

Betonbau – Quo vadis?

<https://doi.org/10.14459/mbs28.01>

Walter Kaufmann



Prof. Dr. Walter Kaufmann

1987-92 Studium Bauingenieurwissenschaften,
ETH Zürich
1993-99 Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehr-
beauftragter, ETH Zürich
1998 Promotion am Institut für Baustatik und Kon-
struktion, ETH Zürich
1999-2014 Praxistätigkeit in der Tragwerks-
Projektierung (Spanien, Schweiz)
seit 2014 Ordentlicher Professor an der ETH Zürich
(Massiv- und Brückenbau)

Als maßgeblicher Treiber des Klimawandels und dominante Bauweise der alternden Infrastruktur in Industrieländern steht der Betonbau vor großen Herausforderungen. Der Beitrag zeigt auf, dass Beton Teil der Lösung sein muss, und wie dies durch dauerhafte und materialeffiziente Tragwerke schon heute möglich ist – viel früher, als Zement weltweit klimaneutral wird. Abschließend werden ausgewählte Projekte an der ETH vorgestellt, welche diese Ziele verfolgen.

As major driver of climate change and dominant material in the aging infrastructure of industrialised countries, concrete construction faces major challenges. This article highlights that concrete must be part of the solution, and discusses how this can be achieved already today through durable and material-efficient structures – much before cement will be carbon neutral worldwide. It concludes by presenting a selection of projects at ETH Zurich pursuing these goals.

Einleitung / Ausgangslage

Ausgangslage

Die Bauindustrie steht vor großen Herausforderungen. Als maßgeblicher Treiber des Klimawandels gilt es, die Treibhausgasemissionen und den Ressourcenverbrauch drastisch zu reduzieren – trotz der prognostizierten Verdoppelung der gebauten Geschossfläche, mit gesteigerter Bautätigkeit vor allem in Entwicklungs- und Schwellenländern. Zudem altert die gebaute Umwelt unaufhaltsam, und insbesondere die stark exponierte Straßeninfrastruktur hat in vielen Ländern die geplante Lebensdauer bereits erreicht. Brückeneinstürze sind dabei nur die Spitze des Eisbergs.

Der Betonbau steht hier im Rampenlicht, verursacht er doch rund die Hälfte der weltweiten baulich bedingten Treibhausgasemissionen, und die alternde Infrastruktur besteht zu einem großen Teil aus Stahl- und Spannbeton. Vor diesem Hintergrund scheint die heute populäre Forderung nach einem Ersatz von Beton durch alternative Baustoffe berechtigt. Sollen wir also die Lehre und Forschung im Betonbau einstellen?

Betonbau – Teil der Lösung

Wer sich mit der Thematik auseinandersetzt erkennt rasch, dass das Gegenteil zutrifft und der Betonbau weltweit die wichtigste Bauweise bleiben wird. Einerseits ist sein großer ökologischer Fußabdruck nicht primär den Baustoffen geschuldet, sondern der gewaltigen Verbreitung¹, so dass der Ersatz von Beton durch andere Materialien die Emissionen und den Ressourcenverbrauch nur unwesentlich reduzieren könnte. Andererseits können alternative Baustoffe nur einen kleinen Teil des Materialbedarfs der Bauindustrie decken; insbesondere Holz ist eine begrenzte Ressource². Hinzu kommt, dass sich Entwicklungs- und Schwellenländer die Mehrkosten alternativer Bauweisen nicht leisten können und Beton für stark exponierte Bauteile faktisch alternativlos ist. Der Betonbau muss somit einen großen Teil zur Lösung der aktuellen Herausforderungen beitragen – was intensive Bemühungen in Forschung, Aus- und Weiterbildung erfordert.

¹ Jährlich werden weltweit ca. 2 m³ Beton pro Kopf verbaut, insgesamt rund 15 Milliarden m³ (geschätzt auf Basis des Zementverbrauchs).

² Die Bauholzproduktion beträgt weltweit ca. 1/8 des Betonverbrauchs.

Handlungsfelder

Der konstruktive Betonbau könnte es sich einfach machen und darauf vertrauen, dass Beton, wie von der Zementindustrie angestrebt, bis 2050 CO₂-neutral wird. Dies ist zweifellos erstrebenswert, der Zeithorizont aber lang, und der Ressourcenverbrauch verbleibt. Wir müssen daher parallel dazu Lösungen finden, um schon heute (i) materialeffiziente Betonbauten wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen und (ii) die Lebensdauer neuer Betonbauten zu erhöhen und diejenige bestehender Betonbauten – möglichst ohne Maßnahmen und mit vertretbaren Risiken – zu verlängern. Als Grundlage dafür muss zudem (iii) die ökologische Nachhaltigkeit von (Beton-)Bauten zutreffend beurteilt werden. Diese drei Handlungsfelder werden nachfolgend (in abgetauschter Reihenfolge) kurz erläutert, bevor einige Lösungsansätze der Professur des Autors aufgezeigt werden.

Ökologische Nachhaltigkeit von (Beton-)Bauten

Die ökologische Nachhaltigkeit im Bau wird heute oft einzig auf Basis der CO₂-Äquivalenzwerte³ von Baustoffen beurteilt. Dies vermag die Komplexität des Themas jedoch nicht ansatzweise zu erfassen. Stattdessen ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich, bei der alle wesentlichen Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkungen zu berücksichtigen sind. Die wichtigsten Aspekte werden nachfolgend am Beispiel von Geschossdecken (die einen großen Teil des Bauvolumens ausmachen) kurz erläutert.

Auch Laien sollte klar sein, dass die CO₂-Äquivalenzwerte der Baustoffe für einen aussagekräftigen Vergleich auf ihre Leistung (Steifigkeit, Festigkeit, Duktilität) bezogen werden müssen: Offensichtlich wird weniger Material benötigt, wenn dieses eine höhere Festigkeit und Steifigkeit hat. Von zentraler Bedeutung ist zudem, dass die statische Effizienz von Querschnitten und Tragsystem berücksichtigt wird. Abb. 1 illustriert dies vereinfacht für einachsige tragende Systeme. Zweiachsige tragende Decken – wie sie im Betonbau üblich sind – sind nochmals effizienter, und mit einer Vorspannung (Kompensation der Durchbiegungen) sind weitere Optimierungen möglich. Der Materialverbrauch effizienter und ineffizienter Tragwerke unterscheidet sich also um mehr als eine Größenordnung.

³ Treibhausgasemissionen in äquivalenten kg CO₂ pro kg oder m³ Baustoff.

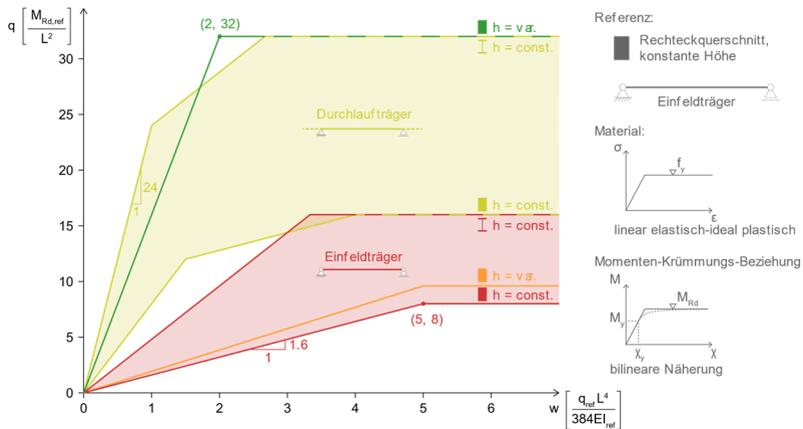


Abb. 1: Last-Verformungsbeziehungen homogener Träger mit identischer Masse und Spannweite, aber unterschiedlichem statischem System und Querschnitt (Gurtquerschnitt gleiche Höhe, variabler Querschnitt gleiche Breite wie Referenz).

Weiter ist zu berücksichtigen, dass je nach Bauweise unterschiedliche Tragwerke möglich sind, wobei die Betonbauweise eigentlich für statisch effiziente Systeme prädestiniert ist (mehr dazu im folgenden Kapitel). Zudem beeinflusst das Tragwerk insbesondere im Hochbau andere Bauwerksteile⁴ und übernimmt je nach Bauweise Funktionen⁵ resp. erfüllt Anforderungen⁶, die in anderen Fällen zusätzliche Elemente übernehmen resp. erfüllen müssen. Diese indirekten Einflüsse können in der Gesamtbetrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit überwiegen.

Absolut entscheidend für die Nachhaltigkeit ist schließlich die Nutzungsdauer, über welche der Ressourcenverbrauch und die Emissionen bei der Erstellung quasi amortisiert werden können (siehe separates Kapitel).

Die Diskussion um die “richtigen” CO₂-Äquivalenzwerte – die je nach Produktionsart, Systemabgrenzung und Methodik stark variieren – wird durch all diese mindestens ebenso relevanten Aspekte stark relativiert.

⁴ z.B. Einfluss von Bauhöhe und Gewicht der Geschossdecken auf horizontale Aussteifung, Foundation, Fassade und vertikale Erschließung.

⁵ z.B. Brandschutz, Schall- und Trittschallisolation, Haustechnikleitungen.

⁶ z.B. Feuchtebeständigkeit, Raumabschluss, definitive Oberfläche.

Materialeffizienz versus Wirtschaftlichkeit

Dass durch statisch effiziente Tragwerke Material eingespart werden kann, ist keineswegs eine neue Erkenntnis. Die Entwicklung des Betonbaus zeigt jedoch eine gegenläufige Tendenz. So wurden z.B. Geschossdecken in der Anfangszeit des Betonbaus als effiziente, aufgelöste Rippen-, Kassetten- oder Pilzdecken ausgeführt, seit etwa 50 Jahren bauen wir hingegen zunehmend Flachdecken. Diese minimieren den (in Industrieländern teuren und daher gegenüber den Materialkosten dominanten) Planungs- und Arbeitsaufwand und sind somit trotz höherem Materialverbrauch wirtschaftlicher. Durch diese negative Korrelation von Kosten und Materialverbrauch besteht kein wirtschaftlicher Anreiz, Betonbauten materialeffizienter zu machen, zumal andere Bauweisen in der Regel deutlich teurer sind.

Angesichts der Klimakrise ist hier ein Umdenken zu Gunsten emissionsarmer Bauweisen nötig. Dies kann grundsätzlich durch politische Maßnahmen erreicht werden, womit aber eine Erhöhung der Baukosten einhergeht. Diese Mehrkosten sind selbst in Industrieländern unbeliebt und können Schwellen- und Entwicklungsländern – wo die zukünftige Neubautätigkeit zum größten Teil stattfindet – kaum auferlegt werden. Wir müssen daher Planungs- und Fertigungsverfahren entwickeln, mit denen emissionsarme Bauten möglichst ohne Mehrkosten erstellt werden können. Für Geschossdecken sind hier materialeffiziente Betonlösungen erfolgsversprechend, da sie einen Großteil der indirekten Vorteile von Flachdecken^{5,6} beibehalten und zudem durch ihr geringeres Gewicht Einsparungen⁴ ermöglichen. Dazu müssen jedoch die Kosten geometrisch komplizierter Schalungen (beispielsweise mit digitalen Planungs- und Fertigungsverfahren) reduziert werden und das Bewusstsein, dass weder die Emissionen noch die Wirtschaftlichkeit eines Tragwerks isoliert beurteilt werden dürfen, sondern eine Gesamtbetrachtung des Bauwerks nötig ist, muss gestärkt werden.

Maximierung der Lebensdauer

Bestandsbauten

Insbesondere in den Industrieländern mit ihrer gewaltigen Menge gebauter Umwelt ist die Erhaltung von Bauwerken die wirksamste Maßnahme zur Reduktion von Ressourcenverbrauch und Emissionen. Leider werden insbesondere Gebäude häufig ersetzt, bevor das Tragwerk seine Lebensdauer

erreicht. Dies, weil sie den Ansprüchen an die Nutzung – die sich allenfalls ändert – nicht mehr gerecht werden. Diesem Problem kann mit Suffizienz, Nutzungsflexibilität oder Zirkularität begegnet werden. Auf diese Fragestellungen kann hier aus Platzgründen nicht eingegangen werden.

Infrastrukturbauten werden hingegen oft ersetzt, weil sie die normgemäßen Anforderungen an die Tragsicherheit nicht mehr erfüllen. Typische Ursachen dafür sind Schädigungen, höhere Lasten oder geänderte Normen. In vielen Fällen ist dabei nicht à priori klar, ob es sich um tatsächliche oder nur normative Tragsicherheitsdefizite handelt. Um mit vertretbarem Risiko auf potentiell unnötige Verstärkungen oder gar einen Ersatz verzichten zu können, muss das tatsächliche Tragverhalten realitätsnah erfasst werden. Trotz intensiver Forschung in den letzten Jahrzehnten⁷ fehlen dafür aber in vielen Fällen noch immer Grundlagen. Wissenslücken mit entsprechendem Forschungsbedarf bestehen beispielsweise bei lokaler Korrosion oder kombinierter Beanspruchung, insbesondere bei innerlich hochgradig statisch unbestimmten Bauteilen wie Fahrbahnplatten und Trägerstegen.

Neubauten

Seit der Anfangszeit des Betonbaus wird die Dauerhaftigkeit primär durch den Überdeckungsbeton gewährleistet, der die Bewehrung vor Korrosion schützt. Mit den heutigen, viel größeren und dichteren Betondeckungen wird zweifellos eine viel längere Lebensdauer erreicht als bei den Brücken aus den 1970er Jahren, die uns heute große Probleme im Erhalt bereiten.

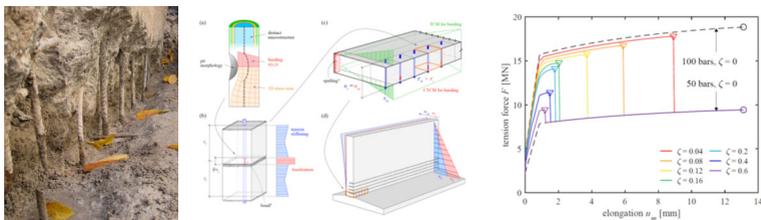


Abb. 2: Lokal korrodierte Winkelstützmauern und korrodiertes Zuggurtmodell [1].

⁷ Mit starkem Fokus auf ausgewählte Themen wie z.B. Querkraftwiderstand stark vorgespannter Träger unter reiner Längsbeanspruchung.

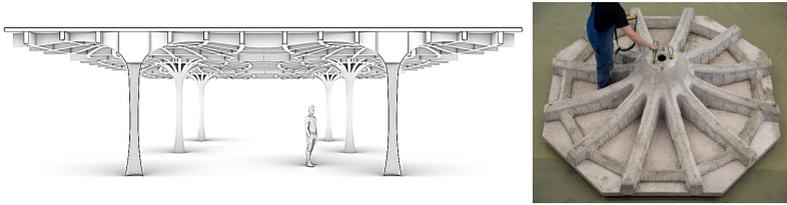


Abb. 3: Digital gefertigte Rippendecke [2].

Bei stark exponierten Bauwerken könnte es jedoch nachhaltiger sein, trotz beträchtlich höherer initialer Kosten und Treibhausgasemissionen nichtrostenden Betonstahl oder nichtmetallische Bewehrungen einzusetzen und dadurch die Korrosion zu verhindern, statt sie nur hinauszuzögern. Insbesondere bei der Verkehrsinfrastruktur, deren Instandsetzung oder Ersatz mit hohen indirekten Kosten und Emissionen verbunden sind, sollten solche Lösungen, unter Einbezug aktueller Forschungsergebnisse, vermehrt geprüft und zumindest im Sinne von Pilotprojekten umgesetzt werden.

Lösungsansätze an der ETH Zürich

An der Professur des Autors an der ETH Zürich werden aktuell verschiedene Projekte verfolgt, um neue Betonbauten materialeffizienter zu machen und die Lebensdauer bestehender und neuer Betonbauten zu verlängern. Einige davon sind in Abb. 2-5 dargestellt. Sie werden (zusammen mit weiteren Projekten) im Vortrag näher erläutert.

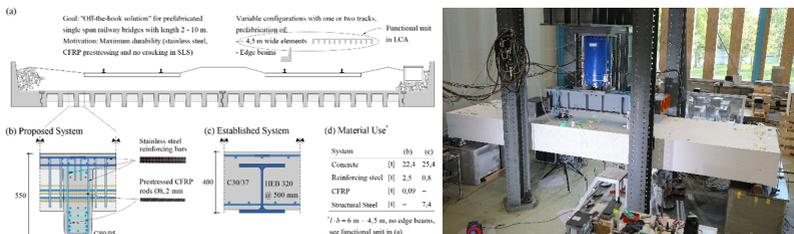


Abb. 4: SBB-Systembrücke mit CFK-Vorspannung [3].

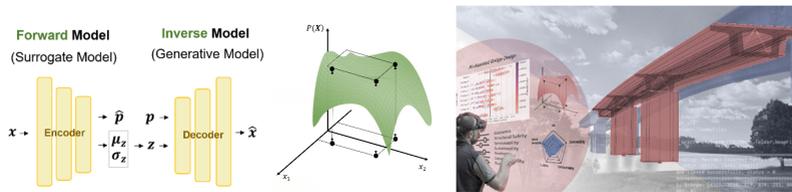


Abb. 5: Kopilot für den Brückenentwurf [4].

Fazit

Der Betonbau muss einen großen Teil zur Lösung der großen Herausforderungen der Bauindustrie beitragen. Statt darauf zu warten, dass Beton durch Innovationen auf Baustoffebene zur CO₂-Senke wird, müssen wir zeitnah Lösungen finden, um materialeffiziente Betonbauten wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen und die Lebensdauer neuer Betonbauten zu erhöhen sowie diejenige bestehender Bauwerke zu verlängern – möglichst ohne Maßnahmen, jedoch mit vertretbaren Risiken. Dafür braucht es Lehre und Forschung, aber auch innovationsoffene Bauherrschaften, die bereit sind, den dafür erforderlichen höheren Planungsaufwand angemessen zu honorieren und gegebenenfalls höhere Investitionskosten zu tragen.

Literatur

- [1] Häfliger, S.: “Load-deformation behaviour of reinforced concrete structures affected by local corrosion,” *Doctoral Thesis*, ETH Zürich, 2023.
- [2] Huber, T.; Burger, J.; Mata-Falcón, J.; Kaufmann, W.: “Structural design and testing of material optimized ribbed RC slabs with 3D printed formwork,” *Structural Concrete*, vol. 24, no. 2, 2023.
- [3] Näsborn, A.; Thoma, K.; Kaufmann, W.: “Construction and Testing of a CFRP-prestressed Railway Bridge Prototype,” IABSE Symposium Report, Manchester, 2024.
- [4] Balmer, V. et al.: “Design Space Exploration and Explanation via Conditional Variational Autoencoders in Meta-Model-Based Conceptual Design of Pedestrian Bridges,” *Automation in Construction*, vol. 163, p. 105411, Jul. 2024