auch den Kalksandstein) und Stahl gesetzt. Denn deren Potenziale bei der Reduzierung von Verbrennungs- und Prozessemissionen durch Energieträgersubstitution, Verfahrensumstellungen und Effizienzsteigerungen scheinen noch nicht ausgeschöpft. Das Handlungsfeld Gebäude wird neben energiewirtschaftlichen Aspekten beispielsweise auch mit einem Maßnahmen- und Förderstrang für effiziente Gebäude unterfüttert. Hiermit sollen vormalige investive Förderprogramme im Immobilienbereich zu einem Förderangebot konsolidiert werden, der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) für Einzelmaßnahmen, die Sanierung bestehender Gebäude und den Neubau.

Innerhalb dieses Maßnahmen- und Förderstrangs für effiziente Gebäude wird nicht nur ein starker Bezug zum Klimaschutz, sondern auch zum ganzheitlich nachhaltigen Bauen gesetzt. Denn die Förderung respektive die Förderkonditionen werden in den Kontext des sogenannten *Qualitätssiegels Nachhaltiges Gebäude (QNG)* als Anforderungs- und Bewertungsraster für nachhaltiges Bauen gestellt. Das QNG ist dabei vor allem ein Instrument zum Erhalt bestehender Nachhaltigkeitsbewertungs- und -zertifizierungssysteme bei gleichzeitiger Qualitätssicherung in Bezug auf die Gewährleistung von Grund- und Mindestanforderungen und einer inhaltlichen Harmonisierung.

Bereits vor dem Aufkommen der BEG-Förderung waren die Zertifizierungssysteme für Nachhaltiges Bauen markt- und praxisrelevant für bestimmte Bauvorhaben und Projektkonstellationen. Insofern waren sie grundsätzlich branchengängig und etabliert. Durch die BEG-Förderung haben sie einen weiteren deutlichen Schub erhalten, fraglos jedenfalls, was die branchenweite Bekanntheit betrifft.

Aktuell streben die Trägerschaften der Zertifizierungssysteme für Nachhaltiges Bauen eine Weiterentwicklung in Richtung einer Selbst-Harmonisierung mit den QNG-Anforderungen an, um dadurch die Anwendbarkeit in und für Projekte mit Förderambitionen zu erleichtern. Parallel zeichnen sich in der Systemlandschaft auch übergeordnete, generelle Weiterentwicklungen ab, z.B. beim Zertifizierungssystem für Neubauten der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB) als nach statistischen Zertifizierungszahlen marktführendem System in Deutschland.

Die Fokusthemen Klimaschutz/Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Kreislauffähigkeit/Ressourceneffizienz zeigen über welche großen Chancen und Potenziale der Baustoff Kalksandstein verfügt, um ganz wesentliche Beiträge zu mehr ganzheitlicher Nachhaltigkeit in den genannten Fokusthemen zu leisten.

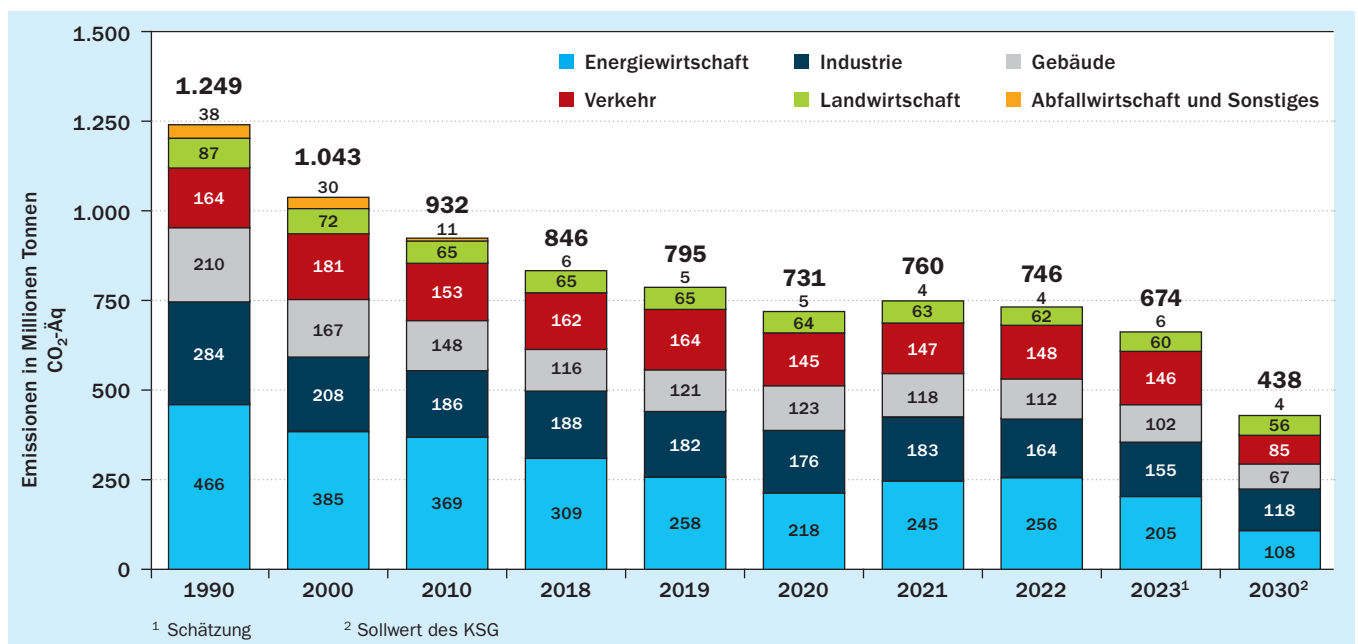


Bild 1 Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland gemäß Sektoren des Klimaschutzgesetzes (KSG) [3]

DGNB der Version 2023

Das DGNB-System fokussiert die Themen Klimaschutz/Reduzierung von Treibhausgasemissionen und Kreislauffähigkeit/Ressourceneffizienz und ergänzt diese auch um Aspekte der Klimaresilienz oder einer digitalisierten Projekt- und Objektdokumentation. Dazu werden einige bisherige Kriterien gestrichen oder deren Inhalte selektiv „umverteilt“ und insbesondere neue Kriterien und Bewertungsinhalte integriert.

Neu ist auch eine deutliche Ausweitung von Mindestanforderungen an die grundlegende Zertifizierbarkeit von Gebäuden und die Aufnahme von (weiteren) Mindestanforderungen an eine Zertifizierung in der höchsten Zertifikatsstufe Platin.

Auch Suffizienzthemen finden verstärkt Einzug ins System, indem u.a. bei der Betrachtung des thermischen Komforts eine Fokussierung auf die Kühlperiode erfolgt und der Aspekt des Schallschutzes nur noch zwischen fremden Nutzungseinheiten eines Gebäudes im Rahmen der raumakustischen Bewertung adressiert wird.

Eine angepasste Kalibrierung der Gewichtung der Querschnittsqualitäten Technik und Prozesse rundet die Weiterentwicklungen in der DGNB ab.

2. Grundlagen der deutschen Systeme zur Nachhaltigkeitsbewertung

2.1 Ganzheitlicher Bewertungsansatz

Die Landschaft an (nationalen) Bewertungs- und -zertifizierungssystemen für nachhaltige Gebäude in Deutschland wird von folgenden Systemanbietern bzw. -trägerschaften repräsentiert:

- der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB)
- dem Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V. (NaWoh)
- dem Bau-Institut für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen GmbH (BiRN)
- dem ressortzuständigen Bauministerium (BMWSB) als Anbieter und Träger des hoheitlichen Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB)

Internationale System wie

- die britische Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) und
- das US-amerikanische Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

haben für die deutsche Wohnungswirtschaft nur eine untergeordnete Bedeutung und bisher auch keine Relevanz für die BEG-Förderung/das QNG-Siegel.

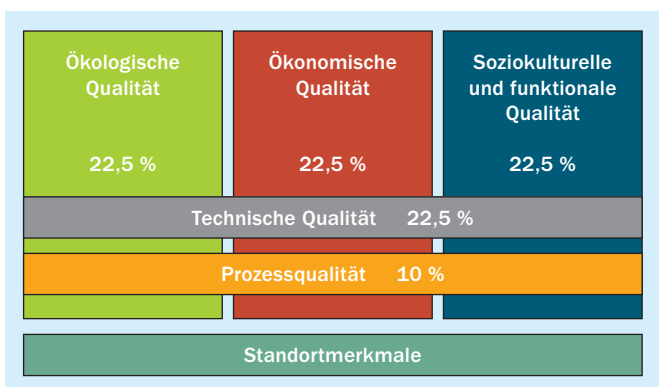


Bild 2 Nachhaltigkeitsdefinition und Grundstruktur BNB-System [5]

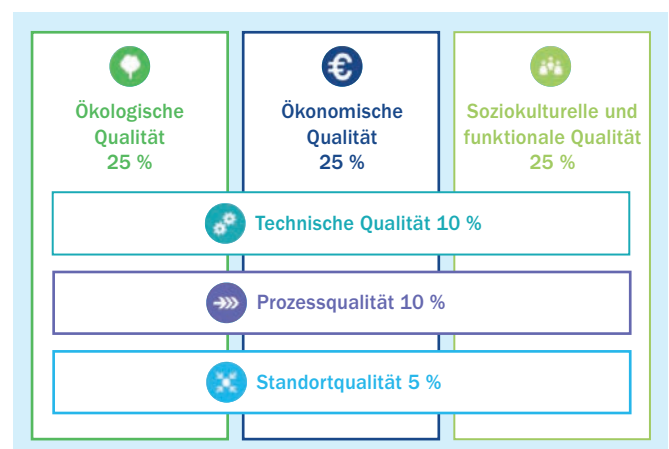


Bild 3 Nachhaltigkeitsdefinition und Grundstruktur DGNB-System [6]

2.1.1 Systemgrundlagen und Kriterienübersicht der Basis-Systeme BNB und DGNB

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen des Bundes (BNB-System) als öffentlicher und das System der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB-System) als privatwirtschaftlicher Strang des damaligen Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen mit gemeinsamem Entwicklungs- und Markteinführungsursprung verfolgen von Anfang an einen ganzheitlichen Ansatz bei der Bewertung (und anschließenden Zertifizierung) der Nachhaltigkeitsqualität von Gebäuden. Dies zeigt sich daran, dass

- die Definition der Nachhaltigkeit von Gebäuden das allgemein anerkannte Drei-Säulen-Modell aus gleichwertiger Ökologie, Ökonomie und Soziokultur widerspiegelt, vervollständigt um sogenannte Querschnittsqualitäten (Technische- und Prozessqualität) und Qualitäten des Standorts (Bild 2 und 3)
- die weitere Strukturierung und Konkretisierung über sogenannte Bewertungskriterien je Säule bzw. Qualität erfolgt und
- jedes Kriterium über Indikatoren inklusive entsprechender Bewertungsmethoden und Benchmarks quantifiziert und operationalisiert wird.

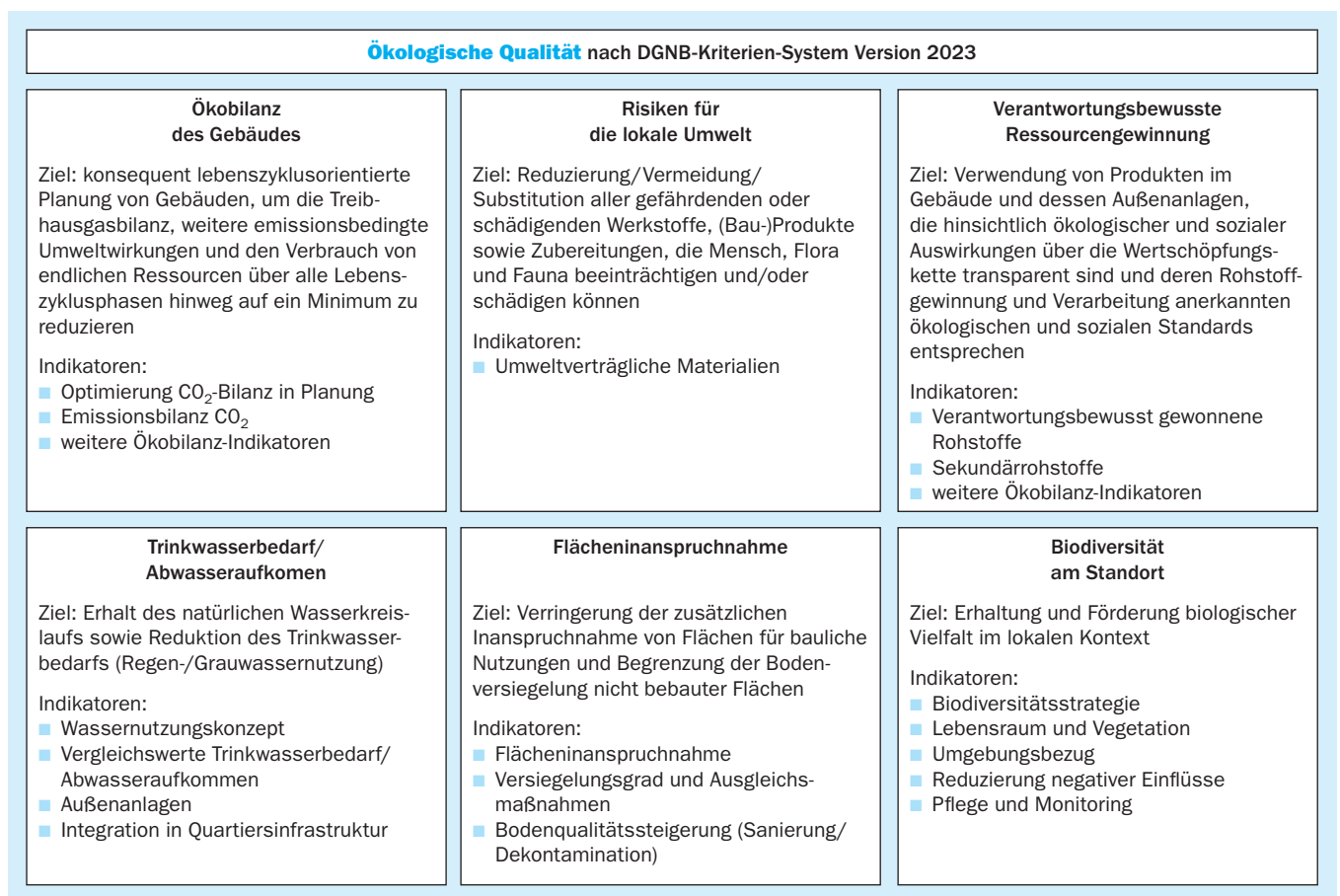


Bild 4 Inhaltsüberblick Themenfeld Ökologie im DGNB-System

Das Themenfeld (für DGNB) *Ökologie* adressiert die Bewertungsaspekte ökobilanzieller Umweltwirkungen über den Gebäudelebenszyklus (u.a. CO₂-Fußabdruck als Treibhausgaspotenzial in CO₂-Äquivalenten), der nachhaltigen Ressourcenverwendung/ Ressourceneffizienz (inklusive der Ressource Wasser) und der Materialökologie/Baubiologie (bzgl. Verwendung möglichst gesundheitsverträglicher/umweltschonender Bauprodukte) sowie ergänzend der Biodiversität (Bild 4).

INFO

Der Baustoff Kalksandstein beinhaltet keine umweltgefährdenden oder schädigenden Inhaltsstoffe und zeichnet sich durch eine extreme Langlebigkeit aus.



Bild 5 Inhaltsüberblick Themenfeld Ökonomie im DGNB-System

Das Themenfeld *Ökonomie* thematisiert einerseits den Aspekt der gebäudebezogenen Kosten über den gesamten Lebenszyklus, andererseits ergänzend auch die Wertstabilität im Sinne einer möglichst hohen Nutzungsflexibilität und Anpassungsfähigkeit eines Gebäudes (Bild 5).

INFO

Kalksandstein als robuster und wartungsfreier Wandbaustoff ermöglicht eine der wirtschaftlichsten Wandkonstruktionen.

Soziokulturell-funktional steht der Mensch als Gebäudenutzer im Fokus, abgebildet z.B. über eine Bewertung der thermischen, akustischen und visuellen Komfortbedingungen sowie der Raumluftqualität (als wichtige Grundvoraussetzung der Nutzergesundheits) und der barrierefreien Nutzbarkeit eines Gebäudes (Bild 6).

INFO

Gebäude aus Kalksandstein tragen durch die hohe Masse zu einem sehr guten Schallschutz und einem hohen thermischen Komfort bei. Sie sorgen für ein behagliches Wohnraumklima und eine sehr gute Raumluftqualität.

In der ersten Querschnittsqualität der *Technik* werden vor allem bauliche/technische Voraussetzungen für möglichst reduzierte Umweltwirkungen über den Lebenszyklus (Wärmeschutz) und

für eine möglichst hohe Ressourceneffizienz (Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit bzw. zirkuläres Bauen) inklusive Mobilitätsaspekten (Merkmale der Mobilitätsinfrastruktur) thematisiert (Bild 7).

INFO

Die funktionsgetrennte Kalksandstein-Bauweise mit separater Trag-, Dämm-, und Witterungsschicht ermöglicht die nachhaltige Optimierung der Außenwand.

In der zweiten Querschnittsqualität der *Prozesse* geht es um prozessuale Voraussetzungen in Planung, Bauausführung und Inbetriebnahme für ein möglichst nachhaltiges Ergebnis eines Projekts (Bild 8).

INFO

Eine optimale Planung mit Kalksandstein als Normprodukt trägt dazu bei, dass den Kriterien der Prozessqualität z.B. der Abfallvermeidung Rechnung getragen wird.

Abschließend werden unter der *Standortqualität* zum einen nachhaltigkeitsrelevante Merkmale des Standorts in Sachen Attraktivität (z.B. Verkehrsanbindung, Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen, etc.) gebündelt und zum anderen Risiken für ein Gebäude inklusive einer Betrachtung von möglichen (konstruktiven/baulichen/technischen) Gegenmaßnahmen und

Soziokulturell und funktionale Qualität nach DGNB-Kriterien-System Version 2023		
<p>Thermischer Komfort</p> <p>Ziel: Gewährleistung eines thermischen Komforts im Winter und im Sommer, der der vorgesehenen Nutzung entspricht und für angemessene Behaglichkeit sorgt</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Operative Temperatur Kühlperiode ■ Rel. Luftfeuchte Heiz-/Kühlperiode ■ Zugluft Kühlperiode ■ Temperaturasymmetrie/Fußbodentemperatur – Einflussnahme Nutzer 	<p>Innenraumluftqualität</p> <p>Ziel: Gewährleistung einer Luftqualität im Innenraum, die das Wohlbefinden und die Gesundheit der Nutzer nicht beeinträchtigt</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Innenraumhygiene (VOCs) ■ Lüftungsrate 	<p>Schallschutz und akustischer Komfort</p> <p>Ziel: Gewährleistung eines der Nutzung der Räume entsprechenden Schallschutzes, der unzumutbare Belästigungen vermeidet und einen angemessenen Nutzungskomfort sicherstellt</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Bauakustik: Einhaltung normativer Schallschutz ■ Raumakustische Konzeption ■ Raumakustik: Einhaltung normativer Anforderungen/Empfehlungen
<p>Visueller Komfort</p> <p>Ziel: Ausreichende und störungsfreie Versorgung mit Tages- und Kunstlicht in allen ständig genutzten Innenräumen</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Tageslichtverfügbarkeit Gesamtgebäude und ständige Arbeitsplätze ■ Sichtverbindung nach außen ■ Blendfreiheit bei Tageslicht ■ Kunstlicht ■ Besonnung 	<p>Aufenthaltsqualitäten innen und außen</p> <p>Ziel: Angebot eines Innen- und Außenraums mit möglichst vielseitigen Aufenthaltsmöglichkeiten und guter Ausstattungsqualität</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Kommunikationsfördernde Angebote ■ Zusätzliche Angebote für Nutzer ■ Familien-, Kinderfreundlichkeit ■ Aufenthaltsqualität innere Erschließung ■ Gestaltungskonzept Außenraum ■ Ausstattungsmerkmale 	<p>Barrierefreiheit</p> <p>Ziel: uneingeschränkte Zugänglichkeit und Nutzbarkeit der gebauten Umwelt für jeden Menschen, unabhängig von persönlicher Situation</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Qualität und Ausmaß der Barrierefreiheit, nach diskreten Qualitätsstufen inkl. formeller Mindestanforderungen für Nachhaltigkeitszertifizierung

Bild 6 Inhaltsüberblick Themenfeld Soziokultur und Funktionalität im DGNB-System

Technische Qualität nach DGNB-Kriterien-System Version 2023	
<p>Qualität der Gebäudehülle</p> <p>Ziel: Ausschöpfung des gesamten Potenzials der Gebäudehülle bzgl. Minimierung Energiebedarfe, Sicherstellung thermischer Komfort und Vermeidung von Bauschäden sowie bzgl. Energieerzeugung auf „erweiterter“ Außenfläche</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Potenzialanalyse Gebäudehülle-Transmission über Gebäudehüllfläche ■ Luftdichtheit ■ Sommerlicher Wärmeschutz ■ Qualitätssicherung 	<p>Einsatz/Integration von Gebäudetechnik</p> <p>Ziel: Gebäudekonzeption mit optimaler Nutzung passiver Systeme und Einbindung regenerativer Energien sowie Anpassbarkeit an wechselnde Nutzungsbedingungen und veränderte Bedingungen im umgebenden Quartier</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Passive Systeme ■ Anpassbarkeit der Verteilung auf Betriebstemperaturen für Integration erneuerbare Energien ■ Zugänglichkeit TGA ■ Integrierte Systeme
<p>Zirkuläres Bauen</p> <p>Ziel: Sparsamer Umgang mit natürlichen Ressourcen und deren effiziente Nutzung</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Standort- und Bestandsanalyse ■ Konzeptionsphase ■ Ausführung und Dokumentation 	<p>Mobilitätsinfrastruktur</p> <p>Ziel: Sparsamer Umgang mit natürlichen Ressourcen bei Infrastrukturdimensionierung, Reduktion verkehrsbedingter Emissionen, Steigerung des Nutzerkomforts und Stärkung von Mobilitätsangeboten</p> <p>Indikatoren:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Mobilitätskonzept ■ Infrastrukturen inkl. alternativer Antriebstechnologien ■ Benutzerkomfort

Bild 7 Inhaltsüberblick Themenfeld Technik im DGNB-System



Bild 8 Inhaltsüberblick Themenfeld Prozessqualität im DGNB-System

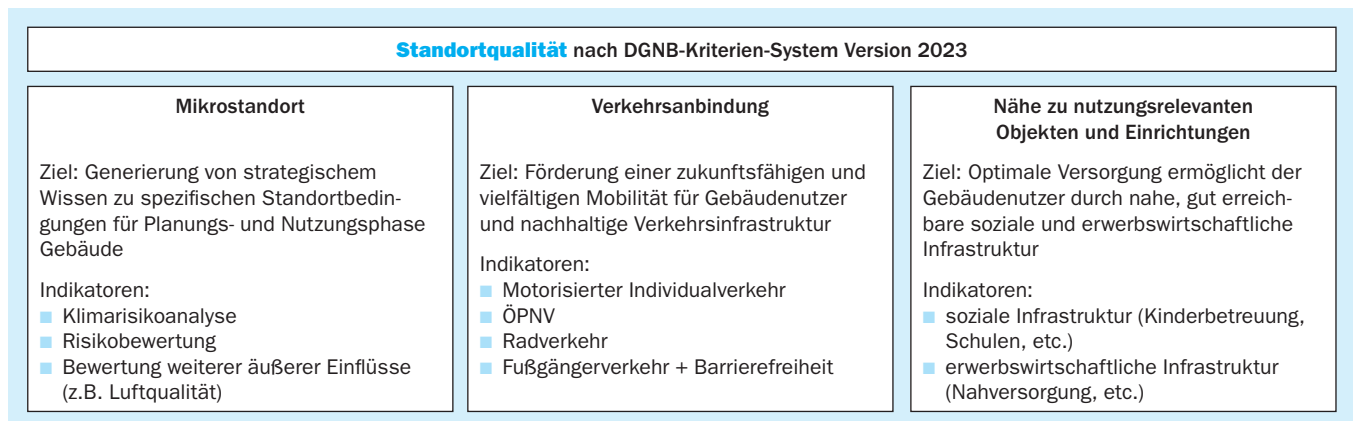


Bild 9 Inhaltsüberblick Themenfeld Technik im DGNB-System

Kompensationen im Sinne einer möglichst hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber möglichen Schadensereignissen (Resilienz) [7] (Bild 9) bewertet.

INFO

Konstruktionen aus Kalksandstein weisen eine ausgesprochene Widerstandsfähigkeit gegenüber potentiellen Schadensergebnissen aus veränderten Umweltbedingungen auf.

2.1.2 Grundlagen der Systeme NaWoh und BNK/BNG

Mit dem System Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh) des gleichlautenden o.g. Vereins und dem Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnbau/ für Nachhaltige Gebäude (BNK|BNG) des Bau-Instituts für Ressourceneffizientes und Nachhaltiges Bauen (BiRN) wurde der öffentliche Systemstrang des BNB insofern weiterentwickelt, als damit Wohngebäude der Größenklassen Mehrfamilienhäuser ab sechs Wohneinheiten (NaWoh) sowie Ein- und Mehrfamilienhäuser bis 5 (BNK) und seit 2023 auch Mehrfamilienhäuser ab 6 Wohneinheiten (BNG) bewertet und zertifiziert werden sollen (Bild 10, 11). Im Prinzip wurden



Bild 10 Nachhaltigkeitsdefinition und Grundstruktur NaWoh [8]

ähnliche Strukturen und Kriterien der Bewertung wie in DGNB und BNB verwendet (Bild 2, 3), jedoch speziell zusammengestellt für wohnungswirtschaftliche Randbedingungen – für das BNK|BNB wegen des (ursprünglichen) Systemeinsatzes für kleinere Gebäude/Bauvorhaben insbesondere auch bezüglich einer Aufwandsreduzierung durch angepasste Kriterienanzahl und Bewertungsdetails. Bei NaWoh ist ferner zu erwähnen, dass das System neben Bewertungskriterien ergänzend auch lediglich beschreibende Kriterien umfasst, sowie, dass weder ein Gesamterfüllungsgrad/-ergebnis ausgewiesen wird (Ziel ist der Nachweis der Einhaltung von (Mindest-)Anforderungen) noch Qualitäts-/Zertifikatsstufen vergeben werden.

Mit Blick auf die Bewertungstabellen und Gewichtungsmatrizen der o.g. Zertifizierungssysteme (mit Ausnahme NaWoh), d.h. letztlich die Gewichtungsfaktoren der einzelnen Kriterien, kann konstatiert werden, dass es trotz des ganzheitlichen Bewertungs- und -zertifizierungsansatzes einige wenige herausragend bedeutsame Kriterien gibt. Als eines davon kann mit zweistelligen Gesamtergebnisanteilen (DGNB: ca. 10 % | BNB: 12,5 % | BNK: ca. 15 %) sicherlich das Bewertungselement einer sogenannten Ökobilanz (eines Gebäudes über dessen Lebenszyklus) bezeichnet werden.

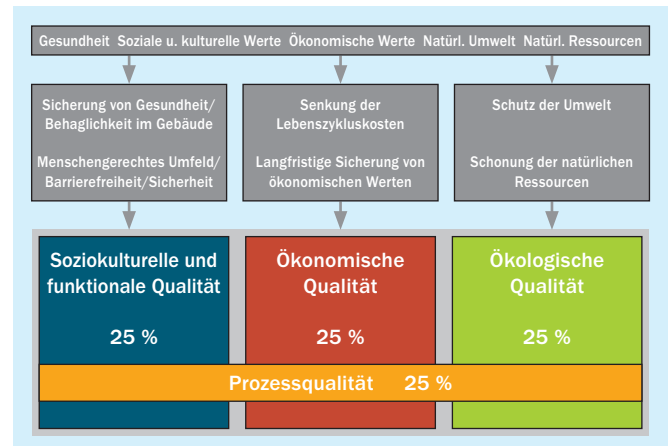


Bild 11 Nachhaltigkeitsdefinition und Grundstruktur BNK/BNB [9]

2.2 Bewertungsmethodik der lebenszyklusorientierten Ökobilanzierung

Im Wesentlichen wird durch eine Ökobilanz ermittelt, welches Ausmaß definierter Umweltwirkungen (u.a. Treibhausgaspotenzial als Beitrag zur globalen Erwärmung) ein Gebäude über seinen vollständigen Lebenszyklus hinweg, d.h. bei Herstellung von Bauprodukten, durch seine Errichtung, bei Nutzung und Betrieb und bei Rückbau/Verwertung (End of Life), verursacht.

Normung zur Methodik der Ökobilanzierung

Eine entsprechende Ökobilanzierung (*engl.: Life Cycle Assessment; kurz: LCA*) nach DIN EN ISO 14040 und 14044 stellt bereits seit vielen Jahren eine etablierte Methodik zur Quantifizierung und Beurteilung (potenzieller) Umweltwirkungen eines „Produktsystems“ im Verlauf dessen Lebensweges dar. Insbesondere auch in der Bau- und Immobilienwirtschaft ist eine LCA heute ein anerkannter Standard des Umweltmanagements.

DIN EN ISO 14040/14044 normieren und konkretisieren insbesondere die abgrenzbaren Phasen einer Ökobilanzierung (Bild 12) und die nötigen allgemeinen inhaltlichen Festlegungen für die Arbeitsschritte innerhalb dieser Phasen.

LCA-Phasen

Ziel/Untersuchungsrahmen: Festlegungen zu funktioneller Einheit, Systemgrenzen, Abschneidekriterien, Wirkungskategorien/-indikatoren

Sachbilanz: Bestandsaufnahme des Bilanzobjekts, d.h. Quantifizierung aller In- und Output-Flüsse über Lebensweg eines Produkt(-system)s

Wirkungsabschätzung: Verknüpfung der Sachbilanzdaten mit ökologischen Wirkungskategorien

Auswertung: Ableitung von Schlussfolgerungen bzgl. übergeordneter Zielstellung, schlüssige Ergebnisdarstellung

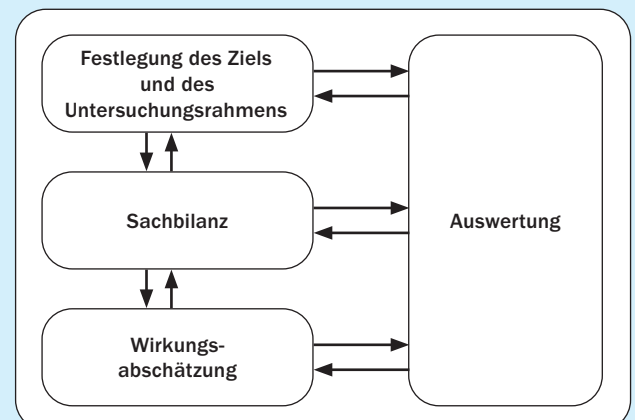


Bild 12 Phasen Ökobilanz DIN EN ISO 14040/14044

Mit der DIN EN 15978 liegt eine gebäude-/bauwerksspezifische Konkretisierung der allgemeinen normativen Vorgaben vor, über die etwa Festlegungen zu den Lebenszyklusstadien eines Gebäudes (Bild 13) oder zu den zu verwendenden ökobilanziellen Basisdaten erfolgen. Weitere Ausführungen zu Grundlagen der Methodik der Ökobilanzierung sind in [10] zu finden.

Ökobilanzierung in deutschen Systemen zur Nachhaltigkeitsbewertung

Auf dieser Basis nehmen die o.g. Bewertungs- und -zertifizierungssysteme dann weitere spezifische Anpassungen vor, die vor allem einer gesteigerten Anwendbarkeit und Praxistauglichkeit dienen sollen – dazu zählen u.a.:

- Vorgaben für nicht zu bilanzierende Lebenszyklusmodule eines Gebäudes (vgl. exemplarisch Bild 13 gemäß Vorgaben des DGNB-Systems [6])
- Vorgaben für mögliche Rechenverfahren zur Herstellungsphase/Module A1 bis A3 (Vereinfachtes versus Vollständiges Rechenverfahren | detaillierte Erläuterungen zu Rechenverfahren zur Herstellungsphase werden in [10] beschrieben)
- Vorgaben zum Bilanzierungszeitraum, d.h. dem zeitlichen Gebäudelebenszyklus
- Vorgaben für zu betrachtende Umweltwirkungen, sogenannte Umweltindikatoren

INFO

Während der Nutzungsphase (Modul B1) nehmen Kalksandsteine CO_2 aus der Luft auf und bauen dies dauerhaft und fest in ihr Gefüge ein. Die Menge an aufnehmbaren CO_2 beträgt rund 50 kg CO_2 /t Kalksandsteinmaterial.

Hinweis zu nicht deklarierten Lebenszyklusmodulen

Der Verzicht auf die bilanzielle Abbildung von Lebenszyklusmodulen (Nicht-Deklaration) wie A4 bis A5 (Errichtungsphase) oder C1 (Rückbau/Abriss) im Rahmen einer Gebäudeökobilanz (z.B. im DGNB-System) hat vor allem Gründe der Anwendungspraxis und Datenverfügbarkeit sowie einer Aufwands-Nutzen-Abwägung. Beispielsweise erfordert die Erhebung von Daten zu allen Transport-/Liefervorgängen zu und von Baustellen einen enormen Aufwand, bei erfahrungsgemäß nur marginalem Ergebnisbeitrag zur Ökobilanz eines Gebäudes über dessen Lebenszyklus.

Gleichwohl weist die Reihung der deklarierten Module in Bild 13 auch Lücken auf, die geschlossen werden sollten, um eine Konsistenz in der Abbildung von u.a. CO_2 -Speichereffekten sicherzustellen. In diesem Sinne sollte der Effekt der sog. Recarbonatisierung von mineralisch basierten bindemittelgebundenen Bauprodukten in der Gebäudeökobilanz, konkret: im Modul B1, abgebildet werden.

Im Kern besteht die Methodik der Ökobilanzierung dann darin, im Rahmen der Sachbilanz alle (relevanten) Input- und Output-Flüsse zur Erstellung eines Gebäudes (inklusive Vorketten zur Herstellung der Bauprodukte), zu dessen Betrieb und zum Rückbau und Verwertung zu bestimmen. Diese Sachbilanz-Ergebnisse sind dann im Zuge der Wirkungsabschätzung bestimmten ökologischen Wirkungskategorien (z.B. Treibhausgaspotenzial; engl.: *Global Warming Potential*; kurz: *GWP*) und ökobilanziellen Basisdaten zuzuordnen und die Wirkungskategorien in adäquate Indikatoren zu übersetzen (z.B. CO_2 -Äquivalente für *GWP*). Vereinfacht ausgedrückt muss dazu lediglich eine Multiplikation der Sachbilanzergebnisse, d.h. der Menge (Masse, Volumen, etc.) eines Bauprodukts, mit ökobilanziellen Basisdaten, d.h. beispielsweise CO_2 -Äquivalenten je Mengeneinheit des Bauprodukts, durchgeführt werden – gefolgt von der Addition von Zwischenergebnissen je Bauteil, Bauteilgruppe und Lebenszyklusmodul hin zum Gesamtgebäude-Ergebnis.

Lebenszyklus- phase	A 1-3			A 4-5		B 1-7							C 1-4				D
	Herstellungs- phase			Errich- tungs- phase		Nutzungsphase							Ende des Lebenszyklus				Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze
	Rohstoffbeschaffung	Transport	Produktion	Transport	Errichtung/Einbau	Nutzung	Instandhaltung	Instandsetzung	Austausch	Modernisierung	Energieverbrauch im Betrieb	Wasserverbrauch im Betrieb	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallverwertung	Entsorgung	Potenzial für Wiederverwertung, Rückgewinnung und Recycling
Module gemäß DIN EN 15978	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Deklarierte Module	X	X	X						(X)		X				X	X	X

Bild 13 Lebenszyklusphasen eines Gebäudes nach DIN EN 15978

Die folgende Abbildung (Bild 14) verdeutlicht die Methodik der Ökobilanzierung schematisch und beispielhaft für das konstruktive Bauteil einer beidseitig verputzten Innenwand aus Kalksandstein als konstruktives Element des MFH-Typengebäudes aus Bild 23.

Die Beurteilung der ökobilanziellen Qualität eines Gesamtgebäudes über den Lebenszyklus erfolgt in den o.g. Systemen dann über einen Abgleich mit definierten Vergleichswerten (*Benchmarks*) für Umweltwirkungen wie das Treibhausgaspotenzial.

Ökobilanzielle Beispiel-Rechnung für Treibhausgaspotenzial (CO₂-Äq.)

Objekt:

MFH-Typengebäude, ca. 1.000 m² Netto Raumfläche (NRF)
Lebenszyklus 50 Jahre
Bauteil Innenwände: ca. 450 m² KS-Innenwand,
11,5 cm, Rohdichteklasse (RDK) 1,8, beidseitig 15 mm
Kalk-Innenputz

Massenermittlung:

Kalksandstein $450 \text{ m}^2 \cdot 0,115 \text{ m} \cdot 1,8 \text{ t/m}^3 = 93,2 \text{ t}$
Kalk-Innenputz $450 \text{ m}^2 \cdot 0,015 \text{ m} = 6,8 \text{ m}^3$

Nutzungsdauern:

Kalksandstein + Innenputz ≥ 50 Jahre
→ kein Austausch erforderlich

LCA-Datensatz Kalksandstein aus EPD KS-Bundesverband:

Herstellung: Modul A1-A3 126 kg CO₂-Äq. pro t

End of Life:

gewählt: Szenario der Abfallbehandlung zur
stofflichen Wiederverwertung C3/1 2,51 kg CO₂-Äq. pro t
Informativ: Modul D -2,71 kg CO₂-Äq. pro t

LCA-Datensatz für Kalk-Innenputz (in kg CO₂-Äq. pro m³) aus Ökobaudat:

Herstellung: 191 | End of Life: 13,5 | Modul D: 0

Gebäude	Schicht	Bauteil	Material	Einheit	Herstellung	Nutzung	End of Life	Modul D
Ökobilanzielle Basisdaten – z.B. Treibhausgaspotenzial GWP aus Ökobaudat								
MFH	Wände	Innenwände	Innenputz	GWP/m ³	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.
			KS-Mauerwerk	GWP/kg	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.
			Innenputz	GWP/m ³	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.	... kg CO ₂ -Äq.
	Decken	Stahlbetondecke Erdgeschoss	Estrichbeton	GWP/...	... kg CO ₂ -Äq.			
			Trittschalldämmung	GWP/...				
			Beton	GWP/...				
			Stahl	GWP/...				
	Dach							

Beispielrechnung für die Innenwände

Bauteil	Baustoff	Herstellung	Nutzung	End of Life	Ergebnis Bauteil	Nutzungs-dauer	Fläche Gebäude	Ergebnis Gebäude
Innenwände Material	Menge/ Gebäude	GWP/... kg CO ₂ -Äq.	GWP/... kg CO ₂ -Äq.	Innenwände Material	GWP/Bauteil kg CO ₂ -Äq.	50 Jahre	m ² NRF	GWP/m ² NRF kg CO ₂ -Äq.
Innenputz	6,8 m ³	191	+ entfällt, > 50 Jahre +	13,5	→ 1.390	+ 50	+ 1.000	→ 0,028
KS-Mauerwerk	93,2 t	126	+ entfällt, > 50 Jahre +	2,51	→ 11.977	+ 50	+ 1.000	→ 0,239
Innenputz	6,8 m ³	191	+ entfällt, > 50 Jahre +	13,5	→ 1.390	+ 50	+ 1.000	→ 0,028
Innenwände								0,295
Decken							
Dach							
Gesamt							

Bild 14 Methodik der Ökobilanzierung

3. Umweltproduktdeklarationen als Datenbasis der ökologischen Nachhaltigkeitsbewertung von Baustoffen und Gebäuden

3.1 Grundlagen

Der methodische Kern einer Gebäude-Ökobilanz besteht gemäß Darstellung unter Abschnitt 2.2 in der Kopplung von Input-/Output-Flüssen des Gebäudelebenszyklus mit ökobilanziellen Basisdaten zu bestimmten Wirkungsindikatoren, z.B. CO₂-Äquivalenten für das Treibhausgaspotenzial. Deshalb sind eine Ökobilanzierung wie übergeordnet eine ökologische Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden nur möglich, wenn entsprechende ökobilanzielle Basisdaten für Bauprodukte/-materialien sowie Transport-, Energie- und Entsorgungsprozesse vorliegen und für Ersteller von Ökobilanzen verfügbar sind.

Als solche grundsätzlich verbindlich vorgeschriebene Datenbasis fungiert(e) für die deutschen Bewertungs- und Zertifizierungssysteme von Beginn an (seit Markteinführung im Jahr 2008/2009) und nach wie vor die ÖkobaDat. Sie stellt als frei verfügbare und kostenfreie Online-Plattform in Trägerschaft des ressortzuständigen Bundesbauministeriums Daten sowie weiteren Informationen und Links rund um die Ökobilanzierung von Gebäuden zur Verfügung. Grundsätzlich gilt sie als vorgeschriebene Datenbasis für Ökobilanzen im Zuge der deutschen Bewertungs- und Zertifizierungssysteme.

Hinweis für Anwender

Trotz Positionierung der ÖkobaDat als grundsätzliche Datenbasis für Ökobilanzen im Rahmen von z.B. DGNB-Zertifizierungen ist gleichwohl vom DGNB-System auch die Verwendung von Ökobilanz-Daten aus EPDs (siehe unten) vorgesehen, und zwar unabhängig davon, ob die Ökobilanz-Daten einer EPD in der ÖkobaDat „veröffentlicht“ sind oder nicht. Dies gilt allerdings derzeit (noch) nicht für Zertifizierungsverfahren im Kontext der o.g. BEG-Förderung des o.g. QNG-Siegels: hier ist ausschließlich die Anwendung eines definierten Ausschnitts der ÖkobaDat (sog. Ökobilanzierung – Rechenwerte) zulässig.

Die ÖkobaDat und ihre Informationen und Tools gehen zurück auf diverse Forschungsprojekte des Innovationsprogramms ZukunftBau. Sie basiert prinzipiell auf der Hintergrunddatenbank GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung; Software und Datenbank des kommerziellen Anbieters Sphera) und bietet sowohl sogenannte generische/repräsentative als auch firmen-/verbands-, letztlich produktspezifische Datensätze.

Generisch vs. spezifisch

Generische Daten werden auf Basis von Literaturangaben, Expertenwissen, etc. modelliert. Demgegenüber werden spezifische Daten basierend auf Industriedaten – z.B. hersteller-/unternehmensspezifisch für ein konkretes Produkt, im Durchschnitt für Industrieverbände oder über mehrere Firmen oder Werke/Produktionsstätten hinweg oder für ein Land/eine Region – gebildet [11].

Produktspezifische Datensätze der ÖkobaDat resultieren dabei oft aus Umweltproduktdeklarationen (kurz: EPD; engl.: *Environmental Product Declaration*), die normativ eine Typ III-Umweltdeklaration nach ISO 14025 und damit ein verifiziertes/

geprüftes und von unabhängigen Dritten vergebenes Umweltzeichen repräsentieren. EPDs stellen umweltbezogene (v.a. auch Ökobilanzdaten; Bild 15) und technisch-funktionale Daten und Eigenschaften eines Produkts oder Produktsystems über den gesamten Lebensweg auf Basis (u.a. normativ) festgelegter Parameter und Randbedingungen zur Verfügung.

Diese festgelegten Parameter und Randbedingungen sollen freilich für das Vertrauen der EPD-nutzenden Marktteilnehmer und -akteure sorgen und bestehen im Wesentlichen aus sogenannten Produktkategorieregeln (kurz: PCR; engl.: *Product Category Rules*), die von den Betreibern/Haltern eines EPD-Programms unter Einbeziehung interessierter Kreise erarbeitet und durch ein unabhängiges Expertengremium geprüft werden. In den PCR sind alle erforderlichen produktspezifischen Regeln, Anforderungen und Prüfverfahren definiert, wobei die DIN EN 15804 eine Art (normative) Produktkategorie-Kernregel auf EU-Ebene darstellt, die für alle Bauprodukttypen gilt und die Grundlage für EU-weit harmonisierte EPDs darstellt.

Die beiden führenden deutschen EPD-Programmhalter das Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) und ift Rosenheim setzen auf



dieser Kernregel mit 2-teiligen eigenen PCR-Dokumenten ihres EPD-Programms auf und regeln in

- Teil A die einheitlichen Rechenregeln für die zu erstellenden Ökobilanzen sowie allgemeine Anforderungen an die EPD-Erstellung,
- Teil B konkrete Anforderungen an die Inhalte einer EPD.

Bild 16 zeigt eine Übersicht dieser grundlegenden Inhalte einer EPD nebst den Basisschritten im Prozess der EPD-Erstellung aus Sicht eines Deklarationsinhabers. Für weitere grundsätzliche Erläuterungen zum Themenfeld der Umweltproduktdeklarationen kann hier auf [13] verwiesen werden.



Bild 16 Grundlegende Inhalte und Basisschritte der Erstellung einer EPD

3.2 Umweltproduktdeklarationen des Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V.

Die Mauerwerks- und insbesondere Kalksandsteinindustrie hatte den sich abzeichnenden Trend zur transparenten Darstellung ihrer Produkte und deren Umweltwirkungen früh aufgegriffen und veröffentlicht bereits seit 2009 über das Institut Bauen und Umwelt (IBU) e.V. als Programmhalter EPDs für ihre Mauersteine und -elemente.

Die jüngste Aktualisierung der EPD des Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. wurde Ende 2021 mit der Veröffentlichung der neuen Umweltproduktdeklaration erfolgreich abgeschlossen [12]. Diese Aktualisierung ist der Endpunkt eines Projekts zusammen mit der LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH als Ökobilanzierer, in dem zwischen 2020 und 2021 für die Kalksandsteinindustrie umfassende Datenerhebungen und -analysen der Produktionsprozesse und deren Umweltwirkungen erfolgten.

Im Rahmen dieses Projekts zur EPD-Aktualisierung erfolgte zum einen insbesondere auch eine Umstellung auf den aktuell gültigen Normungsstand der DIN EN 15804: +A2. Dies bedeutete als eine der sichtbarsten Veränderungen, dass nunmehr verpflichtend auch das Lebensende eines Produkts in der EPD abzubilden und dazu die Lebenszyklusmodule der Entsorgungsphase (Module C1 bis C4) sowie Gutschriften/Lasten außerhalb der Systemgrenzen (Modul D) zu deklarieren sind (Bild 13). Zudem musste durch die Aktualisierung der EPD adressiert werden, dass durch die Normumstellung bei der Wirkungsabschätzung, d.h. der „Übersetzung“ der vielen unterschiedlichen Umweltwirkungen respektive Emissionen und Ressourcenverbräuche in definierte Kennzahlen, überarbeitete Faktoren und Modelle vorgeschrieben sind. In diesem Sinne sind die Ergebnisse einer EPD nach alter versus neuer Norm nur sehr eingeschränkt miteinander vergleichbar.

Zum anderen konnte über die Aktualisierung der EPD vor allem auch eine Integration des Aspekts der sogenannten Recarbonatisierung (Modul B1 Nutzung/Anwendung (eines Produkts)) in die Gesamtbilanz von CO₂-Quellen und -Senken des Bauprodukts eines Kalksandsteins erfolgen.



4. Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie

Klimaschutz im Sinne der Reduzierung von Treibhausgasemissionen, letztlich eine ganzheitliche Dekarbonisierung des Gebäudelebenszyklus, ist einer der Hauptstränge für Nachhaltiges Bauen. Viele Teilindustrien der Bau- und Immobilienwirtschaft haben in den letzten Jahren Roadmaps für ihren Weg in eine klimaneutrale Zukunft aufgesetzt – so auch die Kalksandsteinindustrie [15] [16]. Nicht zuletzt das Engagement der EPD-Erstellung und die erforderlichen zugehörigen branchenweiten Datenerhebungen und -analysen (u.a. auf Basis eines virtuellen Durchschnitts-Werks als Repräsentant für die gesamte Branche) haben die Kalksandsteinindustrie in die Lage versetzt, ihren aktuellen *Status quo* zu bestimmen und Treiber ihrer Klima- bzw. CO₂-Bilanz zu identifizieren, die auf dem Klimaneutralitätspfad bis spätestens 2045 auf Null zu reduzieren sind.

Einflussbereiche und Herausforderungen der Kalksandsteinindustrie

In der Roadmap werden die Treibhausgasemissionen der gesamten deutschen Kalksandsteinindustrie betrachtet. Für die Identifikation der Potenziale zur Dekarbonisierung der industriellen Prozesse ist es aber essentiell, eigene und fremde Einflussbereiche zu kennen und die Quellen von Emissionen in *Scopes* zu strukturieren. Sie gelten als anerkannte grundlegende Vorgehensweise für die Analyse und Bewertung von Emissions-/CO₂-Bilanzen. Für die Bilanzierung von Treibhausgasemissionen hat sich dabei die Strukturierung nach Scope 1-, 2- und 3-Emissionen etabliert

Scope 1-, 2- und 3-Emissionen

- Scope 1 – umfasst die direkte Freisetzung klimaschädlicher Gase im eigenen Unternehmen/eigenen Produktionsstätten
- Scope 2 – die indirekte Emittierung durch Energielieferungen und
- Scope 3 – indirekte Emissionen durch vor- und nachgelagerte Lieferketten.

Übersetzt auf die spezielle Wertschöpfungskette der Kalksandstein-Produktion können die *Scopes* wie in Bild 17 dargestellt

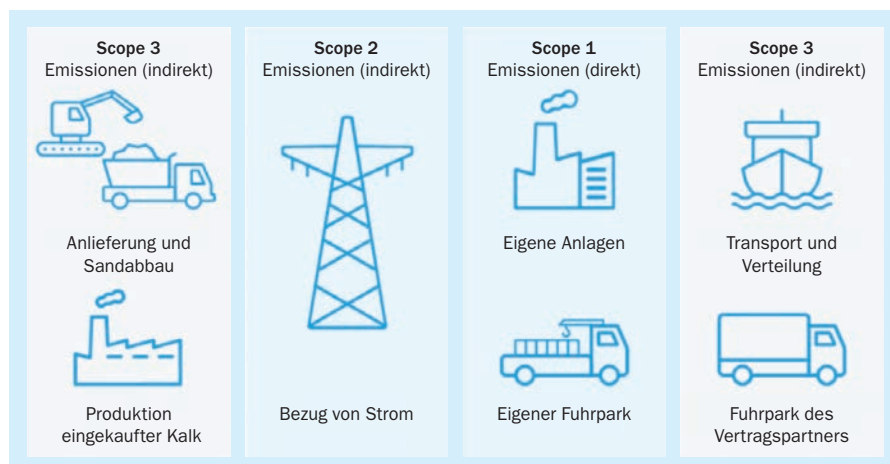


Bild 17 Scopes 1, 2 und 3 der Wertschöpfungskette Kalksandstein-Produktion [16]

werden – um auf dieser Basis dann die Einflussfaktoren auf die Gesamt-CO₂-Bilanz der Kalksandstein-Produktion herausarbeiten zu können.

Gemäß Datenerhebung und -analyse der in der Roadmap abgebildeten Herstellerwerke stellt sich die Emissionsbilanz wie in Bild 18 gezeigt dar: fast 80 % der branchenweiten Emissionen der Kalksandstein-Produktion sind Scope 3 (vor- und nachgelagerten Lieferketten) zuzuordnen und nur etwas über 20 % entstehen als Scope 1 und 2 in den Herstellerwerken selbst oder durch die Energielieferung in die Herstellerwerke.

Ein tieferer Blick in die Scope 3-Emissionen (Bild 19) zeigt auch, dass diese mit 92 % weit überwiegend von den Emissionen der Kalk-Herstellung bestimmt werden und die Emissionen aus Prozessen des Sandabbaus und der Transporte nur einen sehr geringen Anteil an der Scope 3-Bilanz wie auch an der Gesamt-Bilanz haben. Herausforderungen für die Kalksandsteinindustrie liegen damit bei weitem nicht nur im eigenen Handlungs- und Prozessbereich, sondern maßgeblich auch in der Abhängigkeit von Prozessen und Lieferketten externer Dritter.

Pfade der Roadmap für Treibhausgasneutralität

Ausgehend von dieser Zustandsbestimmung wurden in der Roadmap unterschiedliche Pfade entwickelt, analysiert und bewertet, um den Wandel der eigenen Branche in einen künftigen klimaneutralen Status zu skizzieren. Von den insgesamt drei dargelegten Pfaden dient der erste lediglich als Referenzpfad und definitorischer Vergleichswert für die beiden anderen eigentlichen Transformationswege (Bild 20).

Auf diesem *Referenzpfad* erfolgt prinzipiell eine Fortschreibung des *Status quo* unter Annahme eines *Business as usual*: keine Implementierung neuer Technologien und Prozesse, jedoch Abbildung von Effizienzsteigerungen und notwendiger Modifikationen von Produktionsanlagen und Abbildung bekannter externer Randbedingungen wie der politisch angestrebten Dekarbonisierung des deutschen Strommix bis 2045.

Der *Pionierpfad* als zweite Route innerhalb der Roadmap bildet ab, dass die Branche deutlich größere eigene Anstrengungen betreibt, um eine Klimaneutralität zu erreichen. Der Titel ergibt sich daraus, dass in diesem Szenario sehr innovative Änderungen wie

- eine Umstellung auf Wasserstofftechnologien,
- eine weitgehende Digitalisierung der Produktionsprozesse inklusive Wärtemanagement und
- neue Kalksandstein-Rezepturen mit reduziertem Bindemittel-, d.h. Kalk-Gehalt,

zunächst nur von Vorreitern in der Branche umgesetzt werden. Diese Maßnahmen schlagen sich aber wegen bestehender Restriktionen noch nicht branchenweit nieder. Der Pionierpfad setzt zusätzlich auch Verringerungen der

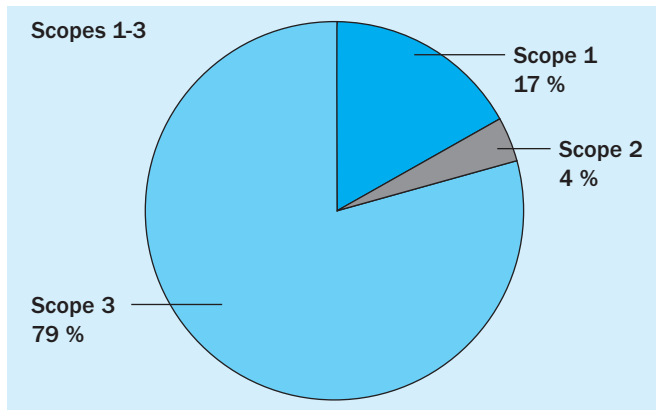


Bild 18 CO₂-Emissionen der Kalksandstein-Produktion [15] nach Scopes im Basisjahr 2021 [16]

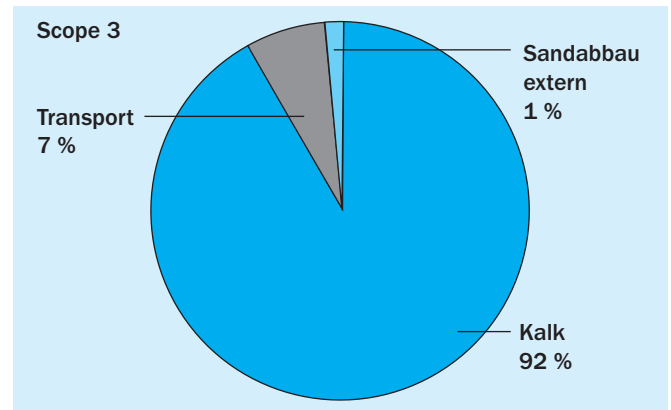


Bild 19 CO₂-Emission der Kalksandstein-Produktion im Basisjahr 2021 [15]

Scope 3-Emissionen voraus, insbesondere im Bereich der Vor Ketten-Emissionen des Bindemittels Kalk.

Im *Klimaneutralitätspfad* werden dann als Weiterentwicklung alle betriebswirtschaftlichen Begrenzungen der Branche und Herstellerwerke bewusst fallengelassen, um zu ermitteln, welche Maßnahmen für eine Klimaneutralität bis 2045 erforderlich sind. Insofern „erzwingt“ der *Klimaneutralitätspfad* rechnerisch eine Reduzierung der Emissionen auf null, verbunden mit der kompletten Umstellung der deutschen Kalksandsteinindustrie auf neue Technologien und einer Dekarbonisierung der vor- und nachgelagerten Lieferketten inklusive Kalk-Produktion.

Allen drei betrachteten Pfaden ist gemein, dass jeweils Untervarianten ohne und mit Effekten der *Recarbonatisierung* betrachtet werden – was beim Szenario des *Klimaneutralitätspfads* mit Recarbonatisierung dazu führt, dass die Kalksandsteinindustrie sogar klimapositiv sein würde. Die Recarbonatisierung als Effekt und automatischer Prozess der dauerhaften CO₂-Speicherung während der Nutzungsdauer mineralischer bindemittelgebundener Baustoffe wird anschließend näher beleuchtet.

Zentrale Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Roadmap

Erwartbar wären auch auf dem Referenzpfad durch kontinuierliche Effizienzsteigerungen und verbesserte externe Randbedingungen Emissionsrückgänge in der 2045-Perspektive zu konstatieren gegenüber dem Emissionsniveau von 780 Tsd. Tonnen CO₂ pro Jahr in 2021 als Basisjahr der Roadmap. Allerdings würde das Ziel der Klimaneutralität auch in der Untervariante mit Recarbonatisierung mit 568 Tsd. Tonnen CO₂ in 2045 bei weitem nicht erreicht. Auf dem Pionierpfad hingegen gelingt es der Branche, dem Ziel der Klimaneutralität signifikant näher zu kommen und die Emissionen auf bis zu 282 Tsd. Tonnen (mit Recarbonatisierung) erheblich zu reduzieren. Auf dem Klimaneutralitätspfad ist das Emissionsniveau von 0 Tonnen CO₂ bis 2045 definitorisch vorgegeben bzw. wird wie oben geschildert rechnerisch erzwungen, was allerdings die Inkaufnahme sehr hoher Investitions- und Betriebskosten erfordert. Immerhin wäre die deutsche Kalksandsteinindustrie unter Berücksichtigung der Recarbonatisierung bereits ab 2042 klimapositiv und hätte für die verbleibende 2045-Perspektive einen gewissen Puffer, wenn die Prozessemissionen der Kalkindustrie nicht planmäßig dekarbonisiert wären.

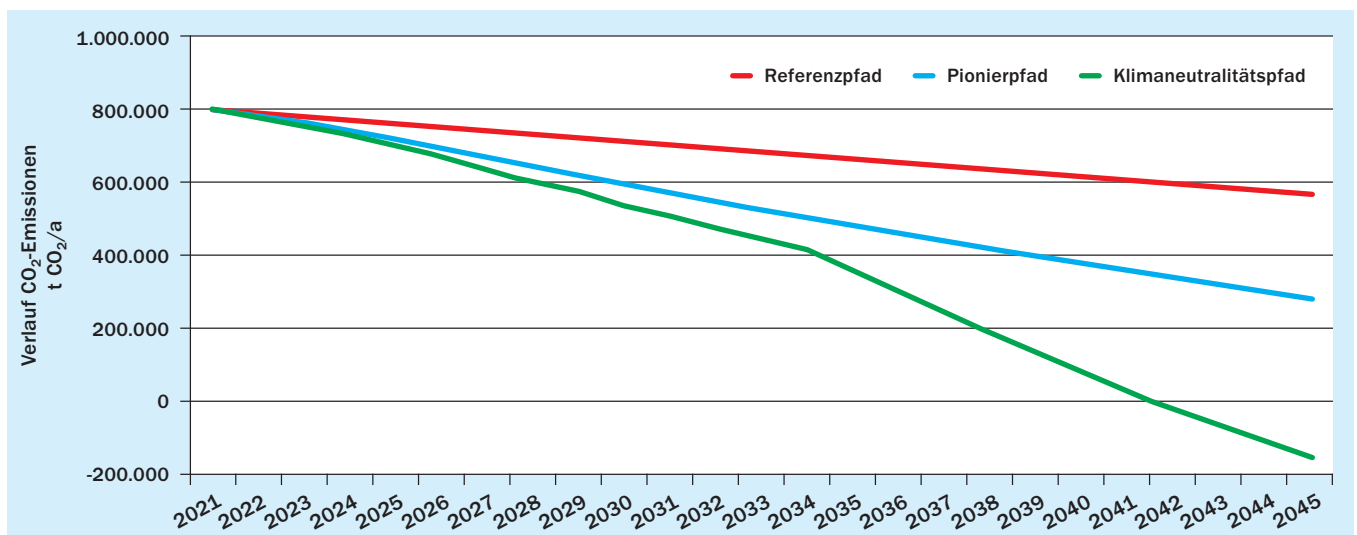


Bild 20 Emissionsentwicklung der drei betrachteten Pfade mit Recarbonatisierung [15]

5. Recarbonatisierung

5.1 CO₂-Kreisläufe in Baustoffen

Für Immobilien als Wirtschaftsgüter mit extrem langen Nutzungsdauern ist es entscheidend, dass bei einer Ökobilanzierung als wichtigem Steuerungsinstrument in Richtung des klimaschutzgesetzlichen Zielpunkts von Netto-Null-Emissionen ganzheitlich bilanziert wird. Und entsprechend der gesamte Lebenszyklus mit allen Quellen und Senken für Treibhausgasemissionen berücksichtigt wird. Denn die klimapolitische Zielsetzung hin zu einer Netto-Null-Treibhausgas-Bilanz bis spätestens 2050 repräsentiert letztlich auch die strategische Herangehensweise eines balancierten Kreislaufs an (möglichst weit reduzierten) Emissionen und deren Wieder-Aufnahme bzw. -Speicherung.

CO₂-Kreislauf von holzbasierten Bauprodukten

Seit vielen Jahren, spätestens mit Breitenanwendung von Nachhaltigkeitszertifizierungssystemen wie dem DGNB- oder BNB-System, werden diese Zusammenhänge der Auslösung, Speicherung und etwaigen erneuten Entspeicherung von Treibhausgasemissionen in Ökobilanzierungen von holzbasierten Bauprodukten bzw. von Gebäuden in Holzbauweise wie folgt berücksichtigt.

Am Beginn des Lebenszyklus steht die Bereitstellung von Rohstoffen. Für holzbasierte Bauprodukte bedeutet dies, dass ökobilanziell abzubilden ist, dass die Rohstoffquelle Wald über die CO₂-Aufnahme der Bäume während deren Wachstum/bis zu deren Fällung per Saldo (unter Berücksichtigung von energetischen Aufwendungen und etwaigen korrelierten CO₂-Emissionen für die Fällung, etc.) eine lediglich temporäre Treibhausgas-/CO₂-Senke darstellt (biogene Einspeicherung von CO₂). Die Weiterverarbeitung und Herstellung von holzbasierten Bauprodukten/-bauteilen (z.B. Sägen/Zuschneiden, Trocknen) erfordern dann insbesondere energetische Aufwendungen, die (je nach Energieträger) Treibhausgas-/CO₂-Emissionen auslösen. Selbiges gilt analog für die Bau-/Errichtungsphase z.B. eines Gebäudes in Holzbauweise. Die Umweltwirkungen bzw. CO₂-Emissionen der Nutzungsphase werden einerseits durch Energieaufwendungen für den Betrieb/die Nutzung eines Gebäudes (Heizung, Beleuchtung, ggf. Lüftung, ggf. Kühlung) ausgelöst. Und andererseits auf Bauteilebene durch etwaige Ersatzmaßnahmen (konstruktiver) Bauteile am Ende deren (technischer) Lebensdauer, wobei sich dann in CO₂-Bilanzen Langlebkeitsunterschiede verschiedener Bauweisen zeigen können.

Von besonderer Bedeutung für die Treibhausgas-/CO₂-Bilanz von holzbasierten Bauprodukten ist das Ende des Lebenszyklus, das End of Life (EoL). Denn hier erfolgt eine thermische Verwertung von Altholz. Der biogene CO₂-Speicher des Holzes wird wieder „aufgelöst“ und CO₂-Emissionen freigesetzt. Vor diesem Hintergrund der lediglich temporären (biogenen) Speicherung von CO₂ ist auch ersichtlich, warum eine lebenszyklusorientierte Betrachtungsweise von holzbasierten Bauprodukten respektive Gebäuden in Holzbauweise unerlässlich ist.

CO₂-Kreislauf von mineralisch basierten bindemittel-gebundenen Bauprodukten

Auch bei mineralisch basierten, bindemittel-gebundenen Baustoffen wie Kalksandstein sind Prozesse der dauerhaften CO₂-Speicherung materialtechnologisch als *Recarbonatisierung* seit vielen Jahren bekannt. Diese rücken aber erst mit dem Aufkommen der oben skizzierten Roadmaps in den Fokus bei der Analyse und Bewertung von Bauprodukten und Bauweisen hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeits- und Klimaschutzqualität über den Lebenszyklus. Die CO₂-Speichereffekte der Recarbonatisierung lassen sich jedenfalls mit folgenden Hintergründen und Zusammenhängen erklären (Bild 21).

Die wesentliche Rohstoffbasis für Mauerwerk aus Kalksandstein bilden Gesteinskörnungen sowie Bindemittel (Brannkalk) und Wasser. Die Rohstoffe werden gemischt und geformt und dann in Autoklaven dampfgehärtet.

Mit Blick auf eine erste Zwischenbilanz an Treibhausgasemissionen für die Herstellungsphase lässt sich auf Basis aktueller Analysen der Kalksandsteinindustrie festhalten, dass für Kalksandstein zwischen 80 % und 90 % der Emissionen aus den Vorketten resultieren [16], konkret aus der Herstellung des Bindemittels Brannkalk (Bild 22). Dabei werden die CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Brannkalk nur zu maximal einem Drittel ausgelöst vom thermischen Prozess bzw. dem Energieverbrauch beim Brennen des Rohmaterials Kalkstein (Verbrennungs-CO₂). Mindestens zwei Drittel der CO₂-Emissionen entstammen dem Rohmaterial selbst, wenn der Kalkstein (CaCO₃) im thermischen Prozess in Calciumoxid (CaO) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) aufgespalten wird (Prozess-CO₂) [17].

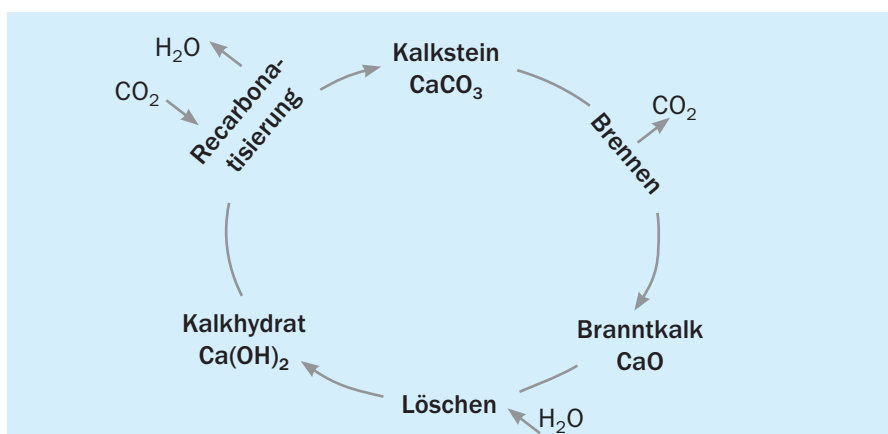


Bild 21 Schematische Darstellung CO₂-Kreislauf bindemittel-gebundener Baustoffe

Anders als das Verbrennungs-CO₂, das durch Effizienzsteigerungen beim Einsatz von Energieträgern des Verbrennungsprozesses und/oder durch den Einsatz CO₂-neutraler Energieträger reduziert und grundsätzlich komplett auf null minimiert werden kann, lässt sich das Prozess-CO₂ prinzipiell nicht vermeiden, sondern nur durch technische und/oder natürliche Prozesse absorbieren. Technische Verfahren wie CCS (Carbon Capture and Storage) oder CCU (Carbon Capture and Utilization) aber sind aufwendig und kostenintensiv – mithin erscheinen natürliche Vorgänge, die „automatisch“ und ohne weitere erforderliche Infrastruktur ablaufen, umso effektiver und effizienter.

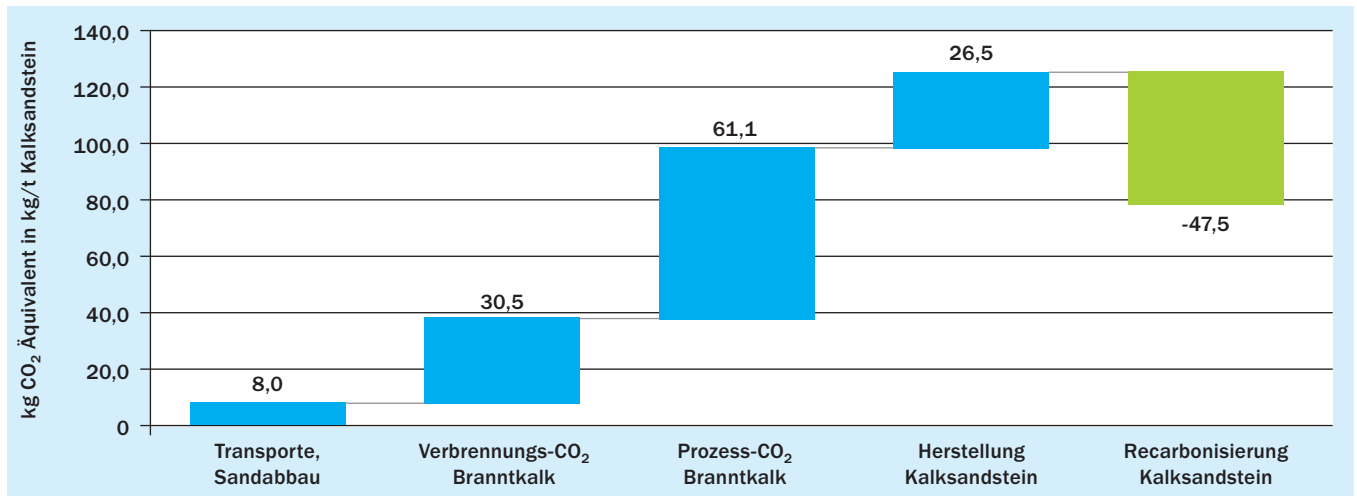


Bild 22 Treibhausgasemissionen der Herstellung A1-A3 von Kalksandstein sowie der Nutzungsphase B1

Bemerkenswerterweise bieten die das Prozess-CO₂ auslösenden Produkte Branntkalk und auch Zement bzw. die aus diesen Grundstoffen hergestellten bindemittel-gebundenen Baustoffe genau einen solchen natürlichen Prozess der CO₂-Aufnahme und dauerhaften CO₂-Speicherung, schließen sozusagen selbst den CO₂-Kreislauf (Kalk-CO₂-Kreislauf).

Wenn KS-Mauerwerk während seiner Nutzungsphase mit dem CO₂ der Umgebungsluft in Berührung kommt und das CO₂ in das Gefüge des Mauerwerks eindringt, reagiert es dort mit dem Calciumoxid (CaO), das über das Abbinden des Bindemittels beim Autoklavieren in den CSH-Phasen entstanden ist. Es bildet (wieder) Calciumcarbonat (CaCO₃), in dem das aufgenommene CO₂ dauerhaft festgehalten wird, was gleichzeitig auch zu einer gewissen Festigkeitszunahme des Mauersteins führt. Dieser Vorgang heißt **Recarbonatisierung**.

Gemäß verfügbarer Daten sind Kalksandsteine bis zum Abschluss ihrer Nutzungsphase grundsätzlich vollständig recarbonatisiert [18]. In der unabhängig verifizierte EPD für Kalksandstein [12] wird konservativ von einem 95 %-igen Recarbonisierungsgrad ausgegangen, was beim Kalksandstein zu einer CO₂-Aufnahme von ca. 47,5 kg [12] CO₂-Äq. pro Tonne Kalksandstein führt.

INFO

Die Recarbonatisierung von Kalksandstein ist ein natürlicher Prozess der CO₂-Aufnahme und dauerhaften CO₂-Speicherung.

Entlang des Lebenszyklus von mineralisch basierten, bindemittel-gebundenen Baustoffen wie Mauerwerk aus Kalksandstein stellt sich der Prozess der Recarbonatisierung und des geschlossenen CO₂-Kreislaufs für das Prozess-CO₂ zusammengefasst dann so dar: durch die Bereitstellung der Rohstoffe (im Wesentlichen Verbrennungs- und Prozess-CO₂ für Zement und Branntkalk) und die Herstellung des Mauerwerks (sowie den

Transport zur Baustelle und die Errichtung des Bauwerks) werden CO₂-Emissionen freigesetzt, die im Zuge der Nutzungsphase teilweise wieder gebunden und dauerhaft gespeichert werden, und insbesondere – im Gegensatz zum Lebenszyklus von holzbasierten Baustoffen – nicht im Zuge des End of Life (Entsorgungsstadium) wieder „entspeichert“ und in die Atmosphäre emittiert werden.

5.2 Recarbonatisierung auf Bauteil- und Gebäudeebene

In den letzten Jahren wurden für bindemittel-gebundene Mauersteine im Allgemeinen [17] [18] und für Kalksandsteine im Speziellen [15] umfassende Untersuchungen zum Ablauf und Ausmaß der Recarbonatisierung durchgeführt. Deren Erkenntnisse und quantitativen Ergebnisse in Sachen dauerhafter Speicherung von CO₂ sind mittlerweile auch im Rahmen der jüngsten Aktualisierung der EPD für KS-Mauerwerk berücksichtigt und in die Ökobilanz-Daten der Kalksandstein-EPD integriert worden. Insofern stehen damit insbesondere auch verifizierte Daten für eine vollständige, lebenszyklusorientierte Ökobilanzierung von Kalksandsteinen oder Gebäuden aus KS-Mauerwerk zur Verfügung. Bei einem konservativ angenommenen Recarbonisierungsgrad von 95 % über die gesamte Nutzungsphase eines Kalksandsteins bzw. einer Konstruktion aus Kalksandstein gemäß [11] werden ca. 47,5 kg CO₂-Äq. pro Tonne Kalksandstein bzw. ca. 85,5 kg CO₂-Äq. pro Kubikmeter Kalksandstein aus der Luft aufgenommen und dauerhaft gespeichert (Bild 22).

INFO

Die Treibhausgasemissionen der Herstellung A1 bis A3 werden durch die Recarbonisierung um rund 38 % reduziert.

Bauprodukte stiften ihren Nutzen erst, wenn daraus Bauteile und in Gesamtheit ein Gebäude entstanden sind. Insofern muss das Gebäude die eigentliche Betrachtungsperspektive für Fra-

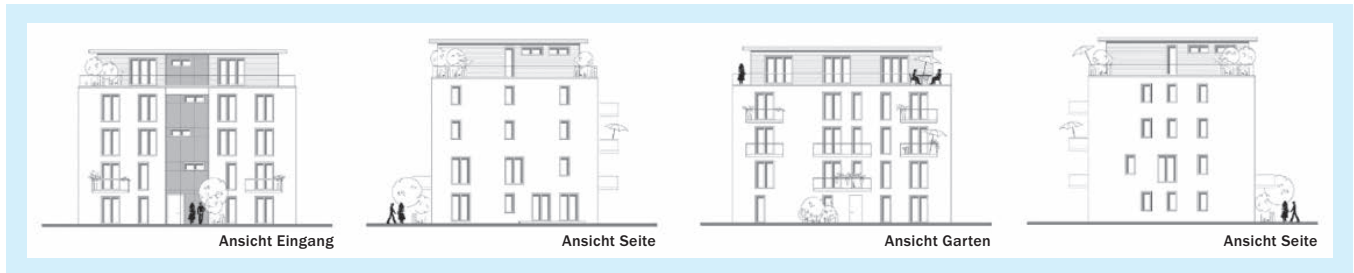


Bild 23 Ansichten MFH-Typengebäude gemäß [22]

gestellungen zu Klimaschutz und Emissionsreduzierung sein. In jüngerer Vergangenheit ist eine große Vielfalt an Untersuchungen zur Öko- respektive CO₂-Bilanz marktrelevanter Bau- und Konstruktionsweisen entstanden [19] – als sehr aktuelles Beispiel kann aus diesem Kontext eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP benannt werden [20] [21].

In der Studie „Potenziale im Mauerwerksbau“ wurde u.a. für ein Typengebäude aus dem Segment Mehrfamilienhaus (MFH) eine lebenszyklusorientierte Ökobilanzierung der marktrelevanten Bau- und Konstruktionsweisen (Kalksandstein, Ziegel, Leicht- und Porenbeton sowie Stahlbeton, Holzmassivbau und Stahlbeton mit vorgehängten Holzrahmentafeln) über Betrachtungszeiträume von 50 und 80 Jahren generiert und im Zuge dessen vor allem auch die öko- bzw. CO₂-bilanziellen Effekte der Recarbonatisierung abgebildet [20].

Typengebäude ermöglichen die Generierung repräsentativer und auf den gesamt-deutschen (Wohnungs-)Bau übertragbarer Ergebnisse in ökobilanziellen Analysen. Denn auch bei der Analyse und Bewertung einer Vielzahl einzelner (realer) Beispielgebäude wären die jeweils gebäudespezifischen Besonderheiten von derart großer Bedeutung, dass Ergebnisse nur in sehr weiten Spektren dargestellt bzw. lediglich tendenziell gewertet werden könnten. Das in [20] [21] verwendete MFH-Typengebäude der Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen e.V. [22] (Bild 23) stellt einen auf Grundlage von aktuellen Statistiken,

Marktbeobachtungen und einer differenzierten Bautätigkeits-erfassung bestimmten „Durchschnitt“ für den deutschen Wohnungsbau in der derzeitigen Baupraxis und erfüllt daher Anforderungen an Repräsentativität und Praxisrelevanz.

Die Ergebnisse waren einerseits hervorragend geeignet, das quantitative Ausmaß der Recarbonatisierung auf Gesamtgebäude-Ebene des MFH-Typengebäudes abzubilden – und andererseits letztlich auch, um ein differenzierteres Verständnis für die Klimaschutzqualität marktrelevanter Bau- und Konstruktionsweisen herbeizuführen, was im Rahmen der Kurzstudie *Recarbonatisierung von Mauerwerk* [23] umgesetzt wurde. Aus den Ergebnissen [20] über den Lebenszyklus auf Gesamtgebäudeebene für das MFH-Typengebäude lässt sich festhalten, dass der CO₂-Fußabdruck des MFH-Typengebäudes aus Kalksandstein (in absoluten Tonnen an CO₂-Äquivalenten) über einen 50- respektive 80-Jahre-Gebäudelebenszyklus durch die Effekte der Recarbonatisierung in der Nutzungsphase (Modul B1) um 6 respektive 4 % reduziert wird.

INFO

Jede Tonne Kalksandstein speichert in 50 Jahren fast 50 kg CO₂, und das dauerhaft über ein späteres Recycling/Aufbrechen hinaus.

6. Rückbau und Recycling von KS-Mauerwerk

Durch die natürliche Rohstoffbasis und Rezeptur aus Kalk, mineralischen Gesteinskörnungen (zumeist Quarzsande und/oder gebrochenes Natursteinmaterial) und Wasser ohne (chemische) Zusatzmittel entsteht bei der Herstellung von Kalksandsteinen ein sehr homogenes, monolithisches Produkt. Insofern liegt grundsätzlich eine sehr gute stoffliche Ausgangsbasis für ein Recycling und entsprechend geschlossene Stoffkreisläufe am Ende des Lebenszyklus von KS-Mauerwerk vor – im Übrigen ohne jedwedes Gefährdungspotenzial für die Umwelt.

INFO

Die Umweltverträglichkeit von reinem Kalksandstein-Recycling-Material wurde durch Feststoff- und Eluat-Analysen (Auslaugungsverhalten) sowie Analysen zu Ausgasungen und Radioaktivität intensiv untersucht und durch die Analyseergebnisse bestätigt [24] [25].

Die Abfallfraktion Bauschutt, zu der am Ende des Lebenszyklus auch Mauerwerk im Allgemeinen bzw. Kalksandsteine im

Speziellen zählen, repräsentiert mit ca. 55,2 Mio. Tonnen einen maßgeblichen Teil sowohl des mineralischen Bauabfallstroms als auch der gesamten nationalen Abfallbilanz (Bild 24). Dabei wird die Abfallfraktion Bauschutt nach Zahlen des 14. Monitoringberichts der Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (Zahlen/Statistik aus 2022) nahezu vollständig (ca. **97,4 %**) stofflich verwertet bzw. zu fast **81,7 %** einem Recycling zugeführt, d.h. einer stofflichen Verwertung zur Gewinnung marktfähiger Sekundärrohstoffe.

Speziell für das Recycling von Kalksandstein und KS-Mauerwerk wurden durch verschiedene Forschungsprojekte unterschiedlichste mögliche Verwertungswege und Recyclingpfade aufgezeigt – einen Überblick über Möglichkeiten der Kreislaufführung gibt Bild 25.

Kalksandstein-Recycling-Material wird in den Produktionsprozess von Kalksandstein zurückgeführt oder als Zuschlag bei der Herstellung von Beton verwendet – wobei der Anteil des rückführbaren Kalksandstein-Recycling-Materials entscheidend von dessen Sortenreinheitsgrads bestimmt wird.

Auch eine nennenswerte Verwendung von Kalksandstein-Recycling-Material im Erd-, Straßen- und Wegebau erscheint auf Basis der Forschungsergebnisse prinzipiell möglich.

Vielversprechende Ergebnisse zeigen auch Untersuchungen zum Einsatz von Recycling-Material im Vegetationsbau (für Dachbegrünungen, Baum- und Strauchpflanzungen), bei der vegetationstechnischen Bodenverbesserung (Einsatz wasserspeichernder poröser Gesteinskörnungen) und im Deponie-

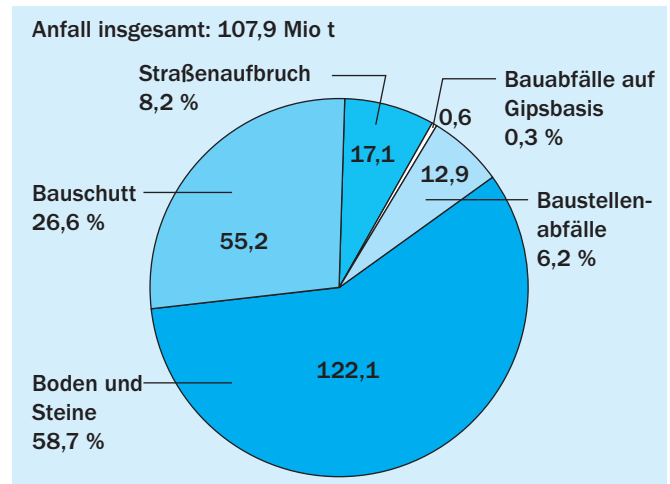


Bild 24 Mineralische Bauabfälle in Mio. t [26]

bau, wo Kalksandstein-Granulaten als Träger für Mikroorganismen dienen, die das extrem klimaschädliche Methan abbauen können.

INFO

Kalksandstein ist im vollen Umfang recyclingfähig – Primärrohstoffe werden geschont.

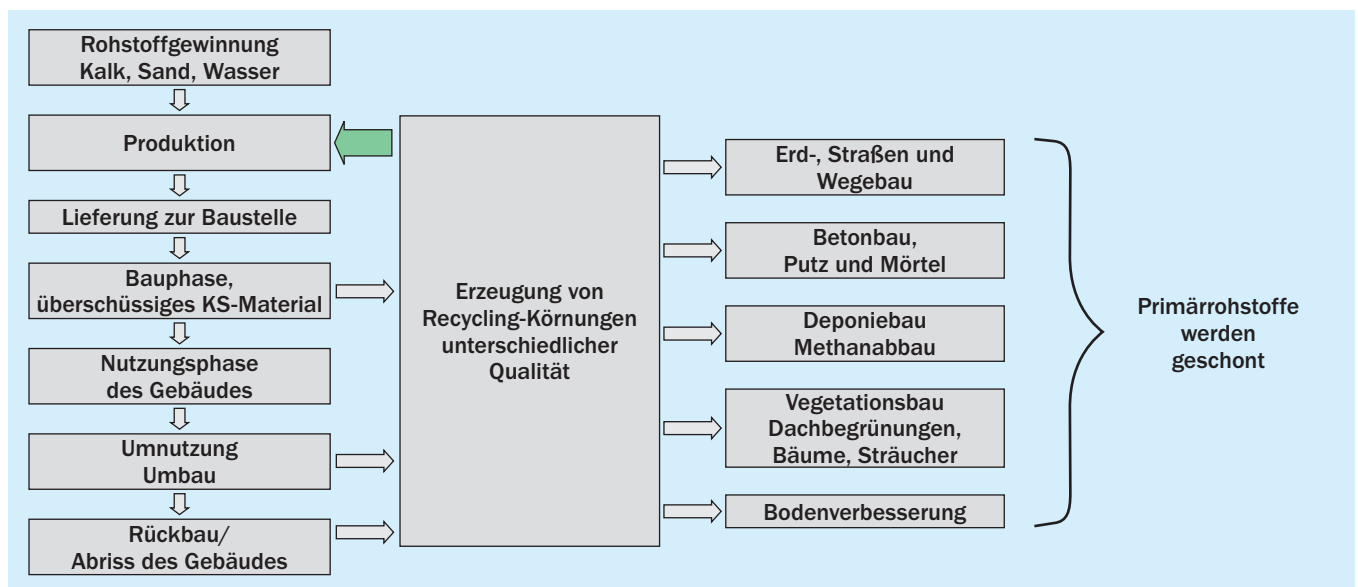


Bild 25 Kreislaufführung von Kalksandstein [15]

7. Klimaschutzgerechte und nachhaltige Gebäude aus Kalksandstein

Lebenszyklusorientierte CO₂-Bilanz von Gebäuden aus Kalksandstein

Die Ergebnisse zur Recarbonatisierung von Kalksandstein bzw. der dahinterstehenden Studien [20] [21] [23] können auch genutzt werden, um Aussagen zur CO₂-Bilanz von Gebäuden aus Kalksandstein über den gesamten Lebenszyklus abzuleiten.

Unter Berücksichtigung aller zu bilanzierenden Lebenszyklusmodule gemäß Bild 13 bleibt festzuhalten, dass die Bau- und Konstruktionsweise eines Gebäudes bei heutigem Energiestandard und Zusammensetzung der Energieversorgung (d.h. dem sehr hohen Ergebnisanteil des betrieblichen Energieeinsatzes der Nutzungsphase = Modul B6) für die Gesamtbilanz nur eine nachgeordnete Rolle spielt.

Die CO₂-bilanziellen Unterschiede zwischen den Varianten des Typengebäudes in Mauerwerk, Stahlbeton und Holzbauweise aus der Herstellungsphase (Module A1 bis A3) ebnen sich über den Lebenszyklus von 50 Jahren bereits weitgehend ein, weil

- die (biogene) Speicherwirkung des Holzes beim End of Life umgekehrt, d.h. der Speicher wieder aufgelöst wird (thermische Verwertung),
- massive Bauweisen in Mauerwerk und Stahlbeton in der Nutzungsphase wegen höherer Wärmespeicherkapazitäten etwas weniger Heizenergie benötigen als leichte Bauweisen und dadurch weniger Emissionen verursachen und
- mineralisch basierte, bindemittel-gebundene Baustoffe wie Kalksandstein über den Effekt der Recarbonatisierung dauerhaft CO₂ speichern können.

Bei einer realitätsnäheren Betrachtung über einen Lebenszyklus von beispielsweise 80 Jahre setzt sich die Nivellierung wei-

ter fort – hier treten dann auch die Langlebigkeitsvorteile massiver Bauweisen in Mauerwerk positiv zu Tage.

INFO

Gebäude in massiver Bauweise erreichen Nutzungsdauern von deutlich über 80 Jahren.

Ökonomische Nachhaltigkeit

Gemäß Definition der dargestellten deutschen Systeme zur Nachhaltigkeitsbewertung wird die *ökonomische Nachhaltigkeit* durch die sogenannten *Lebenszykluskosten* einerseits und die Werthaltigkeit von Gebäuden andererseits bestimmt. Der An-

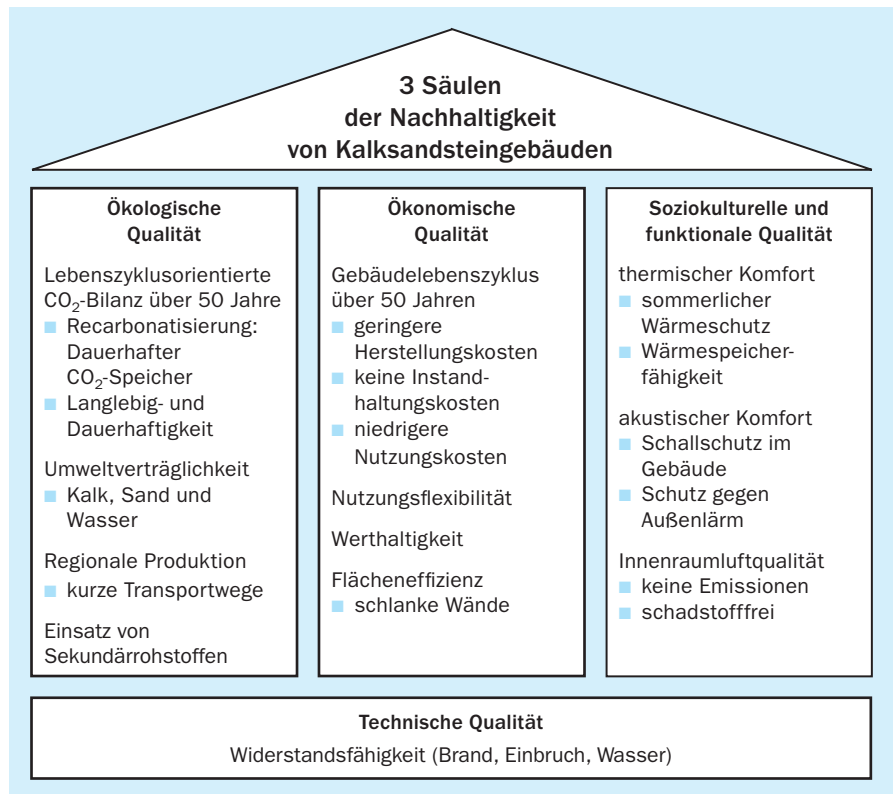


Bild 26 Nachhaltigkeit von Kalksandsteingebäuden

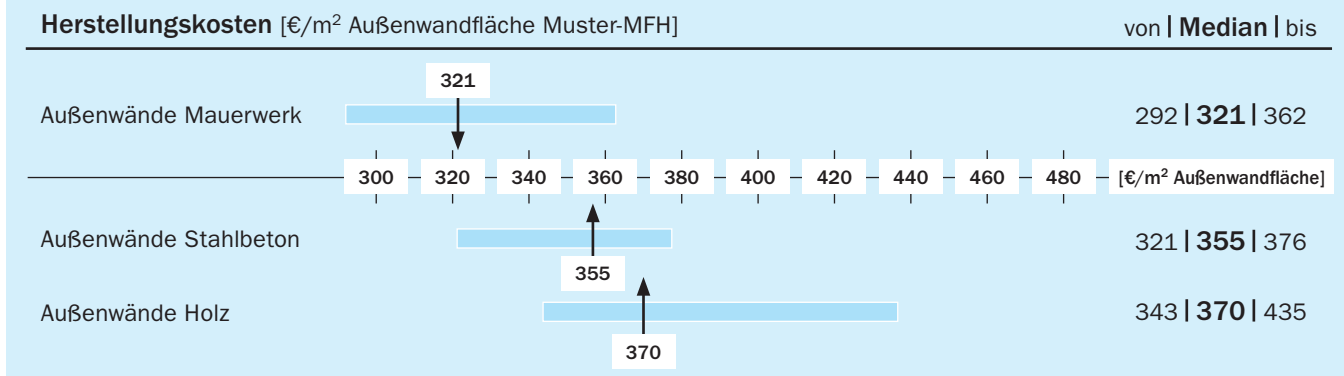


Bild 27 Herstellungskosten von Außenwandkonstruktionen für MFH-Typengebäude aus [22] gemäß Daten aus [28]

satz der Lebenszykluskosten adressiert über die bloßen Herstellungskosten hinaus u.a. auch die Kosten für die Instandhaltung über den definierten Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren inklusive Preissteigerungsraten und Diskontierung künftiger Zahlungen auf den aktuellen Betrachtungszeitpunkt. In diesem Bereich wirken sich zweierlei Vorzüge des Mauerwerks allgemein reduzierend auf die Lebenszykluskosten aus. Zum einen geringere Herstellungskosten (Bild 27) im Vergleich zur Stahlbeton- oder Holzbauweise u.a. aufgrund einer einfacheren bautechnischen Verarbeitung. Zum anderen zeichnen sich Wandkonstruktionen in Mauerwerk gegenüber anderen Bauweisen aufgrund längerer technischer Lebensdauern – insbesondere bei Betrachtung realitätsnaher Ansätze für Lebenszyklen von Gebäuden über 80 Jahre – durch deutlich niedrigere Nutzungskosten aus (Bild 28).

INFO

KS-Mauerwerk gehört zu den wirtschaftlichsten Bauweisen, sowohl bei den Herstellkosten als auch bei den Lebenszykluskosten.

Massive Bauweisen wie Mauerwerk begünstigen zudem die Nutzungsflexibilität von Gebäuden als eine Facette der *Werthaltigkeit*. Ihre regelmäßig vorliegenden statischen Reserven führen in Kombination mit den üblicherweise ausgeführten Decken in Stahlbeton bei Veränderungen in der Nutzung dazu, dass auftretende erhöhte Lasten kompensiert und unter Umständen erforderliche Grundrissänderungen aus statischer und baupraktischer Sicht einfacher realisierbar sind als etwa bei (leichten) Ständerbauweisen.

Auch die hohe Widerstandsfähigkeit gegenüber Schadensereignissen respektive ein entsprechendes Sicherheitsniveau (Resilienz) – etwa beim Brandschutz oder gegenüber veränderten Umweltbedingungen aufgrund des Klimawandels [7] – trägt zur Wertstabilität von Mauerwerksgebäuden bei.

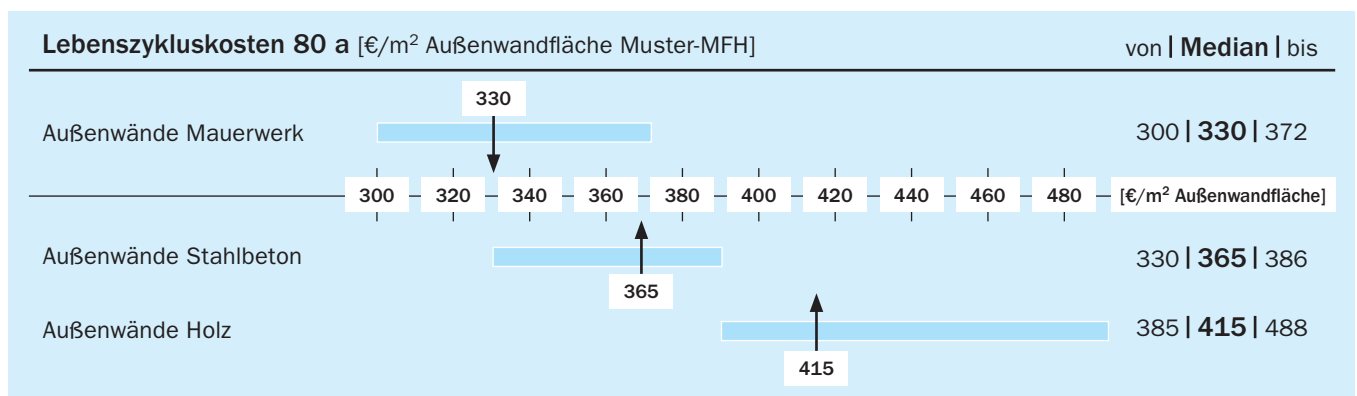


Bild 28 Lebenszykluskostenbetrachtung über 80 Jahre für Außenwandkonstruktionen des MFH-Typengebäudes aus [22] gemäß Daten aus [28]

Der Klimaschutz bzw. das klimakompatible Bauen stellt letztlich nicht den alleinigen Baustein für Nachhaltiges Bauen dar.

Bereits im Bereich der *ökologischen Nachhaltigkeit* tritt mit der *Baubiologie*, sprich der Vermeidung von potenziellen Schadstoffen in Baustoffen und -produkten (z.B. halogenierte Treib- oder Flammschutzmittel in Dämmstoffen, Schwermetalle oder organische Lösemittel und Weichmacher, etc.), ein wichtiges Anforderungsfeld hinzu. Anders als viele hochverarbeitete Holzwerkstoffe im Baubereich können mineralisch basierte Baustoffe wie Mauerwerk hier *grundsätzlich* als unkritisch und emissionsarm klassifiziert werden, was insbesondere von Relevanz für die Innenraumluftqualität in Gebäuden als soziokultureller Nachhaltigkeitsaspekt ist.

Für die Nutzergesundheit ist außerdem die *Raumluftqualität* entscheidend. Sie wird auch von Schadstoffquellen in der Gebäudekonstruktion bestimmt. Die können von vornherein durch die Auswahl emissionsarmer Bauprodukte vermieden werden: mineralische Baustoffe wie Mauerwerk legen hier hervorragende baukonstruktive Voraussetzungen.

Im Feld der *soziokulturellen Nachhaltigkeit* ist als zentraler konstruktionsspezifischer Komfortaspekt der *thermische Komfort* zu nennen. Dabei liegen die Vorteile des Mauerwerks sowohl beim winterlichen als auch sommerlichen Wärmeschutz; weil hier die Wärmespeicherfähigkeit mitentscheidend ist. Mauerwerk ist wegen seiner vergleichsweise hohen Masse und Trägheit bei Temperaturveränderungen besser in der Lage als leichtere Konstruktionsweisen, Wärme aufzunehmen und erst zeitverzögert wieder abzugeben – mit entsprechend positiven Folgen für Heizenergiebedarfe und Spitzenheizleistungen im Winter sowie Überhitzungszeiträume und Spitzentemperaturen im Sommer. Die skizzierten Masseunterschiede zwischen massiven und leichten Bauweisen haben auch Auswirkungen auf den soziokulturellen Aspekt des *akustischen Komforts* bzw. aus baukonstruktiver Perspektive den *Schallschutz*. Mit der schweren KS-Mauerwerksbauweise lassen sich Anforderungen an das Bau-Schalldämm-Maß einfacher realisieren als bei leichten Bauweisen, die komplexere Konstruktionsdetails erfordern.

Literatur

- [1] United Nations (UN) [Hrsg.]: Global indicator framework for the Sustainable Development Goals and Targets of the 2030 Agenda for Sustainable Development, April 2020. Zugriff: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/indicators-list/>
- [2] Bundesministerium für Justiz (BMJ) [Hrsg.]: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2016 Teil II Nr. 26, ausgegeben zu Bonn am 30. September 2016: Gesetz zu dem Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015.
- [3] Statista: Treibhausgasemissionen in Deutschland nach Sektoren des Klimaschutzgesetzes in den Jahren 1990 bis 2023 und Prognose für 2030. Zugriff: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1241046/umfrage/treibhausgasemissionen-in-deutschland-nach-sektor/>
- [4] Die Bundesregierung (BReg) [Hrsg.]: Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Fassung von Oktober 2019. Zugriff: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/massnahmenprogramm-klima-1679498>
- [5] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen [Hrsg.]: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Systemvariante BNB 2015 für Büro- und Verwaltungsneubauten. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/buerogebaeude/steckbriefe-bnb-bn-2015/>
- [6] DGNB GmbH [Hrsg.]: DGNB-System Kriterienkatalog Gebäude Neubau, Version 2023, 1. Auflage. Stuttgart, 2023
- [7] Pohl, S., Clanget-Hulin, M., Purkert, B.: Klimaresilienz in der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauweisen. Mauerwerk 26 (2022), Heft 1, Berlin 2022
- [8] NaWoh e.V. [Hrsg.]: Nachhaltiger Wohnungsbau – Bewertungssystem und Qualitätssiegel. Zugriff: https://www.nawoh.de/uploads/pdf/Praesentation_NaWoh.pdf
- [9] BiRN GmbH [Hrsg.]: Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau, Allgemeine Grundlagen zur Bewertungsmethode. Zugriff: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Steckbriefe_Kleinhausbau/000_Allgemeine_Grundlagen_V1.0.pdf
- [10] Graubner, C.-A., Pohl, S.: Ist vereinfacht vollständig genug? – Spannungsfeld der Ökobilanzverfahren des Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen. Zeitschrift Bauingenieur, Band 90, Januar 2015.
- [11] BBSR [Hrsg.]: Ökobaudat, Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung. Forschung für die Praxis | Band 09. Bonn, 2019
- [12] Institut Bauen und Umwelt e.V. [Hrsg.]: Umwelt-Produktdeklaration Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., EPD-BKS-20210205-IBE2-DE.
- [13] Graubner, C.-A., Pohl, S.: EPD – Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte. Ein Kommunikationskanal für ökologische Nachhaltigkeitsqualität. In: Betonwerk international, Dezember 2012.
- [14] ift Rosenheim [Hrsg.]: Änderungen in der EN 15804 für EPDs – Neue Version der EN 15804 für Typ-III-Umweltdeklarationen von Bauprodukten, -leistungen und -prozessen. Newsletter 11/2021, Rosenheim
- [15] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. [Hrsg.]: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie (Langfassung). Hannover, 2021
- [16] Kalksandstein-Dienstleistung GmbH [Hrsg.]: Wege in eine zukunftsorientierte Transformation: Roadmap für eine treibhausgasneutrale Kalksandsteinindustrie in Deutschland (Kommunikationsfassung). Hannover, November 2021
- [17] Caballero Gonzalez, A.: Recarbonation of Calcium Silicate Masonry Products. AAC Worldwide, Ausgabe 1/2022, Köln 2022
- [18] Walther, H.B.: CO₂-Einbindung in Porenbeton und Kalksandstein durch Recarbonatisierung. Mauerwerk 26 (2022), Heft 1, Berlin 2022
- [19] Lenz, K., Steier, S., Göttig, R.: Potenziale im Mauerwerksbau – Teil 1: Literaturstudie zur qualitativen Analyse bei der Bewertung verschiedener Bauweisen – Ökologie/Energie/Wohngesundheit. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart/Holzkirchen/München, 2021
- [20] Lenz, K., Steier, S., Göttig, R.: Potenziale im Mauerwerksbau – Teil 2: Detailanalyse ausgewählter Aspekte der Nachhaltigkeit – Ökologie/Energie – Teil A: Status Quo. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart/München, 2022
- [21] Lenz, K., Steier, S., Göttig, R.: Potenziale im Mauerwerksbau – Teil 2: Detailanalyse ausgewählter Aspekte der Nachhaltigkeit – Ökologie/Energie – Teil B: Zukunftsszenarien. Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart/München, 2022
- [22] Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. [Hrsg.]: Typengebäude MFH: EnEV2016. Massenermittlung gemäß DIN 276/277, Kiel 2014
- [23] LCEE GmbH [Hrsg.]: Recarbonatisierung von Mauerwerk (Kurzstudie). Darmstadt, 2022
- [24] Institut Bauen und Umwelt e.V. [Hrsg.]: Umwelt-Produktdeklaration Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V., EPD-BKS-20160002-IAE1-DE
- [25] BfS-SW-14/12: Gehrke, K; Hoffmann, B; Schkade, U; Schmidt, V.; Wichterey, K.: Natürliche Radioaktivität in Baumaterialien und die daraus resultierende Strahlenexposition, Salzgitter, 2012
- [26] bbs [Hrsg.]: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2022. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V., Berlin 2024
- [27] Jäger, W.: Nachhaltigkeit im Mauerwerksbau – Wiederverwendungsfähige Mauerwerkskonstruktionen ReMoMaB – Rezyklierbare modulare Massive Bauweise. Vortrag zur 12. Sitzung des Runden Tisches Ressourceneffizienz im Bauwesen, Berlin 2019
- [28] Pohl, S.: Beiträge des Mauerwerksbaus zu Klimaschutz und Nachhaltigkeit. DaFM Schriftenreihe, Heft 3, Berlin 2020

**Bildnachweise**

Bild S. 38: Tomml (iStock);

Bild S. 49; Bild S. 59: UNIKA GmbH

Bild S. 48: Bundesverband der Kalksandsteinindustrie e.V.