



WHITE PAPER

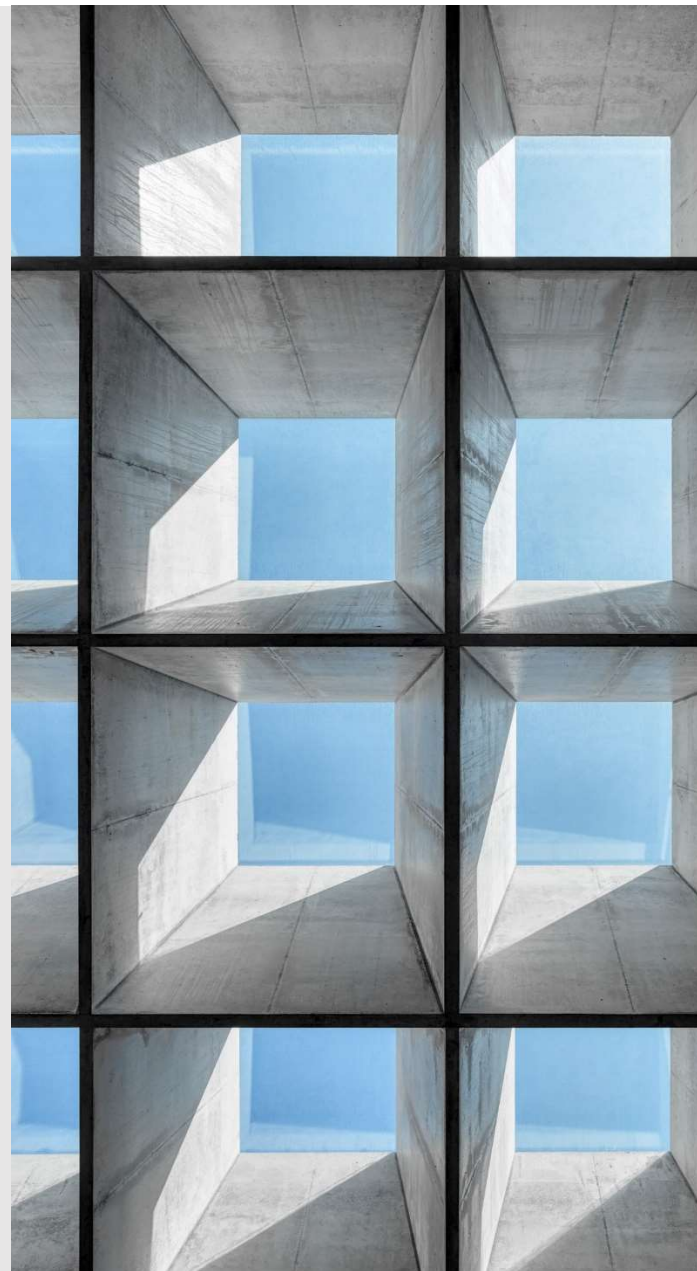
BETONSUISSE

Ökologisch nachhaltige Geschossdecken

Autor: Prof. Dr. Walter Kaufmann, ETH Zürich

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	S. 3
2. Ausgangslage	S. 4
3. Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit von Tragwerken	S. 5
4. Direkte Einflussfaktoren auf die ökologische Nachhaltigkeit eines Tragwerks	S. 5
5. Indirekte Einflüsse des Tragwerks auf die ökologische Nachhaltigkeit von Gebäuden	S.13
6. Nutzungsdauer Tragwerk	S.14
7. Zusammenfassung und Schlussfolgerung	S. 15
8. Ausblick	S. 16
9. Literatur	S. 17



Dieses White Paper wurde speziell für Betonsuisse erstellt und lädt dazu ein, die Tragwerksplanung nicht isoliert, sondern als integralen Bestandteil einer umfassenden Betrachtung der Nachhaltigkeit eines Gebäudes zu verstehen.

Zürich, November 2024



Ökologisch nachhaltige Geschossdecken

1. Einleitung

Angesichts des Klimawandels, der gleichzeitigen Ressourcenverknappung sowie der zunehmenden Anforderungen und Lenkungsmaßnahmen zur Reduktion negativer Umwelteinflüsse ist unbestritten, dass der Baubereich seine CO₂-Emissionen, seinen Ressourcenverbrauch und seine Abfallproduktion drastisch reduzieren und sich hin zu einer nachhaltigeren und, wo sinnvoll, zirkulären Industrie entwickeln muss.

Allen an der Planung beteiligten Akteuren (Bauträgerschaften, ArchitektInnen, IngenieurInnen, FachplanerInnen, Bauunternehmungen) kommt dabei ein grosses Wirkungspotential und gleichzeitig eine hohe Verantwortung zu. Gelingt es beispielsweise IngenieurInnen in der Planung, die Emissionen ihrer Bauwerke nur schon um 20% zu senken, so ist ihr Beitrag zur Reduktion des ökologischen Fussabdrucks um ein Vielfaches höher als derjenige anderer Personen (Abb. 1, Seite 4, rechts) [1]. Gemäss einer Studie der Institution of Structural Engineers [1] besteht das grösste Potential für die Einsparung an Emissionen und Ressourcen in frühen Projektphasen (Abb. 1, Seite 4, links). Oberstes Gebot ist dabei – auch wenn dieser Beitrag auf den Neubau fokussiert – die Vermeidung zw. Minimierung baulicher Massnahmen durch den konsequenten Erhalt der bestehenden

Bausubstanz. Wo notwendig, soll diese instandgesetzt und ertüchtigt werden, und wo möglich Bestandsbauten umgenutzt werden. Wird ein Bauwerk neu erstellt oder erweitert, können die Umwelteinflüsse mit einem ressourcenschonenden konzeptionellen Entwurf, der Wahl effizienter Tragstrukturen sowie mit einer klugen Materialwahl minimiert und die Lebensdauer des Tragwerks maximiert werden.

Das grösste Potenzial liegt hier in den Geschossdecken, da diese bei einem typischen Gebäude in Massivbauweise rund die Hälfte des Betonvolumens und etwa 30% des gesamten Baustoffverbrauchs ausmachen [2]. Daran wird sich in Zukunft weltweit wenig ändern, gehen aktuelle Prognosen doch davon aus, dass sich die Geschossfläche weltweit bis 2050 um etwa 80% anwachsen wird [3]. Andererseits ist die Beurteilung der Nachhaltigkeit von Geschossdecken besonders anspruchsvoll, da sie in den meisten Fällen nicht nur als Tragwerk dienen, sondern viele weitere Funktionen übernehmen müssen. Daher fokussiert dieser Beitrag auf die ganzheitliche Beurteilung der Nachhaltigkeit von Geschossdecken. Der Einfachheit halber wird diese ausschliesslich anhand der Treibhausgasemissionen erörtert.

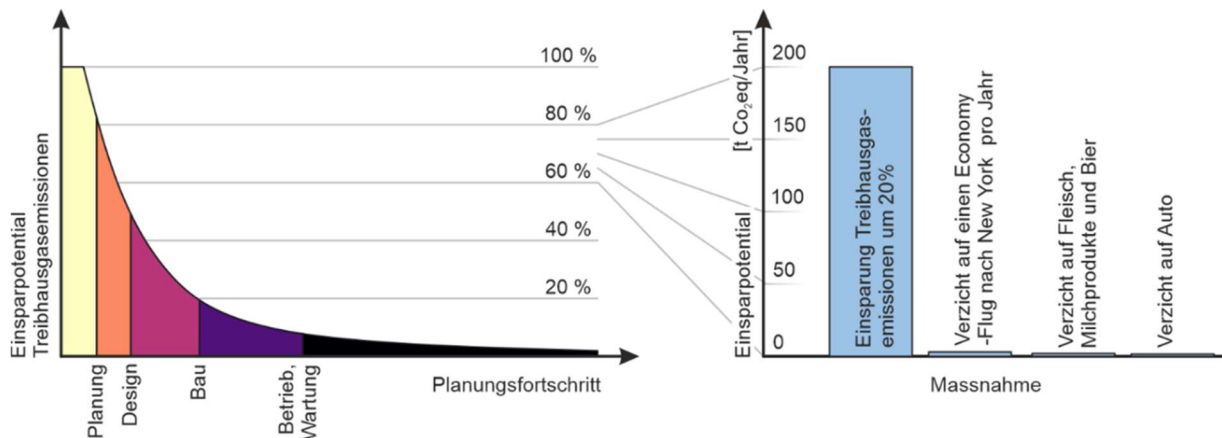


Abb. 1 Potential zur Einsparung von Treibhausgasemissionen im Bauwesen aufgeteilt nach Projektierungsphasen (links). Verschiedene Massnahmen und ihr jeweiliges Einsparpotential hinsichtlich Treibhausgasemissionen, gerechnet pro Tragwerksplanende (rechts) (Angepasst von [1]).

2. Ausgangslage

Um die Nachhaltigkeit eines Tragwerks zutreffend zu beurteilen und verschiedene Konstruktionsarten und Bauweisen zu vergleichen, ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. Obwohl ökologische Aspekte zunehmend wichtig sind, kann die wirtschaftliche Nachhaltigkeit nicht ausser Acht gelassen werden. Insbesondere werden private Investoren nur dann ökologisch nachhaltigere Projekte in grossem Massstab umsetzen, wenn sich daraus auch ein wirtschaftlicher Nutzen ergibt. Da eine ökologisch nachhaltige Bauweise in der Regel höhere Kosten verursacht, muss der damit verbundene Mehrwert – höhere Miet- oder Verkaufserträge, eingesparte CO₂-Kompensationsabgaben, etc. – diese Kosten aufwiegen. Auch die öffentliche Hand kann nicht beliebig hohe Mehrkosten zu Gunsten der ökologischen Nachhaltigkeit in Kauf nehmen.

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich auf den Teilaspekt der ökologischen Nachhaltigkeit. Selbst diese isolierte Betrachtung ist relativ komplex, zumal heute weitgehend die Grundlagen und Tools fehlen, um verschiedene Handlungsoptionen und konzeptionelle Tragwerksvarianten hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit ganzheitlich zutreffend, faktenbasiert und effizient vergleichen zu können. Daher wird die Diskussion zur ökologischen Nachhaltigkeit im Bau heute oftmals auf die

Materialisierungsebene beschränkt. Nicht nur Politiker oder Laien, sondern auch Fachleute vergleichen in vielen Fällen lediglich CO₂-Äquivalenzwerte von Baustoffen (Treibhausgasemissionen in äquivalenten kg CO₂ pro kg Baustoff); oft werden diese durch Multiplikation mit der Dichte auf das Baustoffvolumen bezogen (kg CO₂ pro m³ Baustoff), was für "leichte" Baustoffe wie Holz gegenüber schweren Materialien wie Stahl vorteilhaftere Werte ergibt (und tatsächlich sinnvoller ist, siehe Abschnitt 4.2). Auch in der Forschung liegt der Schwerpunkt auf der Reduktion der Emissionen etablierter Baustoffe und der Entwicklung neuer emissionsarmer Materialien. In der Tat hat insbesondere die Zement- und Betonindustrie diesbezüglich bereits einiges erreicht. Beispielsweise sind die Emissionen des durchschnittlichen in der Schweiz eingesetzten Zements heute, namentlich dank dem Einsatz alternativer Brennstoffe in der Klinkerproduktion und der Reduktion des Klinkergehalts in handelsüblichen Zementen, schon viel geringer als für einen klassischen, mit fossilen Brennstoffen produzierten reinen Portlandzement. Auch sind bereits Zemente mit nochmals deutlich geringeren Emissionen auf dem Markt verfügbar, und gemäss der Roadmap des cembureau [4] soll Zement bis 2050 sogar zur CO₂-Senke werden.

Dafür sind aber grosse Investitionen erforderlich, vor allem in der Zementproduktion zur Reduktion der Treibhausgasemissionen resp. deren Abscheidung und permanenter Speicherung (z. B.

Carbon Capture and Storage Pilotprojekte von Holcim [5]).

Zwar kann die Technologie bereits erste Erfolge (z. B. neustark [6], climateworks [7]) aufweisen, aber bis diese skaliert und weltweit umgesetzt ist, wird es noch Jahrzehnte dauern.

Eine Beurteilung der Nachhaltigkeit alleine auf Basis der Baustoffe oder deren CO₂-Äquivalenzwerten, bei denen zudem meist vernachlässigt wird, dass die Emissionen für den gleichen Baustoff aufgrund der unterschiedlichen Produktionsbedingungen einer starken Streuung unterliegen, kann die Komplexität nicht ansatzweise wiedergeben. Zum Beispiel betragen die Verhältnisse der massenbezogenen CO₂-Äquivalenzwerte von Baustahl: Stahlbeton: Brettschichtholz rund 6:1:3, d.h. eine Tonne Stahl verursacht sechsmal höhere Treibhausgasemissionen als eine Tonne Stahlbeton (mit einem Bewehrungsgehalt von ca. 100 kg/m³), die andererseits nur einen Drittel derjenigen einer Tonne Brettschichtholz bewirkt. Bezogen auf das Volumen schneidet Holz wegen seiner geringeren Dichte deutlich besser ab als Beton, Stahl hingegen nochmals deutlich schlechter; das Verhältnis der Emissionen pro Volumen beträgt rund 19:1:0.5.

Aufgrund der höheren Steifigkeit und Festigkeit des Baustahls und der Bewehrung im Stahlbeton (siehe Abschnitt 4.2) und der Bauweisen spezifisch unterschiedlichen Bauteilgeometrie (Beton-Rechteckquerschnitt resp. Brettschichtholzträger vs. Profilierter Stahlträger, siehe Abschnitt 4.3) verursacht jedoch beispielsweise ein IPE-Stahl-

profilträger, mit den typischen Belastungen und Anforderungen im Hochbau, bei einer Spannweite von 12 m, nur etwa 15% höhere Emissionen als ein analoger Träger aus Stahlbeton, und der Brettschichtholzträger ist lediglich etwa 30% emissionsärmer als der Stahlbetonträger (Verhältnisse 1.17:1:0.68).

Werden beim Stahlträger die spezifischen Emissionskennwerte von einem mit 100% Wasserkraft aus rezykliertem Schrott hergestellten Träger eingesetzt, verursacht er sogar die geringsten Emissionen der drei Varianten (0.66:1:0.68).

Andererseits verursacht der Stahlbetonträger bei Verwendung von klinkerarmem Zement (CEM III/B) kleinere Emissionen als der Brettschichtholzträger (1.96:1:1.15). Dieses einfache Beispiel (mit Kennwerten gemäss KBOB Ökobilanzdaten im Baubereich [8] und den von der KBOB empfohlenen Betonsorten- [9] und Holzsortenrechnern [10]) zeigt, dass es sinnlos oder gar irreführend ist, die ökologische Nachhaltigkeit lediglich anhand der CO₂-Äquivalenzwerte der Baustoffe zu vergleichen. Für eine Optimierung der ökologischen Nachhaltigkeit von Geschossdecken sind diese Werte allein somit ebenfalls ungeeignet.

In diesem Beitrag soll daher aufgezeigt werden, wie die ökologische Nachhaltigkeit eines Tragwerks ganzheitlich beurteilt werden kann. Dazu werden die relevanten Einflussgrössen identifiziert und ihr Einfluss wird erörtert. Auf dieser Grundlage können schliesslich Empfehlungen für den konzeptionellen Entwurf ökologisch nachhaltiger Geschossdecken abgegeben werden.

$$\underbrace{\frac{\text{Emissionen pro Nutzung } U \text{ und Zeit } T}{U \cdot T_{\text{service}}}}_E = \frac{\left(\underbrace{\text{(i) Emissionen pro Masse}}_{\text{CO}_2\text{-eq}} \cdot \underbrace{\text{(ii) Masse pro Geschossfläche}}_{\frac{M}{A_{\text{floor}}}} \pm \underbrace{\text{(iii) Indirekter Einfluss des Tragwerks pro m}^2}_{E_{\text{ind}}} \right) \cdot \underbrace{\text{(iv) Geschossfläche pro Nutzung}}_{\frac{A_{\text{floor}}}{U}}}{\underbrace{T_{\text{service}}}_{\text{(v) Nutzungsdauer}}}$$

Gleichung 1

3. Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit von Tragwerken

Für eine fundierte Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit eines Tragwerks sind neben den Emissionen der Baustoffe die weiteren direkten und indirekten Einflüsse zu berücksichtigen, welche die Umweltauswirkungen eines Bauwerks beeinflussen. Diese sind in Gl. (1) konzeptionell am Beispiel von Geschossdecken dargestellt (Gleichung nach [11] und [12], erweitert um Term "indirekter Einfluss des Tragwerks"):

Wie die Faktoren im Zähler (resp. die erläuternden Beschreibungen oberhalb der Terme) aufzeigen, lassen sich die massgebenden Emissionen E reduzieren, indem (i) die Emissionen pro Masse gesenkt werden, z.B. durch den Einsatz emissionsarmer Baumaterialien mit niedrigem CO₂-Äquivalenzwert, (ii) weniger Baumaterial pro Nutzfläche eingesetzt wird, z.B. durch die Planung effizienter Tragwerke, und (iv) eine geringere Nutzfläche für die geplante Nutzung angesetzt wird, d.h. durch eine Reduktion des Komfortanspruchs. Auf die ersten beiden dieser *direkten Einflussfaktoren* wird nachfolgend vertieft eingegangen. Auf eine Diskussion einer Reduktion des Komfortanspruchs wird an dieser Stelle hingegen verzichtet, da dieser Faktor durch die Tragwerksplanenden kaum beeinflusst werden kann.

Neben den direkten Einflussfaktoren müssen für eine ganzheitliche Beurteilung zusätzlich auch indirekte Einflüsse (iii) des Tragwerks auf andere Bauwerksteile berücksichtigt werden. Beispiele dafür sind die negativen Auswirkungen von Tragwerken mit grösserer Konstruktionshöhe oder aber der positive Einfluss leichterer Konstruktionen und insbesondere der Vorteil von Bauweisen, die neben ihrer Funktion als Tragwerk weitere Anforderungen an das Bauwerk als Ganzes erfüllen.

Auch die Wiederverwendbarkeit von Tragwerksbestandteilen nach der Nutzungsdauer kann in diesem Term erfasst werden. Diese indirekten Einflüsse werden im Folgenden ebenfalls erörtert.

Schliesslich (v) ist im Nenner die Nutzungsdauer zu berücksichtigen: Eine längere Nutzungsdauer reduziert die massgebenden jährlichen Emissionen. Einige allgemeine Überlegungen zur Nutzungsdauer finden sich am Ende dieses Beitrags.

4. Direkte Einflussfaktoren auf die ökologische Nachhaltigkeit eines Tragwerks

4.1. Allgemein

Gl. (1) vermag zwar die Einflüsse auf die Nachhaltigkeit eines Tragwerks schematisch aufzuzeigen. Sie ist jedoch nur bedingt geeignet, die direkten Einflussfaktoren auf die ökologische Nachhaltigkeit eines Tragwerks vertieft zu analysieren. Um hier ein besseres Verständnis zu ermöglichen, wird in der Folge der blau markierte Term (ii) im Zähler von Gl. (1) – die Masse pro Geschossfläche M/A_{floor} – aufgeteilt, so dass der Einfluss der Baustoffe, der Querschnittswahl und des Tragsystems separiert werden. Gl. (2) zeigt diese Aufteilung für eine Geschossdecke; die übrigen Terme von Gl. (1) bleiben dabei unverändert:

$$\frac{E}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{(i) Emissionen pro Masse} \\ \text{CO}_2\text{-eq} \end{array} \cdot \underbrace{\left\{ \frac{\rho}{f_{k,mat}, E_{mat}} \right\}}_{\text{(iia) Leistung Baustoff: Materialkennwerte bezogen auf Dichte}} \cdot \underbrace{\left\{ \frac{t_m}{W, I} \right\}}_{\text{(iib) Querschnittseffizienz: QS-Werte pro m Breite bezogen auf mittlere Dicke}} \cdot \underbrace{\left\{ \frac{\alpha_m \cdot I^2, \alpha_w \cdot I^4}{W_{adm}} \right\}}_{\text{(iic) Effizienz Tragsystem: Biegemoment, Durchbiegung (bez. w_{adm}) unter Einheitslast}} \cdot \underbrace{(\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k)}_{\text{(iiv) Belastung: Nutzlast q Eigenlast g}} \pm \underbrace{E_{ind}}_{\text{(iii) Indirekter Einfluss des Tragwerks pro m}^2} \right) \cdot \underbrace{\frac{A_{floor}}{U}}_{\text{(iv) Geschossfläche pro Nutzung}}}{T_{\text{service}}}$$

(einfeldrige, in eine Richtung tragende Platte: $\alpha_m = 1/8$, $\alpha_w = 5/384$)

Die Faktoren sind wiederum oberhalb der Terme beschrieben (Terme (iia) und (iib) textlich als Kehrwerte), so dass die in den folgenden Abschnitten diskutierten Einflüsse und Zusammenhänge auch ohne detailliertes Studium der Gleichung ersichtlich sind: Die pro Geschossfläche erforderliche Masse M/A_{floor} (ii) hängt von der Leistung des Baustoffs (iia), der Effizienz des Querschnitts (iib) und des Tragsystems (iic) sowie der Höhe der Lasten (iid) ab. Wer mit der Baustatik vertraut ist, wird zudem erkennen, dass das Produkt der vier Faktoren (iia)...(iid) dem Verhältnis M_d/M_{Rd} (wobei $M_d = \alpha_m (\gamma_q q_k + \gamma_g g_k) l^2$ und $M_{Rd} = W f_{k,mat} / \gamma_{mat}$) resp. w/w_{adm} ($w = \alpha_w (\gamma_q q_k + \gamma_g g_k) l^4 / E_{mat} I$) entspricht, jeweils multipliziert mit der Masse pro Geschossfläche $\square \cdot t_m$. Unter der Voraussetzung, dass das Tragwerk statisch voll ausgenutzt ist, d.h. entweder der Biegewiderstand M_{Rd} ausgeschöpft (Verhältnis $M_d/M_{Rd} = 1$) oder die zulässige Durchbiegung w_{adm} gerade erreicht (Verhältnis $w/w_{adm} = 1$), resultiert damit – analog zum Term (ii) in Gl. (1) – die Masse pro Geschossfläche $M/A_{\text{floor}} \square \square \cdot t_m$, d.h. die beiden Gleichungen stimmen überein. Andernfalls liegt eine Überbemessung vor, auf die nachfolgend ebenfalls eingegangen wird.

Die mechanische Bedeutung der einzelnen Terme sowie die Bezeichnungen in Gl. (2) werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

4.2. Einfluss des Baustoffs

Wie erwähnt ist die alleinige Betrachtung der CO₂-Äquivalenzwerte der Baustoffe, also des Terms (i) im Zähler von Gl. (2), zum Vergleich verschiedener Baustoffe nicht zielführend. Ein aussagekräftiger Vergleich auf Baustoffebene ist hingegen möglich, wenn die Emissionen der Materialien bezogen auf die Leistung beurteilt werden. Dies entspricht dem Produkt der ersten beiden Terme (i) und (iia) im Zähler von Gl. (2). Die Leistung des Baustoffs wird dabei je nach Fragestellung entweder durch den Bemessungswert der Festigkeit $f_{k,mat} / \square_{mat}$ [MPa] (charakteristischer Wert, mit Teilsicherheitsbeiwert \square_{mat} abgemindert) oder die mittlere Steifigkeit E_{mat} [MPa] (je nach Lastdauer unter Berücksichtigung von Kriechverformungen) des Baustoffs erfasst, die jeweils auf die Dichte [kg/m³] bezogen werden. Nicht direkt berücksich-

tigt wird in der Gleichung die Duktilität, die insbesondere bei Bauten wie Hochhäusern, bei denen Robustheit und Redundanz von zentraler Bedeutung sind, relevant ist. Diese könnte in Gl. (2) in Term (iii) als indirekter Einfluss E_{ind} berücksichtigt werden.

Der Kehrwert dieses Produkts der Faktoren (i) und (iia), mit den Einheiten [MN·m/kg], entspricht dem Widerstand resp. der Steifigkeit eines Zug- oder Druckglieds mit Einheitslänge pro emittierter Menge an Treibhausgas. Die auf die Treibhausgasemissionen bezogenen Leistungen verschiedener Baustoffe können somit sehr anschaulich anhand der Last-Verformungsdiagramme von Zug- oder Druckgliedern aus dem jeweiligen Baustoff verglichen werden. Diese erfassen nicht nur die Festigkeit und die Steifigkeit, sondern zeigen auch die Duktilität auf. Abb. 2 illustriert dies für Zug- und Druckglieder gleicher Länge (1 m) mit identischen Treibhausgasemissionen (100 kg CO₂eq) unter kurzzeitigen Belastungen. Als Eingabeparameter wurde dabei pro Baustoff jeweils ein niedriger und ein eher hoher CO₂-Äquivalenzwert eingesetzt, um den grossen Einfluss dieser Variation aufzuzeigen: Die Variation pro Baustoff ist in der gleichen Grössenordnung wie der Unterschied zwischen verschiedenen Bauweisen. Dies ist insofern problematisch, als die CO₂-Äquivalenzwerte der tatsächlich verbauten Materialien bei der Konzeption des Tragwerks meist unbekannt sind und erst im Zuge der Bauausführung feststehen.

Der Vergleich der verschiedenen Baustoffe ergibt, dass Zugglieder aus nacktem Betonstahl bei gleichen CO₂-Emissionen den höchsten Zugwiderstand aufweisen, also bei ausschliesslicher Betrachtung des Widerstands ökologisch am nachhaltigsten wären, gefolgt von Stahlbetonzuggliedern mit einem hohen Bewehrungsgehalt. Diese hohe Festigkeit kann aber bei baupraktischen Anwendungen meist nicht voll ausgenutzt werden, da die Verformungen zu gross werden, also statt der Festigkeit die Steifigkeit massgebend wird (siehe auch Abschnitt 4.6). Letzteres trifft auch für das betrachtete Zugglied aus Brettschichtholz zu, das zudem spröde versagt. Vorgespannte Betonzugglieder sind im Vergleich dazu wesentlich steifer und haben trotzdem einen verhältnismässig hohen Zugwiderstand. Sie stellen daher in vielen Fällen die ökologisch nachhaltigste Lösung dar.



Dies aber nur, wenn nicht mehr Material verbaut wird, als statisch erforderlich ist; diese Annahme ist implizit in den Last-Verformungskurven enthalten.

Auf viele der in den letzten Jahrzehnten erstellten Betonbauten trifft sie aber nicht zu: Während materialeffiziente Betonbauten bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts in der Regel am wirtschaftlichsten waren (u.a. wurden die meisten Brücken von Robert Maillart realisiert, weil er den tiefsten Preis anbot), stiegen im Lauf der Zeit die Lohnkosten viel stärker als die Materialkosten, so dass heute geometrisch einfache Tragwerke (beispielsweise Geschossdecken mit konstanter Dicke) am wirtschaftlichsten sind, selbst wenn sie mehr als das Doppelte des eigentlich notwendigen Materials verbrauchen. Ebenso werden oft statisch nicht erforderliche, dicke Decken ausgeführt, da damit Schallschutzanforderungen (siehe Abschnitt 5.3) erfüllt oder Haustechnikleitungen in die Decke integriert werden können. Bei solchen Bauteilen müssten die Last-Verformungskurven in Abb. 2 bezüglich der Abszisse um 50 oder mehr Prozent skaliert werden, womit andere Bauweisen im Vergleich nachhaltiger werden.

Für Druckbeanspruchung zeigt Abb. 2 auf, dass Stahlbeton mit Abstand am ökologisch nachhaltigsten ist. Wiederum trifft dies aber nur dann zu, wenn nicht wesentlich mehr Material eingesetzt wird, als statisch erforderlich ist.

Nebenbei sei erwähnt, dass eine analoge Betrachtung wie für die Emissionen auch in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit möglich ist, indem anstelle der CO₂-Äquivalenzwerte die Materialkosten (CHF/kg Baustoff) eingesetzt werden, je nach Bedarf mit oder ohne übliche Arbeitskosten. Solche Diagramme (Last-Verformungsverhalten eines 1 m langen Zugglieds für 100 CHF) wurden von Prof. em. Dr. Peter Marti bereits vor rund 30 Jahren verwendet, um die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit verschiedener Bauweisen zu vergleichen. In solchen Vergleichen sind Stahlbetontragwerke den anderen Bauweisen insbesondere hinsichtlich

der Kombination von Steifigkeit und Festigkeit klar überlegen. Betonbauten, die effizient hergestellt werden können, aber viel mehr Material verbrauchen als statisch nötig (siehe oben), sind daher nicht nur wirtschaftlicher als materialeffiziente Betonbauten, sondern in den meisten Fällen auch billiger als optimierte Tragwerke in anderen Bauweisen.

Vergleicht man aber statt der Kosten die ökologische Nachhaltigkeit, wird der wirtschaftliche Vorteil der Betonbauweise zum Bumerang: Die heute wegen ihrer tiefen Kosten etablierten, materialintensiven Betonkonstruktionen - insbesondere übermässig dicke massive Geschossdecken - verursachen höhere Emissionen als materialeffiziente Konstruktionen in anderen Bauweisen und geraten somit zunehmend in Verruf. Aus Sicht der Betonindustrie ist daher eine Rückkehr zu materialeffizienten Betonbauten ein Gebot der Stunde. Dies ist z. B. mit effizienten Schalungs- und Bewehrungslösungen für Rippen- und Kassettendecken mit geringen Mehrkosten möglich; solche Lösungen sind im Vergleich mit anderen Bauweisen wirtschaftlich immer noch konkurrenzfähig.

Es braucht dazu aber auch ArchitektInnen und NutzerInnen, die bereit sind, sich vom gewohnten Bild der glatten Sichtbetonunterseite zu verabschieden und strukturiertere Grundrisse zu entwerfen bzw. in diesen zu leben, HaustechnikplanerInnen, die auf das Prinzip der Systemtrennung zurückgreifen statt alle Leitungen in einer dicken Geschossdecke einzubetonieren und Bauherrschaften, die bereit sind, den damit verbundenen Mehraufwand beziehungsweise den in die frühen Planungsphasen verschobenen Aufwand zu honorieren. Zudem ist zu beachten, dass die erforderlichen, aufwändigeren Schalungen nicht wesentlich mehr Treibhausgasemissionen verursachen oder Abfall generieren dürfen als Flachdeckenschalungen, damit das Gesamtsystem tatsächlich ökologische nachhaltig ist.

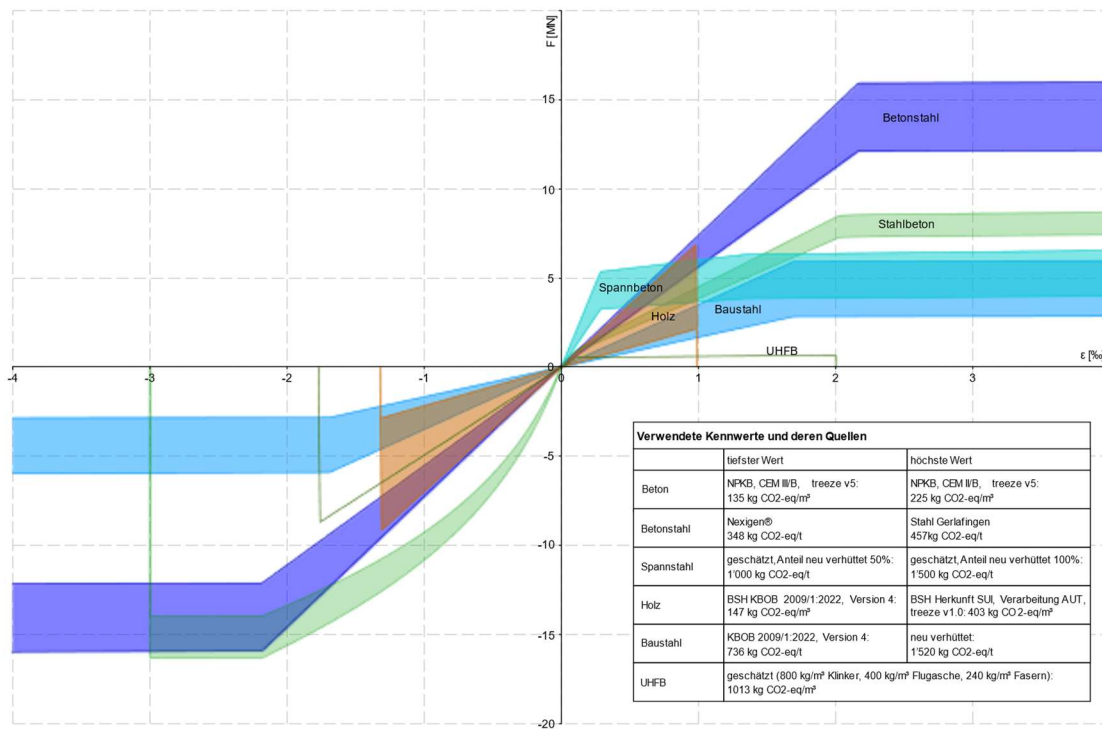


Abb. 2 Last-Verformungsverhalten von Zug- resp. Druckgliedern aus verschiedenen Baustoffen mit gleicher Länge und gleich hohen Treibhausgasemissionen (Vorspanngrad Spannstahl $\sigma_{cp0} = 10 \text{ N/mm}^2$).

4.3. Querschnittseffizienz

Der dritte Term (iib) im Zähler von Gl. (2), resp. dessen Kehrwert – die Querschnittswerte $\{W, I\}$ pro m Breite bezogen auf die mittlere Dicke t_m – erfasst die Effizienz des Querschnitts, wobei t_m [m] die mittlere Dicke (Querschnittsfläche pro Breite) bezeichnet, und W [m³/m] resp. I [m⁴/m] das Widerstands- resp. Flächenträgheitsmoment (ebenfalls pro Breite). Multipliziert mit der Materialfestigkeit resp. -steifigkeit entsprechen die Querschnittswerte W resp. I bekanntlich dem Biege widerstand $M_{Rd} \propto W \cdot f_{mat,k} / \sigma_{mat}$ resp. der Biegesteifigkeit $E_{mat} \cdot I$. Die Quotienten W/t_m resp. I/t_m sind somit proportional zum Biege widerstand resp. zur Biegesteifigkeit pro Querschnittsfläche, d.h. ein Mass für die Querschnittseffizienz. Dies ist auch daraus ersichtlich, dass das Produkt der drei Faktoren (i)·(iia)·(iib) den Treibhausgasemissionen pro Querschnittswiderstand resp. Querschnittsteifigkeit (und Geschossfläche) entspricht.

Abb. 3 vergleicht die Quotienten W/t_m resp. I/t_m für verschiedene Querschnitte, wobei der Einfachheit halber alle Querschnitte aus dem identischen, linear elastisch-ideal plastischen Baustoff sind.

Man erkennt, dass nicht nur der theoretisch effizienteste reine Gurtquerschnitt, sondern auch Walzprofile aus Stahl und sogar profilierte Querschnitte mit im Beton-Fertigteilebau üblichen Abmessungen bei gleichem Materialverbrauch beinahe dreimal steifer sind und einen fast doppelt so grossen Biege widerstand aufweisen als ein Rechteckquerschnitt, der einer Geschossdecke mit konstanter Stärke entspricht.

Diese Faktoren sind im Vergleich zu den Unterschieden in der auf die Treibhausgasemissionen bezogenen Leistung verschiedener Baustoffe (Abb. 2) sehr gross. Zudem sind effiziente Querschnitte bei Baustoffen mit hohen CO₂-Äquivalenzwerten (insbesondere Walzprofile aus Stahl) weiterverbreitet als in anderen Bauweisen. Dadurch wird die Beurteilung einzig anhand der CO₂-Äquivalenzwerte weiter relativiert.

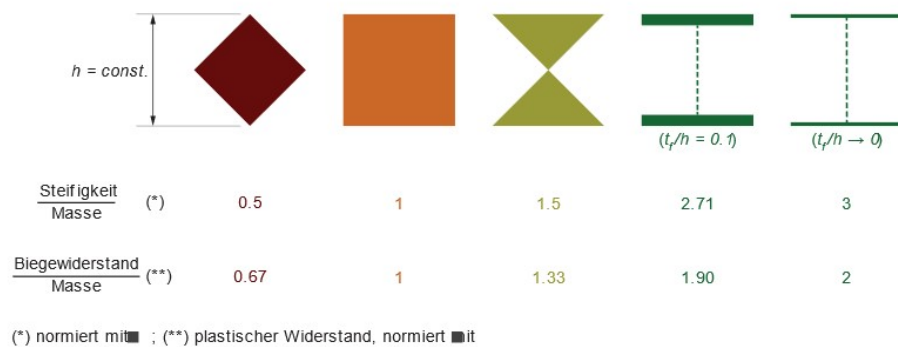


Abb. 3 Widerstands- und Steifigkeitsquotienten von Querschnitten aus dem gleichen linear elastisch-ideal plastischen Baustoff

4.4. Einfluss von Tragsystem und Spannweite

Der vierte Term (iic) in Gl. (2) – Das Biegemoment bzw. die Durchbiegung unter Einheitslast $\{\alpha_m \cdot l^2, \alpha_w \cdot l^4 / w_{adm}\}$ erfasst die Effizienz des Tragsystems, wobei l die Spannweite bezeichnet und w_{adm} die zulässige Durchbiegung. Letztere dient der Gewährleistung der Gebrauchstauglichkeit und ist in den Tragwerksnormen vorgegeben; nach SIA 260 ist beispielsweise $w_{adm} = l/350$ bei duktilen resp. $w_{adm} = l/500$ bei spröden Einbauten einzuhalten. Die Koeffizienten α_m und α_w zeigen den Einfluss des statischen Systems auf die Grösse der Biegemomente und der Durchbiegungen; im Grundfall einer in eine Richtung tragenden, einfeldrigen Platte ist $\alpha_m = 1/8$ und $\alpha_w = 5/384$ (für konstante Biegesteifigkeit). Der Einfluss einer variablen Querschnittshöhe könnte darin ebenfalls berücksichtigt werden, wobei je nach Anteil von Eigengewicht und Nutzlasten bei variabler Querschnittshöhe bis zu 50% kleinere Koeffizienten α_m und α_w resultieren. Darauf wird hier jedoch nicht näher eingegangen, da Geschossdecken in der Regel eine konstante Dicke aufweisen.

Offensichtlich hat die Spannweite einen grossen Einfluss auf die Effizienz des Tragsystems, geht sie doch im Quadrat resp. in dritter Potenz in die Grösse der Biegemomente resp. relativen Durchbiegungen w/l ein; letztere sind bei grösseren Spannweiten offensichtlich kritischer. Unabhängig davon, ob der Tragwiderstand oder die Durchbiegungen massgebend werden, sind kleine Spannweiten also ökologisch nachhaltiger: Beispielsweise bewirkt eine Reduktion der Spannweite von

8 m auf 6 m bei ansonsten gleichem Tragsystem unter gleichmässig verteilter Belastung eine Reduktion der Biegemomente um 44%, und die relativen Durchbiegungen w/l werden um mehr als die Hälfte reduziert. Diese Feststellungen treffen auch in anderen Fällen zu, siehe [13]. Bei kleinen Spannweiten werden allerdings in vielen Fällen minimale Deckenstärken massgebend, beispielsweise zur Gewährleistung der Brandsicherheit oder der Trittschallisolation.

Neben der Spannweite hat auch das Tragsystem einen grossen Einfluss, wobei sich insbesondere eine Durchlaufwirkung (Abbildung 4) und ein zweiachsiger Lastabtrag günstig auswirken. Durchlaufende Deckensysteme weisen wesentlich kleinere Biegemomente auf, die bei duktilen Bauweisen (Stahl, Stahlbeton) zudem plastisch umgelagert werden können. Dadurch ist im Vergleich mit einfeldrigen Platten ein bis zu 50% kleinerer Biege widerstand ausreichend, was sich positiv auf die Emissionen auswirkt. Werden die Durchbiegungen massgebend, sind durchlaufende Systeme nochmals vorteilhafter: Wird linear elastisches Querschnittsverhalten vorausgesetzt, weisen Durchlaufträger im Vergleich mit einfachen Balken fünfmal kleinere Durchbiegungen ($\alpha_w = 1/384$ statt $5/384$) auf. Bei zweiachsigem Lastabtrag werden sowohl die Biegemomente als auch die Durchbiegungen halbiert. Diese Beobachtungen gelten grundsätzlich sowohl für liniengelagerte als auch für punktgestützten Deckensysteme. Da bei Letzteren jeweils die gesamte Belastung in beide Tragrichtungen abgetragen werden muss, sind sie

aber weniger effizient als liniengelagerte Decken:
Es ist ein gleich grosser Biege-
widerstand erforderlich, aber in zwei Richtungen, und die Durch-
biegungen sind etwa zweieinhalbmal so gross wie
bei liniengelagerten Systemen. Bei Flachdecken
wird zudem in den meisten Fällen der Durchstanz-
nachweis massgebend, was ihre ökologische
Nachhaltigkeit stark beeinträchtigt, sofern eine
konstante Deckenstärke beibehalten wird.

Insgesamt ist der Einfluss eines effizienten Trag-
systems auf die Treibhausgasemissionen damit
enorm gross. Beispielsweise treten bei gleicher
Spannweite und Plattenstärke einer in zwei Rich-
tungen tragenden, liniengelagerten und durchlau-
fenden Platte rund zweieinhalbmal kleinere Biege-
momente und zehnmals kleinere Durchbiegungen
auf als in einer liniengelagerten Platte ohne
Durchlaufwirkung, die in eine Richtung spannt.

Wiederum eignen sich Baustoffe mit eher hohen
CO₂-Äquivalenzwerten – insbesondere Stahlbeton
– besser für die Ausbildung effizienter statischer
Systeme.

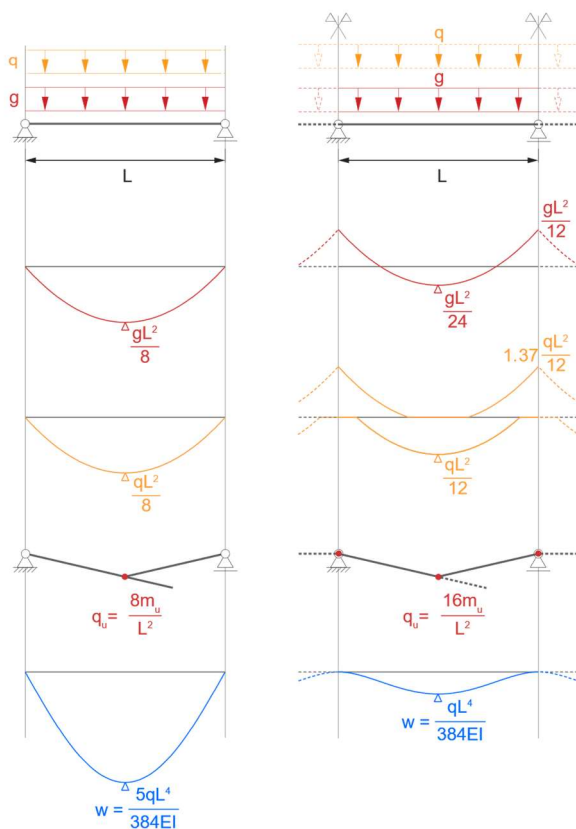


Abb. 3 Einfluss des statischen Systems: Biegemomente,
Traglast und Durchbiegungen am Einfeldträger und
Durchlaufträger

4.5. Belastung

Der fünfte Term (iid) in Gl. (2) erfasst den Einfluss
der ständigen Lasten g_k und der Nutzlasten q_k ,
wobei die charakteristischen Werte mit dem Last-
faktor γ_g und γ_q erhöht werden. Offensichtlich hat
die Grösse der angesetzten Nutzlasten einen di-
rekten Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit.

Da das Eigengewicht von den Querschnittsab-
messungen resp. der mittleren Dicke t_m und der
Dichte ρ_q abhängt, ist der Term (iid) streng ge-
nommen abhängig von den Faktoren (iia) und
(iib); darauf wird hier der Einfachheit halber nicht
näher eingegangen. Es ist jedoch klar, dass
leichte Baustoffe und Konstruktionen insbeson-
dere bei grossen Spannweiten nochmals vorteil-
hafter sind, da ein kleineres Eigengewicht ent-
sprechend geringere Biegemomente und Durch-
biegungen verursacht, was wiederum kleinere Ab-
messungen ermöglichen kann.

4.6. Anforderungen an Tragsicherheit und Ge- brauchstauglichkeit

Auch ökologisch nachhaltige Tragwerke müssen
die normgemässen Anforderungen an Tragsicher-
heit, Gebrauchstauglichkeit und Robustheit erfül-
len. Diese werden in Gl. (2) einerseits über die
Grösse der Nutzlasten, andererseits über die Teil-
sicherheitsbeiwerten γ_{mat} , γ_g und γ_q sowie die
zulässigen Durchbiegungen w_{adm} berücksichtigt.
Bezüglich Gebrauchstauglichkeit sind ausserdem
die Anforderungen an das Schwingungsverhalten
zu beachten. Insbesondere bei leichten Decken-
systemen mit eingeschränkter Quertragfähigkeit
(z. B. Hohlkörperdecken in Holzbauweise), die
durch Personen leicht in Schwingung versetzt
werden können, kann das Frequenzkriterium mas-
sgebend werden.

Die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit
können im Interesse der ökologischen Nachhaltig-
keit gegebenenfalls reduziert (also die zulässigen
Durchbiegung w_{adm} erhöht oder die Komfortan-
sprüche bezüglich Schwingungen reduziert) wer-
den, sofern die damit verbundenen Konsequen-
zen durch die Bauherrschaft akzeptiert werden.

Anders sieht es dagegen bei der Tragsicherheit
aus. Eine Abminderung der für Neubauten in den
Tragwerksnormen vorgegebenen Teilsicherheits-

beiwerte, oder auch der Einwirkungen für eine bestimmte Nutzung, und die damit verbundene Reduktion des Sicherheitsniveaus ist unter keinen Umständen vertretbar. Eine bessere ökologische Nachhaltigkeit eines Neubaus kann ein höheres Versagensrisiko resp. die mit einem Einsturz verbundenen Konsequenzen ebenso wenig rechtfertigen wie geringere Baukosten. Eine Überbemessung – gleichbedeutend mit der Annahme höherer Teilsicherheitsbeiwerte (γ_{mat} , γ_g und γ_q), oder aber höherer Lasten (g_k , q_k) und kleinerer Widerstände ($W \cdot f_{mat,k}$) resp. Steifigkeiten ($E_{mat} \cdot I$) und zulässiger Durchbiegungen (w_{adm}) als tatsächlich erforderlich, sollte andererseits vermieden werden. Wie aus Gl. (2) ersichtlich, führt dies direkt zu einer Erhöhung der Emissionen. Die normgemässen Anforderungen an Bestandsbauten werden im Zusammenhang mit der Nutzungsdauer diskutiert.

5. Indirekte Einflüsse des Tragwerks auf die ökologische Nachhaltigkeit von Gebäuden

5.1. Grundlegende Gedanken

Die bereits einleitend erwähnten, indirekten Einflüsse des Tragwerks wirken sich erheblich auf die Emissionen eines Gebäudes aus und können den Vergleich verschiedener Konstruktionen und Bauweisen entscheidend beeinflussen. Für eine ganzheitliche Beurteilung müssen sie daher berücksichtigt werden. In Gl. (2) sind diese Einflüsse, die positive oder negativ sein können, im Term (iii) enthalten. Nachfolgend werden die wichtigsten dieser Einflüsse diskutiert. Dabei wird zuerst auf die Einflüsse von Geschossdecken auf andere Bauwerksteile eingegangen. Anschliessend wird diskutiert, welchen Einfluss es hat, wenn Geschossdecken je nach Bauweise Funktionen übernehmen oder Anforderungen erfüllen, die in anderen Fällen nichttragende Bauteile erfüllen müssen.

5.2. Leichte Konstruktionen und Konstruktionshöhe

Leichte Geschossdecken sind insbesondere bei mehrstöckigen Gebäuden an Standorten mit schlechtem Baugrund vorteilhaft. Sie können in solchen Fällen zu wesentlichen Einsparungen bei der Foundation führen. Ebenso wirken sich leichte Konstruktionen vorteilhaft aus, wenn die Erdbebenlasten für die Bemessung des Aussteifungssystems massgebend sind.

Die kleinste Konstruktionshöhe resultiert in der Regel mit Stahlbeton-Flachdecken (bei grossen Spannweiten mit Vorspannung). Solche Deckensysteme sind jedoch verhältnismässig schwer, da der Querschnitt nicht profiliert ist (siehe Abb. 3), und somit isoliert betrachtet ökologisch nicht nachhaltig. Andererseits erfordern leichte Konstruktionen (Rippendecken aus Holz oder Stahlbeton, Holz-Beton- oder Stahl-Beton-Verbunddecken und insbesondere Stahlbeton-Gewölbedecken) in vielen Fällen eine grössere Konstruktionshöhe sowie zusätzliche Aufbauten zur Gewährleistung der Trittschallisolation (siehe Abschnitt zu Zusatzfunktionen des Tragwerks). Die entsprechend grössere Bauhöhe hat aber bei gleicher Raumhöhe eine grössere Geschosshöhe zur Folge. Bei gleicher Anzahl Stockwerke resultiert damit ein höheres Gebäude mit entsprechendem Mehraufwand für die horizontale Aussteifung für Wind- und Erdbebenlasten, die Fassade und die vertikale Erschliessung (Treppen, Haustechnik).

Abb. 5 illustriert die erwähnten Zusammenhänge schematisch. Die durch leichte Konstruktion eingesparten Emissionen resp. die durch die grössere Konstruktionshöhe zusätzlich verursachten Emissionen sind im Term (iii) der Gleichung (2) zu berücksichtigen, um einen realistischen Vergleich verschiedener Deckensysteme zu gewährleisten.

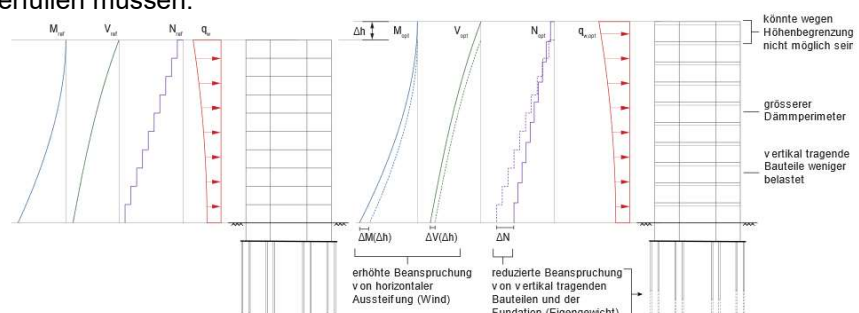


Abb. 5 Indirekte Einflüsse leichter Konstruktionen mit grösserer Konstruktionshöhe: Vergleich zweier Bauweisen mit massiven Flachdecken (links) resp. leichten, aber eine grössere Bauhöhe erfordernden Geschossdecken.

5.3. Zusatzfunktionen des Tragwerks

Je nach Bauweise übernehmen Geschossdecken Funktionen und erfüllen Anforderungen, die nicht eigentliche Aufgabe des Tragwerks sind, das Bauwerk aber ohnehin gewährleisten muss. Beispiele dafür sind Brandschutz (ohne Sprinkleranlage, Verkleidung oder Beschichtung), Schall- und Trittschallisolierung, Feuchtebeständigkeit oder Wasserdichtigkeit, Raumabschluss, oder auch die Funktion als definitive, ästhetisch ansprechende Oberfläche. Zudem wird oft gewünscht, Haustechnikinstallationen innerhalb von tragenden Wänden und Decken zu verlegen. Die Integration all dieser Aspekte ist einer der Hauptgründe für die grosse Verbreitung von massiven Stahlbetondecken.

Diese Funktionen und Anforderungen liegen zu einem grossen Teil ausserhalb des Verantwortungsbereichs der Tragwerksplanenden und sind ohne fundierte Kenntnisse der jeweiligen Fachgebiete schwierig zu quantifizieren. Daher werden die damit verbundenen Einflüsse auf die ökologische Nachhaltigkeit beim Vergleich verschiedener Deckensysteme oft stiefmütterlich behandelt oder ganz vernachlässigt. Da die Einflüsse beträchtlich sind, können dadurch stark verzerrte Vergleiche resultieren. Beispielsweise bewirken die Massnahmen zur (Tritt-)schalldämmung bei einer Brettstapeldecke in Holz (Abb. 6) etwa eine Verdreifachung der Treibhausgasemissionen und die Masse des Tragwerks wird verfünffacht, was den Vorteil der emissionsarmen und leichten Tragkonstruktion stark relativiert.



Abb. 4 Aufbau einer leichten Geschossdecke zur Gewährleistung der Trittschalldämmung [14]

Um einen fairen Vergleich verschiedener Deckensysteme zu gewährleisten, müssen diese Zusatzfunktionen also berücksichtigt werden. Sollen die Geschossdecken für sich alleine beurteilt werden, können die je nach Bauweise entfallenden resp. zusätzlich erforderlichen Massnahmen im Term (iii) der Gleichung (2) subtrahiert resp. addiert werden.

6. Nutzungsdauer Tragwerk

6.1. Nutzungsflexibilität

Die Nutzungsdauer im Zähler der Gl. (2) hat einen direkten Einfluss auf die massgebenden jährlichen Emissionen. Ist die Lebensdauer eines Bauwerks kürzer als die geplante Nutzungsdauer, ist dieser kleinere Wert einzusetzen. Alternativ dazu sind die mit der Erneuerung einhergehenden Emissionen im Zähler zu addieren. Dabei sind auch indirekte Einflüsse zu berücksichtigen, beispielsweise die durch Verkehrsunterbrüche verursachten Emissionen beim Ersatz oder Unterhalt von Brücken. Dieser Fall ist bei stark exponierten Tragwerken wie zum Beispiel Infrastrukturanlagen die Regel, so dass dauerhafte Bauweisen klar im Vorteil sind. Stahlbetonbauten sind daher für solche Anwendungen praktisch alternativlos: Auch wenn sie durch Bewehrungskorrosion geschädigt werden, ist ihre Lebensdauer – zumal bei Neubauten wesentlich grössere Bewehrungsüberdeckungen und dichtere Betone eingesetzt werden als früher – wesentlich länger als diejenige anderer Bauweisen.

Bei Geschossdecken ist die Lebensdauer hingegen selten kürzer als die Nutzungsdauer, da sie vor Witterung geschützt und damit unabhängig von der Bauweise dauerhaft sind. Vielmehr werden sie in der Regel zusammen mit dem ganzen Gebäude ersetzt, weil dieses den Ansprüchen an die Nutzung nicht mehr entspricht. Dies kann durch eine Nutzungsänderung, gestiegene Komfortansprüche oder Normanforderungen (zum Beispiel Raumhöhe, Trittschall, Brandsicherheit, ungenügende Tragsicherheit) oder eine Kombination davon bedingt sein.

Damit dieser Fall nicht eintritt, sollte das Tragwerk eine hohe Nutzungsflexibilität gewährleisten, was mit punktgestützten Geschossdecken mit grossen Spannweiten, die für eine hohe Nutzlast ausgelegt werden, möglich ist. Betrachtet man die Nutzungsdauer isoliert, scheint dies auf der Hand zu liegen. In Anbetracht der in den vorangehenden Abschnitten erläuterten wesentlich grösseren Emissionen solcher Tragwerke (und der Aussicht, dass Um- oder Ersatzbauten in mehreren Jahrzehnten deutlich geringere Emissionen verursachen als heute) ist eine solche Vorinvestition jedoch oft nur dort ökologisch nachhaltig, wo eine Nutzungsänderung wahrscheinlich ist oder die

Erstnutzung ohnehin ein solches Tragwerk erfordert. Beim Entscheid zwischen verschiedenen Lösungen mit ähnlicher ökologischer Nachhaltigkeit ist die Nutzungsflexibilität als Kriterium hingegen gut geeignet.

Ebenso ist es aus ökologischer Sicht praktisch immer sinnvoll, einen durch ungenügende Tragsicherheit bedingten Ersatz eines Bauwerks durch vertiefte statische Überprüfungen und wo nötig gezielte Verstärkungsmassnahmen zu verhindern. Allerdings ist dies im Vergleich mit einem Ersatzbau nicht immer wirtschaftlich, auch wenn die Anforderungen für aussergewöhnliche Einwirkungen auf Basis der Verhältnismässigkeit reduziert werden können [15].

In der Nutzungsdauer kann auch berücksichtigt werden, ob ein Gebäude nach einem aussergewöhnlichen Ereignis ersetzt werden muss oder weiter genutzt werden kann, und welche Massnahmen dafür erforderlich sind. Solche Überlegungen sind bei der Konzeption von Gebäuden in Gebieten mit starker Erdbebengefährdung heute bereits üblich.

6.2. Zirkularität

Auf Ebene der Baustoffe ist Zirkularität heute im Stahlbau und im Betonbau (Betonstahl in der Schweiz praktisch 100% aus Schrott hergestellt, rezyklierte Gesteinskörnung) etabliert. Dieser Einfluss kann im Term (i) von Gl. (2) berücksichtigt werden.

Die mögliche Wiederverwendung von ganzen Bauteilen am Ende der Nutzung eines Bauwerks kann in Gl. (2) grundsätzlich als Minuend im Zähler berücksichtigt werden. Eine solche Zirkularität auf Bauteilebene ist bei Tragkonstruktionen allerdings äusserst komplex, insbesondere hinsichtlich der Verantwortung.

Werden bei Neubauten Massnahmen zur Gewährleistung der Zirkularität tragender Bauteile getroffen, beeinträchtigen diese in vielen Fällen die ökologische Nachhaltigkeit zur Bauzeit. Insbesondere eine wegfallende Durchlaufwirkung von Bauteilen kann sich stark negativ auf den erforderlichen Materialeinsatz auswirken (siehe Abschnitt 4.4). Daher ist ein sorgfältiges Abwägen zwischen den beim Bau aufzuwendenden Ressourcen und einem möglichen späteren Nutzen im

Falle einer Wiederverwendung angezeigt. Dabei ist zu beachten, dass es bei Bauwerken mit üblichen Nutzungsdauern von mehreren Jahrzehnten reine Spekulation ist, wie gross die Nachfrage für wiederverwendete Bauteile dereinst sein wird.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag zeigt am Beispiel von Geschossdecken auf, dass die Beurteilung der Nachhaltigkeit eines Tragwerks auf Basis der CO₂-Äquivalenzwerte von Baustoffen die Komplexität des Themas nicht ansatzweise zu erfassen vermag. Stattdessen ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, bei der alle wesentlichen Einflussfaktoren des Tragwerks auf die Nachhaltigkeit eines Gebäudes als Ganzes zu berücksichtigen sind. Diese Einflüsse und ihre Wechselwirkungen werden im Beitrag diskutiert. Auf dieser Grundlage können einige Grundsätze formuliert werden, die bei der Konzeption ökologisch nachhaltiger Geschossdecken zu beachten sind.

Anhand elementarer baustatischer Zusammenhänge ist ersichtlich, dass für die ökologische Nachhaltigkeit eines Tragwerks nicht die CO₂-Äquivalenzwerte der verwendeten Baustoffe massgebend sind, sondern ihre *auf die Leistung bezogenen* Emissionen. Zudem müssen die Spannweiten und die *Effizienz von Tragsystem und Querschnitten* berücksichtigt werden, die sich je nach Bauweise und Konstruktion stark unterscheiden. Diese Faktoren haben einen *direkten Einfluss* auf die ökologische Nachhaltigkeit des Tragwerks als solches. Dieser kann grundsätzlich mit geringem Aufwand beurteilt werden. Es ist jedoch zu beachten, dass zum Zeitpunkt der Konzeption eines Tragwerks zwar die Leistung der Baustoffe exakt bekannt ist (resp. spezifiziert wird), die Emissionen hingegen nur grob abgeschätzt werden können (beispielsweise anhand von Kennzahlen der KBOB), da die CO₂-Äquivalenzwerte der tatsächlich verbauten Materialien erst im Zuge der Bauausführung feststehen.

Selbst wenn all diese direkten Einflüsse berücksichtigt werden, kann ein Vergleich verschiedener Bauweisen oder Konstruktionen irreführend sein, da sich die *indirekten Einflüsse des Tragwerks* erheblich auf die Emissionen eines Gebäudes auswirken und in der Gesamtbetrachtung überwiegen

können. Die Berücksichtigung der indirekten Einflüsse ist daher von zentraler Bedeutung und darf nicht vernachlässigt werden – auch wenn ihre Beurteilung oft komplex ist und eine disziplinenübergreifende Zusammenarbeit (Architektur, Tragwerksplanung, Bauphysik, HLK, Fassade) erfordert.

Zu beachten sind dabei einerseits die Einflüsse von Bauhöhe und Gewicht der Geschossdecken auf andere Bauwerksteile (horizontale Aussteifung für Wind- und Erdbebenlasten, Fundation, Fassade, vertikale Erschliessung). Andererseits muss berücksichtigt werden, dass Geschossdecken je nach Bauweise Funktionen übernehmen oder Anforderungen erfüllen, die in anderen Fällen nichttragende Bauteile erfüllen müssen (Brandschutz, Schall- und Trittschallisolation, Feuchtebeständigkeit oder Wasserdichtigkeit, Raumabschluss, definitive Oberfläche).

Für eine ganzheitliche Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit ist schliesslich auch die Nutzungsdauer entscheidend. Hier ist einerseits die Nutzungsflexibilität zu berücksichtigen, und andererseits die Zirkularität. Dabei ist zu beachten, dass eine hohe Nutzungsflexibilität zwar die Nutzungsdauer eines Gebäudes verlängern, sich aber stark nachteilig auf die ökologische Nachhaltigkeit auswirken kann, so dass sich entsprechende Vorinvestitionen selten lohnen dürften. Letzteres gilt ebenso für die Zirkularität von Trag-

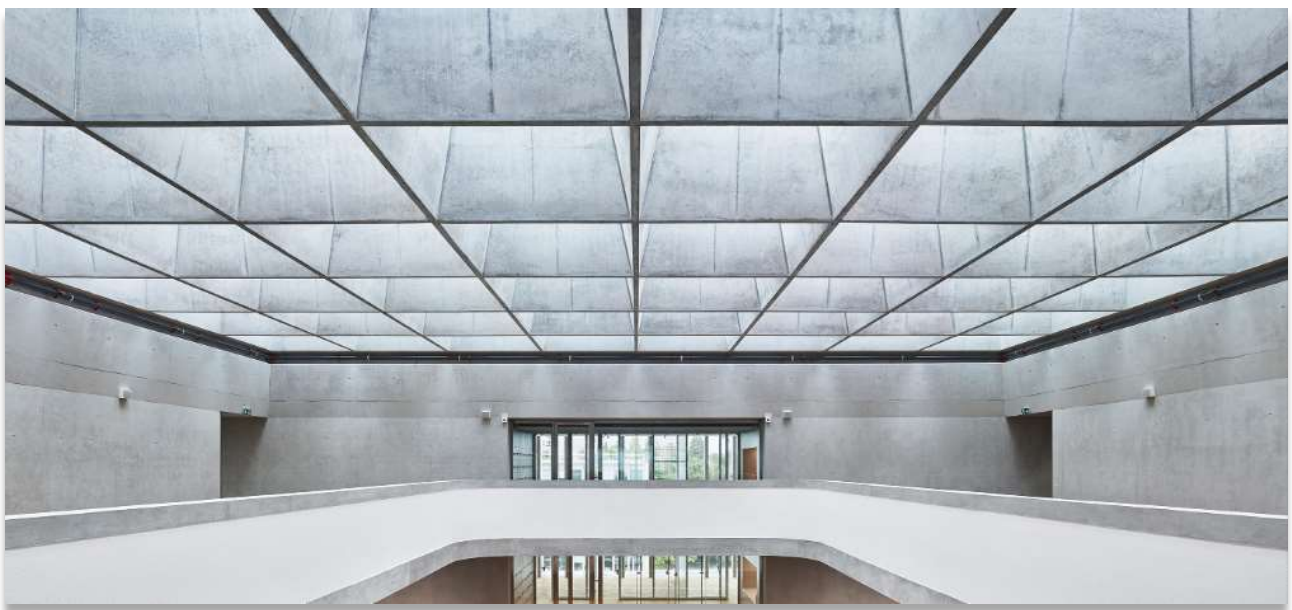
werken auf Bauteilebene. Zirkularität auf Baustoffebene ist aus heutiger Sicht hingegen zwingend und insbesondere im Stahl- und Betonbau bereits etabliert.

8. Ausblick

Die Konzeption ökologisch nachhaltiger Geschossdecken ist komplex und erfordert Kenntnisse, die heute in der Ausbildung teilweise fehlen. Der Aufwand für einen fundierten Vergleich verschiedener Lösungen ist entsprechend gross, und die Ergebnisse hängen selbst bei ganzheitlichen Vergleichen von den Emissionen der Baustoffe ab, die zum Zeitpunkt der Konzeption eines Bauwerks nur grob abgeschätzt werden können.

Um diese Situation zu verbessern, müssen sich einerseits die Tragwerksplanenden das notwendige Wissen aneignen. Dazu bauen wir aktuell einen Blockkurs für Studierende an der ETH Zürich auf, der auch als Grundlage für Weiterbildungsveranstaltungen dienen soll. Um die Emissionen der Baustoffe zuverlässiger abschätzen zu können, erstellen wir andererseits in den kommenden Monaten eine Datenbank, welche die heute verfügbaren Kennzahlen um Angaben zur erwarteten Streuung erweitert und entsprechend differenziertere Vergleiche ermöglichen wird.

Damit hoffen wir einen Beitrag dazu zu leisten, dass irreführende Beurteilungen der Nachhaltigkeit von Tragwerken auf alleiniger Grundlage der CO₂-Äquivalenzwerte von Baustoffen bald der Vergangenheit angehören.



9. Literatur

- [1] O. P. Gibbons and J. J. Orr, *How to calculate embodied carbon*, Second edition. in IStructE Guide. London: The Institution of Structural Engineers, 2022.
- [2] P. Bischof, J. Mata-Falcón, and W. Kaufmann, 'Fostering innovative and sustainable mass-market construction using digital fabrication with concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 161, p. 106948, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106948.
- [3] United Nations Environment Programme, '2022 Global Status Report for Buildings and Construction - Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector', 2022.
- [5] S. Holcim, 'CO₂-Abscheidung, -Nutzung und -Speicherung'. [Online]. Available: <https://www.holcim.ch/de/ccus-und-rekarbonatisierung>
- [6] 'neustark'. [Online]. Available: <https://www.neustark.com/>
- [7] 'climateworks'. [Online]. Available: <https://www.climateworks.org/programs/carbon-dioxide-removal/>
- [8] Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, 'Ökobilanzdaten im Baubereich 2009/1:2022, Version 4'. Aug. 12, 2023.
- [9] 'Betonartenrechner v5'. [Online]. Available: <https://rechner.pawis.ch/rechner/betonrechner-planende>
- [10] 'Holzartenrechner v1.0'. [Online]. Available: <https://treeze.ch/de/rechner>
- [11] L. Gebhard, 'Reinforcement Strategies for Digital Fabrication with Concrete', Doctoral thesis, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, 2023. doi: 10.3929/ethz-b-000614836.
- [12] R. J. Flatt and T. Wangler, 'On sustainability and digital fabrication with concrete', *Cement and Concrete Research*, vol. 158, p. 106837, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.106837.
- [13] L. Gebhard *et al.*, 'Enhancing structural efficiency with digital concrete - Principles, opportunities and case studies', *Cement and Concrete Research*, 2024, doi: 10.1016/j.cemconres.2024.107645.
- [14] 'Lignum Bauteilkatalog'. [Online]. Available: <https://lignumdata.ch/detail.cfm?page=detail&uuid=C0A26F74-EAFB-3EAC-869C-193F700980C9&print=true&type=bauteil>
- [15] 'SIA 269/8 Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben', 2017.

10. Projektbezeichnungen / Bilder

Titelbild und Seite 16: WHO Hauptquartier Genf, Architekt und GP: Berrel Berrel Kräutler AG, Bauingenieure Dr. Schwartz Consulting AG, Dr. Neven Kostic GmbH, Dr. Vollenweider AG, Foto Damian Poffet.

Bild Seite 8: SRF Campus Zürich, Penzel Valier AG, Bauphysik Gartmann Engineering AG, Foto Giuseppe Micciche

Abbildungen Seiten 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13: Inst. f. Baustatik u. Konstruktion, ETH Zürich