

Emissionsarmes Bauen mit Beton: Perspektiven und Handlungskorridore

Errichtung, Betrieb und Rückbau von Gebäuden verursachen große Mengen an Treibhausgasen. Insbesondere der Einsatz von Beton führt zu schädlichen Umweltauswirkungen. Die Herstellung von Zement verursacht mehr als 8 % des anthropogenen CO₂-Ausstoßes. In diesem Beitrag werden Lösungsstrategien aufgezeigt, die jede/r Planer/in schon heute mit den verfügbaren Technologien und Werkzeugen anwenden kann, um einen wichtigen Beitrag zur Emissionsreduzierung des Bausektors zu leisten.

Stichworte Graue Emissionen; Emissionsoptimierung; Bauwesen

1 Ressourcenverbrauch global

Nachdem im Jahr 2022 die 8-Mrd.-Grenze überschritten wurde, beläuft sich die globale Weltbevölkerung weniger als ein Jahr später bereits auf 8,05 Mrd. Menschen. Für 2050 zeigt die Projektion der Vereinten Nationen eine zu erwartende Gesamtsumme von 9,71 Mrd. Menschen. Die dann zusätzlich auf unserem Planeten lebenden 1,66 Mrd. Menschen werden zwangsläufig eigene Wohnungen, eigene Arbeitsstätten, eigene Infrastruktur etc. benötigen. Hierbei stellt sich auch die Frage, welchen Umfang und welche Qualität diese neu zu schaffende gebaute Umwelt haben kann bzw. muss. Selbst in den am wenigsten entwickelten Ländern der Erde kommen auf eine Person im Durchschnitt ca. 75 t Material an gebauter Umwelt [1]. Dieses Material ist in Straßen und Infrastrukturbauten, aber auch in Wohngebäuden und öffentlichen Bauten wie Schulen etc. gebunden. Für die bis 2050 neu hinzukommenden Menschen müssen also mindestens (!) $75 \text{ t} \times 1,66 \text{ Mrd.} = 124,5 \text{ Mrd. t}$ an neuen Baumaterialien gewonnen, transportiert, verarbeitet und irgendwann auch wieder entsorgt werden. Diese gewaltige Zahl wird noch viel größer, wenn man nicht das absolute Minimum, sondern zum Beispiel den in Deutschland geltenden Standard zugrunde legt: Hier entfallen im Durchschnitt auf jede Person 450 t Material. Um eine soziale Gleichheit mit global ausgewogenen Verhältnissen zu erzielen, wäre zumindest ein Erreichen des für Industrieländer (Stand 2010) gemittelten Durchschnitts von 335 t pro Kopf wünschenswert. Dies führt zu einer gewaltigen Streuung der erwartbaren Ressourcenverbräuche, wie in Bild 1 durch einen vereinfacht angenommenen linearen Verlauf dargestellt. Es zeigt sich, dass dringend Mittel und Methoden entwickelt (bzw. angewendet) werden müssen, mit denen es weltweit in den kommenden Jahren gelingt, für mehr Menschen mit weniger Material emissi-

Low-emission construction with concrete

The construction, operation and demolition of buildings cause large quantities of greenhouse gases. The use of concrete in particular leads to harmful environmental effects. The production of cement causes more than 8 % of anthropogenic CO₂ emissions. This article presents solution strategies that every planner can already apply today with the available technologies and tools in order to make an important contribution to reducing emissions in the building sector.

Keywords embodied emissions; emission optimization; construction industry

onsfrei zu bauen – bei gleichzeitiger Schaffung menschenwürdiger Habitate für alle.

In [2] zeigt sich am Beispiel des deutschen Wohnbauungsstandards, welche Unterschiede allein auf urbaner Ebene durch Entscheidungen für oder gegen bestimmte Bebauungstypologien auftreten. Darin wird deutlich, dass eine Bebauung in Streusiedlungen und Einfamilienhäusern das 3,5-Fache einer gleich dichten (Personen pro km²), aber höheren und effizienteren Mehrfamilienhausbebauung benötigt.

Im Folgenden werden Maßnahmen auf Gebäude-/Bauteil- und Materialebene vorgestellt, die bereits heute anwendbare Ansätze darstellen, wie wir als Planende effektiv Ressourcen und damit auch graue Emissionen einsparen können.

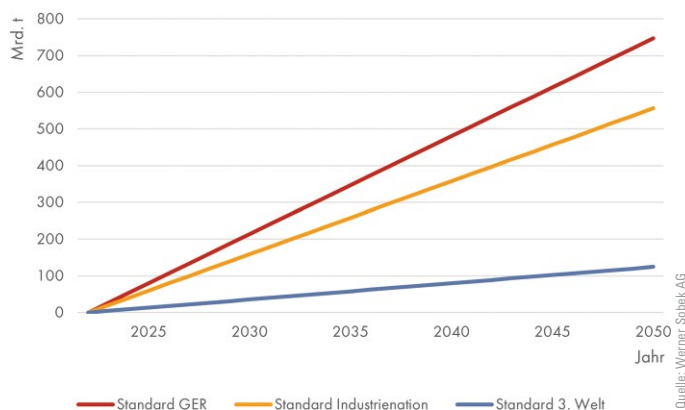


Bild 1 Entwicklung möglicher Ressourcenverbrauchsszenarien allein durch den Bevölkerungszuwachs bei einem angenommenen linearen Anstieg bis 2050
Development of possible resource consumption scenarios solely due to population growth, assuming a linear increase until 2050

2 Gebäudeebene

2.1 Tragwerksoptimierung

Die Prinzipien des Leichtbaus haben in der Ingenieurstechnik eine lange Tradition. Sie sind unersetzlich, wenn signifikante Optimierungen von Masseinsatz und Tragwerkskonstruktion vorgenommen werden sollen. Durch die Wahl von adäquaten statischen Systemen und materialgerecht eingesetzten Baustoffen können Rohstoffe und Lasten eingespart werden. Dies mindert die Emissionen eines Bauwerks in seiner Herstellungsphase. Anhand eines konkreten Bauvorhabens in Berlin sollen diese Ansätze und die damit erzielbaren Einsparungen beispielhaft beschrieben werden.

Ausgangssituation war ein in Schottenbauweise geplantes, achtgeschossiges Hotel mit bereits hergestellter Tiefgründung. Aufgrund von unzulässigen Setzungen der Gründung mussten die Gründungslasten deutlich reduziert werden. Zusätzlich wurde die Nutzungsart des Gebäudes hin zu einem Bürogebäude geändert, wodurch auch das Tragsystem angepasst werden musste. Das optimierte Ergebnis war ein Skelettbau mit bereichsweiser Umplanung des Tragwerks von Beton auf Stahl und teilweiser Ausführung der Fassade als Vierendeel-Träger. Des Weiteren wurden Rückhängungen an den Auskragungen eingeführt sowie Hohlkörperdecken in den oberirdischen Geschossen vorgesehen. Über dem Kellergeschoss wurden Spannbetonhohldielen eingesetzt, um auch hier effektiv Material einzusparen. All diese Maßnahmen, die zu keinerlei Veränderung des Erscheinungsbildes des Gebäudes oder zur Einschränkung seiner Nutzbarkeit geführt haben, konnten die resultierenden ständigen Gesamtgründungslasten um 37 % reduzieren. Diese Lastreduktion korreliert zwar nicht direkt linear mit den Emissionen; es ist jedoch davon auszugehen, dass durch die ergriffenen Maßnahmen in vergleichbarer Höhe Emissionen eingespart werden können. Mit einer groben, konservativen Abschätzung lassen sich

ca. 20 % Emissionseinsparung bezogen auf die Herstellungsemissionen der Materialien benennen, da einige Betonbauteile gegen Stahl ausgetauscht werden mussten. Ergänzend wirkt sich die Reduktion von Gründungslasten positiv auf die Ausführung der Gründung selbst aus, wodurch ebenfalls Ressourcen und Emissionen (sowie Kosten) eingespart werden können. Es zeigt sich, dass aus Zwängen und Notwendigkeiten (Reduktion der Gründungslasten) auch Optimierungen resultieren können, die den ökologischen Fußabdruck von Gebäuden positiv beeinflussen können. Die Optimierung erforderte zwar zusätzlichen Planungsaufwand. Dieser wurde jedoch durch die erzielten Materialeinsparungen ebenso wie durch weitere, daraus resultierende Einsparungen (zum Beispiel bei Bauzeit und Baustelleneinrichtung) mehr als kompensiert.

2.2 Bestandssanierung und -transformation

Neben der Anwendung von Leichtbauprinzipien bietet auch die Sanierung oder Transformation von Bestandsgebäuden ein großes Potenzial zur Emissionsvermeidung. Unter Transformation werden in diesem Kontext grobe Eingriffe in die Bestandsstruktur bezeichnet, wie z. B. das Einschneiden von Lichthöfen zur Erreichung der heute geforderten Tageslichtsituation am Arbeitsplatz oder ein kompletter Austausch der Fassade. Unter Sanierung werden kleinere Eingriffe verstanden, die sich z. B. auf die Fassade oder den Ausbau beschränken. Sogar unter Berücksichtigung von Transformationsmaßnahmen können gegenüber einem vergleichbaren Ersatzneubau mindestens 40 % der grauen Emissionen eingespart werden. Dies zeigen verschiedene Projektstudien von Werner Sobek, z. B. zum Bauvorhaben TheQ in Nürnberg [3, 4] oder in der Vergleichsstudie des Althan-Quartiers in Wien [5]. Die Autor:innen sehen die zukünftigen Herausforderungen wie folgt: Die Wertschätzung für das Bauen mit und im Bestand muss gestärkt, den Ingenieur:innen notwendiges Wissen und Kenntnisse vermittelt werden.



Quelle: ksg Architekten und Stadtplaner

Bild 2 Bestandstransformation am Beispiel von TheQ in Nürnberg
Revitalising a building complex - the example of TheQ in Nuremberg

Je weniger Eingriffe in den Bestand vorgenommen werden, desto mehr Einsparungen können erzielt werden. Die Weiternutzung von Bestandssubstanz ist vorrangig in der Phase 0 zu prüfen; wenn technisch möglich, sollte sie unter dem Gesichtspunkt der Material- und Emissionseinsparung stets einem Neubau vorgezogen werden. Weitere ausführliche Informationen zum Bauen im und mit dem Bestand können Glückert [6] in der vorliegenden Ausgabe entnommen werden.

3 Bauteilebene

3.1 Bauteilwiederverwendung

Während die Wiederverwendung von Stahl- oder Holzelementen durch die üblicherweise verwendeten lösba- ren Schraubverbindungen erleichtert wird, bestehen im Betonbau bislang noch keine bzw. nur sehr wenige vergleichbare Möglichkeiten. Häufig werden Gebäude in monolithischer Bauweise in Ortbeton erstellt. Ein Trennen der Bauteile mit geeigneten Sägewerkzeugen ist zwar technisch umsetzbar, führt jedoch zur Zerstörung der Bewehrungsführung und verhindert somit einen erneuten Einsatz. Eine Lösung bieten Betonfertigteile. Hersteller wie Peikko werben mit Fertigteilverbindungen, die trotz Verguss der Fertigteile voneinander demontiert werden können [7]. Bei mehreren Projekten (besonders in den Niederlanden) wurden diese Konzepte bereits erfolgreich getestet. Bei Deckensystemen erfordert dieses Konzept allerdings den Verzicht auf Fließstrich oder andere mit der Hauptkonstruktion verbundene Bodenaufbauten. Die trennbaren Verbindungen können für Stützen, Balken, Wände und Decken (Vollfertigteile oder Spannbetonhohldielen) eingesetzt werden. Neben den umwelttechnischen Vorteilen bietet die Wiederverwendung auch wirtschaftliche Vorteile [7]. Anhand eines konkreten Rechenbeispiels (Bild 3) soll erläutert werden, welchen Einfluss die Wiederverwendung eines Deckenbetonfertigteils auf die Lebenszyklusemissionen unserer gebauten Umwelt hat. Weitere Komponenten wie Stahlträger werden in diesem Rahmen aus Platzgründen nicht behandelt – hier bieten sich aber offensichtlich noch viele weitere inter-

essante Möglichkeiten zur Einsparung von Material und Emissionen.

Szenario 1 beschreibt die herkömmliche Herstellung, Montage und Abbruch von Neubau 1 sowie die Herstellung von Neubau 2 nach Abriss von Neubau 1.

Szenario 2 beschreibt die Herstellung, Montage und den zerstörungsfreien Rückbau von Neubau 1 sowie den Transport des Bauteils zur Wiederverwendung im Neubau 2.

Für die Transporte vom Werk zur Baustelle wurden im vorliegenden Beispiel je 100 km angesetzt, für den Transport zur Entsorgung bzw. Wiederverwendung je 50 km. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass heutzutage besonders für den Transport zur Entsorgung weitaus höhere Distanzen anfallen können (aufgrund der fortschreitenden Überfüllung von Deponien in dicht besiedelten Gebieten, die ein Ausweichen auf weiter entfernt liegende Deponien erfordert). Für den optional eintretenden Fall einer erhöhten Entfernung von 500 km bis zur nächsten Entsorgungsmöglichkeit ist der Anteil der damit verbundenen Emissionen in Bild 3 gestrichelt dargestellt.

Das Beispiel (Bild 3) zeigt, dass durch die Wiederverwendung eine Emissionseinsparung von ca. 50 % gegenüber dem Abriss und der Neuherstellung erzielt werden kann. Dieser hohe Anteil lässt sich mit den dominanten Emissionen der Herstellungsphase im gesamten Lebenszyklus begründen. In Anbetracht der durchschnittlichen Lebensdauer eines Gebäudes von < 50 Jahren in Deutschland bietet die Bauteilwiederverwendung ein großes Potenzial zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäudebestandteilen trotz Veränderung der Nutzung. Zu unterscheiden ist dabei zwischen Wohn- und Bürogebäuden. Bürogebäude erreichen oftmals vorzeitig ihr Lebensende aufgrund von Umnutzungen. In diesen Fällen bietet die Bauteilwiederverwendung die notwendige Flexibilität zur Umgestaltung und zur Ausnutzung der möglichen Nutzungsdauer der Bauteile von deutlich > 50 Jahren.

Eine bislang noch nicht final geklärte Frage ist dabei die nach der Gewährleistung und Zulassung für Neubauten.

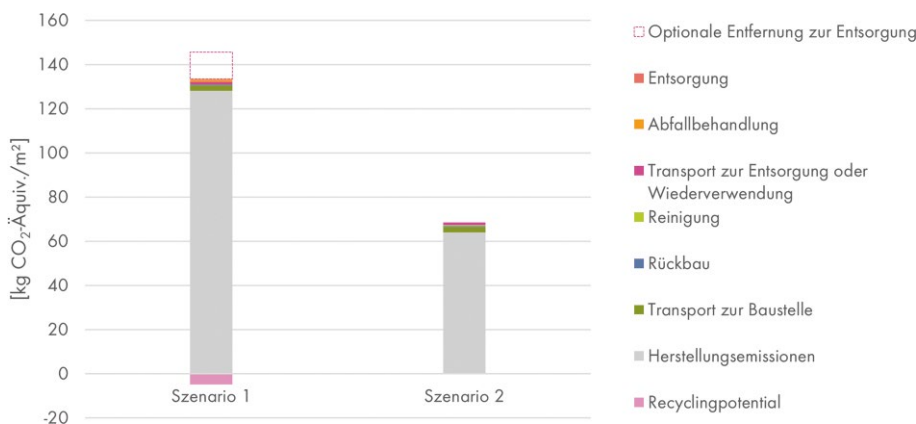


Bild 3 Vergleich zur Wiederverwendung von Betonfertigteildecken, basierend auf [8]
Comparison for the reuse of precast concrete floors, based on [8]



Quelle: peikko

Bild 4 Wiederaufbau des zurückgebauten Testaufbaus im Rahmen der Rückbau- und Wiederaufbautests
Reconstruction of the dismantled test superstructure within the framework of the deconstruction and reconstruction test

Hier bedarf es eines schlanken, aber geordneten Prozesses, der zum einen Informationen über Abbruchvorhaben liefert und der zum anderen eine Prüfstruktur bietet, die entsprechende Aussagen über Tragfähigkeit, Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit der Bauteile treffen kann. Der Freigabeprozess genutzter Bauteile kann sich dabei auf die Erfahrungen aus vielen erfolgreichen Sanierungs- und Revitalisierungsprojekten stützen. Auch bei diesen weisen Ingenieur:innen schon heute lange bestehende Bauteile mit relativ unkomplizierten Freigabeverfahren nach. Ebenfalls erforderlich sind natürlich auch ausführende Firmen, die einen selektiven und auf Wiederverwendung ausgerichteten Rückbau ausführen können. Eine Einbindung in das Kreislaufwirtschaftsgesetz sowie eine Genehmigungspflicht für Abbruch wären erste Schritte in die richtige Richtung. Es bedarf jedoch weiterer Maßnahmen, um Stoffkreisläufe wirklich schließen zu können, ohne das gesamte wirtschaftliche und technische Risiko auf Planende oder Bauherren allein zu übertragen.

3.2 Unbewehrte Bauteile

Sofern infolge von Lasten, Zwang o. Ä. keine Zugspannungen im Bauteil auftreten, kann auf Bewehrung verzichtet werden. Dies trifft vor allem bei Wänden zu, solange keine Bewehrung zur Erhöhung der Tragfähigkeit oder zur Sicherung gegen Knicken erforderlich ist. Bei konzentrierten Druckspannungen muss jedoch eine Bewehrung gegen Spalten vorgesehen werden. Insbesondere während der Rohstoffknappheit Mitte des letzten Jahrhunderts wurden unbewehrte oder gering bewehrte Wände häufig ausgeführt. Heutzutage finden sie kaum Anwendung, obwohl die DIN EN 1992-1-1 im Abschnitt 12 [9] Regeln dazu enthält, die die Verwendung unter den oben genannten Randbedingungen grundsätzlich zulassen. Darin sind auch Stützen, Bögen, Gewölbe und Tunnel behandelt, sowie Streifen-/Einzelfundamente und Pfähle.

In der Praxis wird derzeit die Möglichkeit, unbewehrte Bauteile auszuführen, nahezu nicht mehr angewendet.

Auch in Fällen, in denen die Randbedingungen für unbewehrte Bauteile erfüllt wären, werden diese mit der sogenannten Mindestbewehrung bewehrt, obwohl normativ auf diese verzichtet werden könnte. Für einen Quadratmeter einer typischen Betonwand mit $t = 25 \text{ cm}$ und C25/30 bedeutet dies einen Entfall von ca. 28 kg Betonstahl ($\text{Ø}10\text{--}12,5/\text{kreuzweise}$) und damit eine Einsparung von 19 kg CO_2 -Äquivalent pro m^2 . Bezogen auf die Gesamtemissionen der Betonwand inkl. Bewehrung von

$$50 + 19 = 69 \text{ kg CO}_2\text{-Äquivalent/m}^2 \text{ gemäß [10, 11]}$$

bedeutet dies eine Reduktion der Emissionen (A1–A3) um 27 %. Dieser Wert ist als Richtwert zu verstehen und unterliegt Schwankungen in Abhängigkeit von der Betongüte und der Wanddicke.

Die Möglichkeit zur Ausführung der Wände ohne oder mit geringem Bewehrungsgehalt wird durch einen gradlinigen Lastabtrag und klare Geometrien begünstigt. Die Umsetzung der Möglichkeit muss anhand der DIN EN 1992-1-1 stets von den Tragwerksplanenden geprüft werden.

3.3 Gradientenbeton

Eine weitere Option der Reduktion von Materialverbräuchen auf Bauteilebene wurde Anfang des 21. Jahrhunderts von Werner Sobek mit der Technologie des sog. Gradientenbetons entwickelt. Im Bauwesen ist die Außengeometrie der meisten tragenden Elemente aus übergeordneten Konstruktions-, Fertigungs- oder Nutzungsgründen vorgegeben. Die Formoptimierung als Methode zur Reduzierung des Materialverbrauchs durch Entwicklung einer idealen Bauteilgeometrie ist in diesem Fall nicht anwendbar. Bei inhomogenen Spannungszuständen im Bauteil sind bei einem Werkstoff mit konstanten Materialeigenschaften Biegespannungen innerhalb der Struktur nahezu unvermeidbar. Die Folge sind ineffiziente Tragelemente mit unnötig hohem Materialeinsatz, der für die Lastaufnahme nicht benötigt wird. Eine Gewichtsminimierung und die damit verbundene Ressourceneffizienz kann bei solchen Bauelementen nur durch eine bewusste Gestaltung des Innenraums erreicht werden [12].

Werner Sobek erfand die Technologie des Gradientenbetons zur Optimierung des Innenraums von Betonbauteilen. Bei diesem Ansatz werden die Steifigkeitseigenschaften im Innenraum so manipuliert, dass ein homogener Spannungszustand erreicht wird, ein sogenanntes „fully stressed design“. Die Steifigkeitsmanipulation kann durch den Einbau von Betonen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften (Mikrogradierung), den gezielten Einbau von mineralischen Hohlkörpern (Mesogradierung) oder eine Kombination aus beiden Techniken erfolgen. Diese Strategie zur optimalen Verteilung des Betonvolumens innerhalb eines Bauteils führt zu erheblichen Materialeinsparungen und Gewichtsreduzierungen.

Die Ansätze wurden in den vergangenen Jahren immer weiterentwickelt, sodass sie nun auch eine innovative Bewehrungslegung ermöglichen, die zusätzlich zum eingesparten Beton den Stahlverbrauch reduziert. Eine ausführliche Erläuterung dieser Technologie ist dem Beitrag Sobek, Schmeer [13] im vorliegenden Heft zu entnehmen. Neben der Einsparung auf Bauteilebene kann zusätzlich dazu auch auf Materialebene optimiert werden, wie in Abschn. 4 beschrieben.

4 Materialebene

4.1 Wahl der Betongüte

4.1.1 Voraussetzungen

Grundsätzlich gilt: je höher die Betongüte, desto höher die grauen Emissionen. Daher ist die Wahl der Betongüte ein wichtiges Instrument zur Einsparung von Treibhausgasen. Auswertungen zeigen, dass die am häufigsten verwendeten Betongüten in Deutschland C25/30 und C30/37 sind. Die Wahl der Betongüte beeinflusst unter anderem auch die Menge der Mindestbewehrung zur Rissbeschränkung.

4.1.2 Decken

Die Bemessung einer Decke wird durch die Biegesteifigkeit und damit durch den E-Modul und durch die statische Höhe bestimmt. Dabei ist der E-Modul abhängig von der gewählten Betongüte. Die Tab. 1 zeigt die Entwicklung des E-Moduls im Vergleich zum Anstieg der Herstellungsemissionen in Abhängigkeit von der Betongüte. Die Auswertung ist unabhängig von der Bauteildicke (Tab. 2), verdeutlicht jedoch, dass der Zuwachs des E-Moduls geringer ausfällt als der Zuwachs der Herstellungsemissionen.

Die Betongüte hat in Bezug auf die Bemessung und die erforderliche Biegebewehrung eine untergeordnete Rolle. Dies kann am Beispiel eines 1 m breiten Deckenstreifens unter Belastung durch ein Biegemoment von 100 kNm gezeigt werden. Bei gleichbleibendem Bewehrungsgehalt variieren die beiden Parameter Deckenstärke [t] und Betongüte, Tab. 2. Bild 5 zeigt, dass mit einer Reduktion der Deckenstärke um 1,5 cm durch Erhöhung der Betongüte die damit verbundenen Herstellungsemissionen pro m² um 30 % ansteigen und die Steifigkeit trotz höherem E-Modul sinkt. Für ein 20-geschossiges Hochhaus bedeutet dies in Summe eine Gesamthöhenreduktion um 31,5 cm. Bei einer durchschnittlichen Geschosshöhe von 3,5 m entspricht dies < 1 % der Gesamthöhe. Die fehlende Reduktion der Gesamthöhe äußert sich jedoch in den verti-

Tab. 1 Zuwachs der Herstellungsemissionen und des E-Moduls in Abhängigkeit von der Betongüte
Increase in manufacturing emissions and modulus of elasticity as a function of concrete quality

Beton	GWP	E-Modul	GWP	E-Modul
	[kg CO ₂ -Äq./m ³]	[N/mm ²]	Zuwachs	Zuwachs
C20/25	178	30.000	1,00	1,00
C25/30	197	31.000	1,11	1,03
C30/37	219	33.000	1,23	1,10
C35/45	244	34.000	1,37	1,13
C45/55	287	35.000	1,61	1,17
C50/60	300	36.000	1,69	1,20

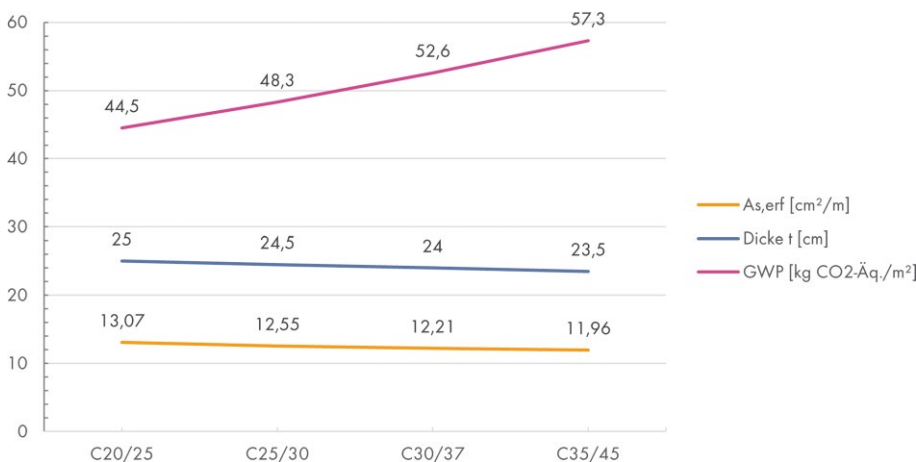


Bild 5 Auswirkung der Deckenstärke in Abhängigkeit von der Betongüte auf die Herstellungsemissionen
Effect of slab thickness as a function of concrete quality on manufacturing emission

Tab. 2 Auswirkung der Deckenstärke in Abhängigkeit von der Betongüte auf die Biegesteifigkeit
Effect of slab thickness as a function of concrete quality on bending stiffness

Beton	E-Modul [N/mm ²]	Dicke <i>t</i> [cm]	<i>EI</i> [kN/cm ²]	Vergleich
C20/25	30.000	25	390.625.000	1,00
C25/30	31.000	24,5	379.908.229	0,97
C30/37	33.000	24	380.160.000	0,97
C35/45	34.000	23,5	367.706.458	0,94

kalen Bauteilen. So muss z. B. mehr Fassadenfläche (31,5 cm multipliziert mit der Gesamtabwicklung des Gebäudes) eingebaut werden. Pro abgewickelten Meter ergeben sich dafür ca. 40 kgCO₂ (Alu-Pfosten-Riegel-Fassade). Diese Mehremissionen müssen in Abhängigkeit von der Gebäudegeometrie immer gesamtheitlich betrachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass niedrigere Betongüten für biegebeanspruchte Bauteile grundsätzlich empfehlenswert sind. Die gängige Praxis der Ausführung von Decken im Bürobau in C30/37 ist also zu hinterfragen. Dies hat sich aufgrund fehlender Preisunterschiede zwischen den Betongüten durchgesetzt. Die erhofften qualitativen Vorteile stellen sich aber faktisch gar nicht ein, stattdessen werden unnötig viele Herstellungsemissionen verursacht.

4.1.3 Stützen

Stützen als zentrisch belastete Druckglieder profitieren von den besseren Festigkeiten der höherfesten Betone. In Tab. 3 ist anhand eines einfachen Beispiels dargestellt, inwiefern sich die Herstellungsemissionen und Stützenquerschnittsflächen bei Wahl der unterschiedlichen Betongüten entwickeln. Die Emissionen wurden basierend auf den verfügbaren Daten der Ökobaudat (Version 2021-II) für die jeweiligen Betongüten ermittelt. Die Emissionen der Bewehrung sind nicht enthalten und werden als gleichbleibend angenommen. Eine Optimierung

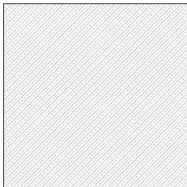
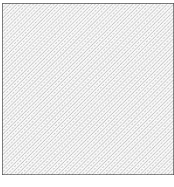
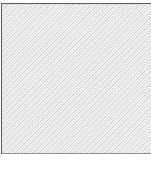
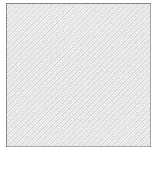


der Bewehrungsgehalte ist aber natürlich immer unabhängig von den hier vorgenommenen Betrachtungen möglich und empfehlenswert.

Druckglieder können demnach mit höherfesten Betongüten ausgeführt werden, um Herstellungsemissionen zu sparen – auch wenn allgemein gilt, dass Stützen aufgrund ihrer verhältnismäßig geringen Masse nur einen relativ kleinen Einfluss auf die Gesamtökobilanz eines Gebäudes haben. Dennoch verbirgt sich auch hier ein interessantes Einsparpotenzial; darüber hinaus führt eine Querschnittsreduktion zusätzlich zur Steigerung der Flächeneffizienz eines Gebäudes.

4.2 Wahl der Betonrezeptur

Möglichkeiten zur Reduktion des emissionsintensiven Klinkeranteils in Betonrezepturen wurden bereits in [14] diskutiert. Sie finden auch schon in der Praxis Anwendung. Durch die Einführung des CO₂-Moduls des CSC (Concrete Sustainability Council) ist es gelungen, eine allgemeingültige Vereinfachung der Reduktionsmöglichkeiten für Emissionen beim Beton zu finden. Gemäß [15] sind vier Reduktionslevel definiert, die in Ausschreibungen unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit und technischen Umsetzung verwendet werden können. Die Reduktionslevel orientieren sich an den im Handbuch des CSC definierten Branchenreferenzwerten. Diese Referenzwerte basieren auf einem Durchschnittsbeton hergestellt mit CEM I. Erwähnenswert ist hierbei die Tatsache, dass der

Tab. 3 Entwicklung der Herstellungsemissionen in Abhängigkeit vom Stützenquerschnitt und der Betongüte (gemäß vdz)
Development of manufacturing emissions as a function of the column cross-section and the concrete quality

Betongüte	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Fläche	750 cm ²	600 cm ²	500 cm ²	429 cm ²	333 cm ²	300 cm ²
Kantenlänge	27 cm	25 cm	22 cm	21 cm	18 cm	17 cm
Querschnitt						
Herstellungsemissionen pro lfm	12,9 kgCO ₂ e	12,3 kgCO ₂ e	10,6 kgCO ₂ e	10,8 kgCO ₂ e	9,3 kgCO ₂ e	8,7 kgCO ₂ e
Prozent [%]	100	95	82	84	72	67

Tab. 4 CO₂-Klassen gemäß [15]
CO₂ classes according to [15]

Betongüte	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Maximal zulässige Treibhausgasemissionen [netto kg CO ₂ -Äq./m ³] für A1–A3 (keine erwartbaren Unterschiede in den Modulen B–D)						
Branchenreferenzwert	213	237	261	286	312	325
Level 1 (↓ ≥ 30%)	149	166	183	200	218	228
Level 2 (↓ ≥ 40%)	128	142	157	172	187	195
Level 3 (↓ ≥ 50%)	107	119	131	143	156	163
Level 4 (↓ ≥ 60%)	85	95	104	114	125	130
<i>Umweltproduktdeklaration Beton (informativ)</i>	<i>178</i>	<i>197</i>	<i>219</i>	<i>244</i>	<i>286</i>	<i>300</i>

Durchschnittsbeton in Deutschland entsprechend den Umweltproduktdeklarationen der einzelnen Betongüten bereits um ca. 10–20 % unterhalb des Branchenreferenzwerts des CSC liegt. Die tatsächlichen Einsparungen müssen demnach bauteilbezogen ausgehend von der jeweiligen Zementsorte, die für das Bauteil üblicherweise verwendet worden wäre, ermittelt werden. Die unterschiedlich definierten Level gemäß CO₂-Modul sind regional unterschiedlich verfügbar. Die Verfügbarkeit kann während der Planung auf der Website des CSC überprüft werden. Entsprechend den definierten Reduktionsleveln werden Einsparungen von 30–60 % gegenüber dem im Handbuch gegebenen Branchenreferenzwert erreicht. Die Werte sind in Tab. 4 beschrieben und den Werten aus den aktuellen Umweltproduktdeklarationen der jeweiligen Betongüten gegenübergestellt.

Die Reduktion wird in der Regel durch den Einsatz von CO₂-reduzierten Zementarten im Zusammenspiel mit der Wahl der Energieträger erreicht.

4.3 Verwertung von RC-Betonsand/Sekundärbindemittel

Das Beispiel des Recyclingbetons bzw. die Verwendung von mineralischen Abbruchmaterialien als Schottertragsschichten im Unterbau von Straßen oder Gründungen zeigt eine vorbildliche Ressourcenschonung, sofern sie konsequent durchgeführt wird. Jedoch kann bisher normativ der Feinkornanteil, der beim Zerkleinern des Betons entsteht, nur im stark eingeschränkten Maß als Zuschlag für Beton wiederverwertet werden. Zudem bleiben die prozessbedingten Emissionen bei der Herstellung des Zementes zumindest im Beispiel des Recyclingbetons weiterhin bestehen und unvermeidbar. Aktuelle Forschungen zeigen [16], dass durch eine thermische Reaktivierung des Zementsteins die hydraulischen Eigenschaften des ursprünglichen Zementes wiederhergestellt werden können. Die thermische Reaktivierung geschieht dabei bei deutlich geringeren Temperaturen als die Zementherstellung selbst und verursacht hierdurch weniger Emissionen. Die Entsäuerung des Kalksteins ist zudem bereits bei der ursprünglichen Herstellung des Zementes geschehen; bei der Reaktivierung fallen deshalb keine weiteren prozessbedingten Emissionen an. Diese Art der Wiederverwertung weist eine Möglichkeit der sehr effek-

tiven Emissionsreduktion beim Betonbau auf. Immerhin lassen sich die prozessbedingten Emissionen bei der Zementherstellung mit 59 % bezogen auf die Gesamtemissionen der Zementherstellung beziffern. Bezogen auf den m³ Beton entspricht dies durchschnittlich 42 % der Emissionen zur Herstellung eines m³ Beton.

Bei weiteren Versuchen konnte beim Austausch von 20–33 Masse-% des Zementes durch Sekundärbindemittel eine Verbesserung der Verarbeitbarkeit, jedoch auch ein Einfluss auf die Festigkeit festgestellt werden [16]. Gemessen an den maximalen prozentualen Substitutionen von 33 Masse-% des Zementes könnten mit diesem Verfahren ca. 20 % der Herstellungsemissionen von 1 m³ Beton vermieden werden. Grundsätzlich führt die Verwertung auch der feinen Sandfraktionen zur Einsparung von Deponieraum und zur Schonung von natürlichen Ressourcen. Aktuell gibt es jedoch noch keine sicheren Prozessketten für den Einsatz solcher Sandfraktionen. Abbruchmaterialien fallen in unregelmäßigen Abständen und unterschiedlichen Mengen, Zusammensetzungen und Qualitäten an, sodass keine konsequente alleinige Umsetzung mit Sekundärbindemitteln möglich ist. Grundsätzlich gilt natürlich auch hier, dass ein Bestandserhalt dem Abbruch und der Reaktivierung generell vorzuziehen ist, denn so können deutlich mehr Arbeitsschritte und Emissionen vermieden werden. Falls ein Abbruch aber nicht zu vermeiden ist, stellt die Reaktivierung eine interessante Methode zur Emissionsminimierung dar.

5 Fazit

Planer:innen haben bereits jetzt verschiedene, gut wirksame Stellschrauben zur Reduktion der Emissionen, die mit einem Bauvorhaben verbunden sind. Besonders beim Material Beton muss differenziert werden zwischen einzelnen Anwendungsbereichen und Funktionen der Bauteile, um die jeweils optimale Betonrezeptur zu finden, die einen möglichst geringen CO₂-Wert ermöglicht. Regionale Randbedingungen und Verfügbarkeiten müssen künftig stärker in der Planung berücksichtigt werden. Radikale Masseneinsparungen besonders in Deckensystemen können neben den hier vorgestellten Methoden des Gradientenbetons mit weiteren bekannten zur Verfügung stehenden Systemen wie beispielsweise Rippen- oder Kas-

Tab. 5 Einsparpotenziale
Savings potential

Maßnahme	Einsparpotenzial CO ₂ -Äquivalent/Einheit	Einheit
Tragwerkssystemoptimierung	ca. 20 %	Tragstruktur des Gebäudes
Bestandstransformation	min. 40 %	Gebäude
Bauteilwiederverwendung	ca. 50 %	m ²
Wände ohne Bewehrung	ca. 30 %	m ²
Wahl der Betonrezeptur	max. 50 % (abhängig von technischen Grenzen der Bauausführung)	m ³
Sekundärbindemittel	max. 20 %	m ³

setzendecken sofort umgesetzt werden. Die alternativen Systeme bedürfen einer erneuten weiterführenden Betrachtung. Eine Orientierung an ressourcenschonenden Konstruktionen in Bestandsgebäuden ist unter Einbezug der heute geltenden Vorschriften sinnvoll. Zusammenfassend ergeben sich durch die im Beitrag beschriebenen Maßnahmen verschiedene Emissionseinsparpotenziale, Tab. 5.

Aufgrund der geltenden Randbedingungen können nicht alle Maßnahmen beliebig und in vollem Umfang miteinander kombiniert werden; z. T. hängen sie auch vom Vorhandensein eines Bestandsobjekts ab. Allgemein können Maßnahmen auf der Bauteilebene aber sehr gut mit Maßnahmen auf der Materialebene verbunden werden. Die Optimierung des Tragsystems ist wichtige Voraussetzung für ein materialgerechtes Bauen. Sie kann und sollte immer und unabhängig von anderen Faktoren angestrebt werden. Insgesamt erfordern die Maßnahmen ein Höchstmaß an Ingenieurverständnis sowie die enge Zusammenarbeit mit und die frühzeitige Einbindung von weiteren Fachplanern. Angaben zur Betonrezeptur müssen zum Beispiel bereits vor der Ausschreibung mit Betontechno-

logen abgestimmt werden. Ebenso müssen die Möglichkeiten zur Rückbaubarkeit von Verbindungsmitteln im Betonfertigteiltbau mit den Herstellern im spezifischen Fall bereits in den frühen Leistungsphasen diskutiert werden.

Viele der hier vorgestellten Maßnahmen können bereits heute ohne größeren finanziellen oder technischen Aufwand umgesetzt werden. Dies ermöglicht Emissionseinsparungen von bis zu 25 % bezogen auf die Gesamtherstellungsemissionen der Tragstruktur eines Gebäudes, ohne dass unsere Art des Bauens hierfür grundlegend verändert werden müsste. Dennoch reichen diese Maßnahmen allein nicht aus, um die im Pariser Klimaschutzabkommen verankerten Klimaziele zu erreichen. Weitere innovative Materialentwicklungen und unter Umständen auch CO₂-Auffangtechnologien direkt am Erzeugungsort sind notwendig, um die Emissionen der gebauten Umwelt auf das erforderliche Maß zu reduzieren. Hieran sollten wir alle in den kommenden Jahren mit allen uns zur Verfügung stehenden Kräften arbeiten – sei es als Planende oder als Bauherren, Gesetzgeber oder ausführende Unternehmen.

Literatur

- [1] Sobek, W. (2023) *non nobis II – Über die Randbedingungen des Zukünftigen*. Unveröffentlichte Vorabversion.
- [2] Weidner, S. (2020) *Grundlagen für die Planung von ressourcenminimalen urbanen Strukturen* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [3] Bechmann, R. (2022) *Emissionen und Ressourcenverbrauch – Welche Minimierungsmöglichkeiten gibt es im Projektverlauf?* nbau 1, H. 3, S. 41–45.
- [4] Werner Sobek AG (2023) *The Q: Massive Emissionseinsparungen durch Revitalisierung statt Neubau* [online]. <https://www.wernersobek.com./de/projekte/the-q> [Zugriff am: 24.02.2023]
- [5] Werner Sobek AG (2021) *Bestehendes erhalten, Neues erschaffen* [online]. <https://www.wernersobek.com./de/projekte/althan-quartier> [Zugriff am: 24. Feb. 2023]
- [6] Glückert, B. (2023) *Ressourceneinsparung im Bauwesen*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 5, S. 361–372. <https://doi.org/10.1002/best.202300027>
- [7] Yrjölä, J.; Wanjala, P. (2022) *Peikko White Paper – Dismount and reuse of precast concrete frame* [online]. www.peikko.com [Zugriff am: 23.02.2023]
- [8] Umweltproduktdeklaration (2020) *Spannbeton-Fertigteildecken DW Systembau GmbH*. Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU).
- [9] DIN EN 1992-1-1 (2021) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [10] ÖKOBAUDAT (2021) *Prozess-Datensatz: Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30* [online]. Bestandteil der ÖKOBAUDAT Version 2021-II. [Zugriff am: 13.02.2023]
- [11] ÖKOBAUDAT (2021) *Prozess-Datensatz: Bewehrungsstahl* [online]. Bestandteil der ÖKOBAUDAT Version 2021-II. [Zugriff am: 13.02.2023]
- [12] Schmeer, D.; Sobek, W. (2019) *Gradientenbeton* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2019, Teil 1*. Berlin: Ernst & Sohn. S. 455–476.
- [13] Sobek, W.; Schmeer, D. (2023) *Gradientenbeton 2.0 – Ressourcenoptimierung durch Kombination von Hohlkörperbauweise und Trajektorienbewehrung*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 5. S. 303-309. <https://doi.org/10.1002/best.202300033>

- [14] Weidner, S.; Mrzigod, A.; Bechmann, R.; Sobek, W. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- [15] Bundesverband Transportbeton [Hrsg.] (2022) *Technisches Handbuch – CO₂-Modul*. Bundesverband Transportbeton, Stand 10.01.2022.
- [16] Schnell, A.; Müller, A. (2001) *Verwertungsmöglichkeiten für die Sandfraktion von Recyclingbaustoffen aus Beton*. München: GRIN Verlag.

Autor:innen



Dr.-Ing. Stefanie Weidner (Korrespondenzautorin)
stefanie.weidner@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart



Dipl.-Ing. Alexandra Mrzigod
alexandra.mrzigod@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart



Dipl.-Ing. Roland Bechmann
roland.bechmann@wernersobek.com
Werner Sobek AG
Albstraße 14
70597 Stuttgart

Zitieren Sie diesen Beitrag

Weidner, S.; Bechmann, R.; Mrzigod, A. (2023) *Emissionsarmes Bauen mit Beton: Perspektiven und Handlungskorridore*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 5, S. 332–340.
<https://doi.org/10.1002/best.202300023>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.
Eingereicht: 24. Februar 2023; angenommen: 7. März 2023.