



# Synthese

## Nachhaltige Betonkonstruktionen





**Energie**

Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

# Nachhaltige Betonkonstruktionen

Verbundsynthese



# 1. Nachhaltige Betonkonstruktionen

Synthese des NFP-70-Verbundprojekts  
«Energiearmer Beton»



## 1.1. Viel Potenzial bei Baustoffen

## 1.1.1. Zusammenfassung



Alle Bauten in der Schweiz – also alle Gebäude, Strassen, Infrastrukturbauten und so weiter – konsumieren über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg rund 50 Prozent des schweizerischen Endenergiebedarfs. Zudem emittieren sie gut 30 Prozent des Treibhausgases CO<sub>2</sub>.

In den letzten Jahrzehnten reduzierten sich der Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Nutzung der Bauten stark. Die graue Energie, die in den Bauten steckt, und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei der Herstellung der Baustoffe, der Sanierung und dem Rückbau sind hingegen unverändert hoch. Hier besteht grosses Potenzial.

Das Verbundprojekt «Energiearmer Beton» schafft wichtige Grundlagen für die Transformation der Bauwirtschaft in eine nachhaltige Branche. Es fokussiert vor allem auf den Baustoff Beton, der für besonders viel graue Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich ist. Die Ergebnisse dieses Verbundprojekts werden in der vorliegenden Synthese «Nachhaltige Betonkonstruktionen» zusammengefasst und interpretiert.

Das Verbundprojekt hat vor allem folgende Ziele verfolgt:

1. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die graue Energie werden durch eine drastische Reduktion des Klinkers im Zement verringert.
2. Die graue Energie wird reduziert, indem in Betonkonstruktionen der Bewehrungs- und Spannstahl durch Holz und Kunststoffe ersetzt wird.
3. Die Lebensdauer der Bauwerke wird durch eine professionelle Bauwerksüberwachung und durch adäquate Sanierungsmassnahmen verlängert; damit reduzieren sich die im Durchschnitt pro Jahr anfallende graue Energie und die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die Forschungen zeigen, dass sich der durch Beton und Betonkonstruktionen verursachte CO<sub>2</sub>-Ausstoss um den Faktor 4 und die gebundene graue Energie um den Faktor 3



## **Energie**

Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

reduzieren lassen.

## 1.2. Kernbotschaften

# Nachhaltigkeit

## 1.2.1. Starke Reduktion möglich



Aus den Forschungen im Verbundprojekt «Energiearmer Beton» lassen sich zwei Kernbotschaften ableiten:

1. Die graue Energie und die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Zusammenhang mit dem Bau, der Sanierung und dem Rückbau von Betonkonstruktionen im Hoch- und Tiefbau lassen sich bis auf ein Drittel reduzieren, ohne dass die hervorragenden Materialeigenschaften des Baustoffs wesentlich beeinträchtigt werden.<sup>1</sup>
2. Die professionelle, laufend durchgeführte Überwachung und Diagnose des Bauwerkzustands hilft, unnötige Sanierungs- und verfrühte Ersatzmassnahmen zu vermeiden. Zudem ermöglicht das permanente Monitoring den Einsatz innovativer, noch wenig erprobter Baustoffe und Konstruktionen zur Reduktion der grauen Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses im Zusammenhang mit dem Bau, der Sanierung und dem Rückbau von Betonkonstruktionen.<sup>2</sup>

### Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «Energiearmer Beton»

2 Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»

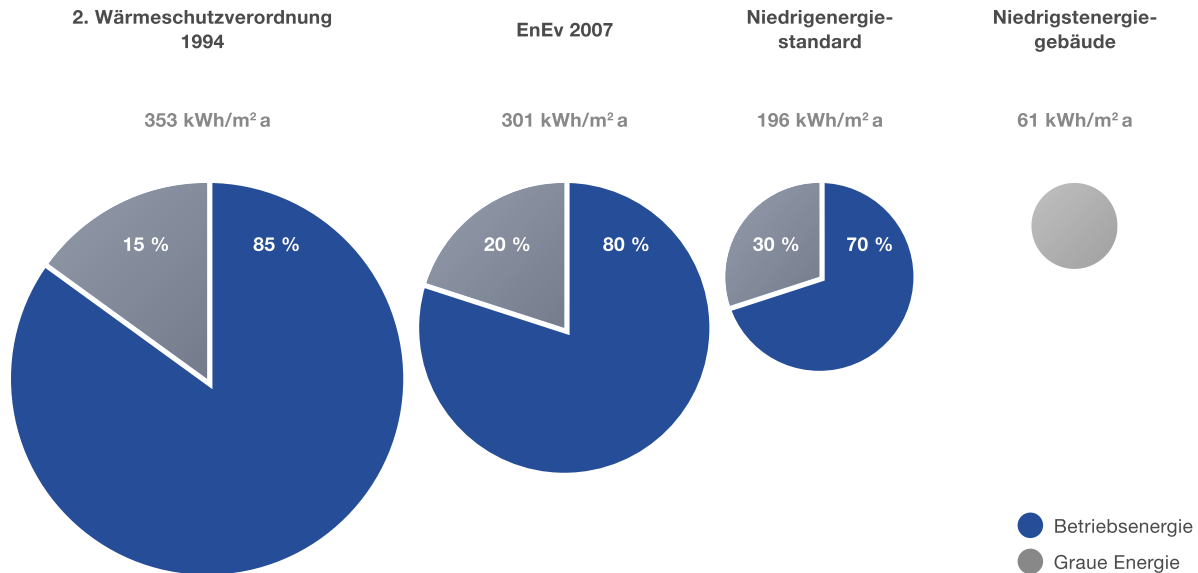


### 1.3. Beton – ein anspruchsvoller Baustoff

Beton bindet sehr viel graue Energie – und ist auch hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Emissionen ein bedeutender Faktor. Während der Betrieb von Bauwerken bezüglich Energieverbrauch und Schadstoffausstoß immer besser optimiert wird, gibt es beim Erstellen, beim Sanieren und beim Rückbau von Betonkonstruktionen noch erhebliches Potenzial. Aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, wie sich dieses ausschöpfen lässt.

# Gebäude # CO<sub>2</sub> / Treibhausgase

### 1.3.1. Bauen und Bauten als Klimasünder



**Entwicklung des Energieanteils im Gebäudepark in Deutschland.** *Quelle: Hegger et al. 2008*

Bau, Sanierung und Betrieb des Schweizer Gebäude- und Infrastrukturbestandes sind gegenwärtig für rund 50 Prozent des Endenergieverbrauchs und 30 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich; vier Fünftel davon fallen in der Betriebsphase an, ein Fünftel bei Bau, Sanierung und Rückbau der Bauten. Dieses Verhältnis wird sich in den nächsten Jahren deutlich verschieben, wie eine Untersuchung aus Deutschland am Beispiel des Gebäudeparks (ohne Infrastrukturbauten) zeigt<sup>1</sup>: Beim Betrieb werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die aus dem Netz bezogene Endenergie gegen null gehen, die entsprechenden Werte bei Bau, Sanierung und Rückbau werden hingegen noch etwas ansteigen. Grund dafür ist, dass die erhöhten energetischen Anforderungen an die Bauten zusätzliche graue Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge haben. Mehr dazu in der Synthese «Gebäude und Siedlungen»<sup>2</sup>, die ebenfalls im Rahmen des NFP «Energie» entstanden ist.

Die graue Energie und der hohe CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zusammenhang mit Bau, Sanierung und Rückbau entfallen zu 20 bis 30 Prozent auf die Tragkonstruktion der Gebäude<sup>3</sup> – und davon entfällt wiederum ein Grossteil auf Betonkonstruktionen inklusive zementgebundenen Mörtels. Es ist deshalb sehr sinnvoll, diesem Baustoff besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

#### Anmerkungen und Referenzen

1 Hegger, M., Fuchs, M., Stark, T., Zeumer, M. (2008), Energy Manual: Sustainable Architecture, DETAIL. ed. Institut für Internationale Architekturdokumentation / Birkhäuser, München





## **Energie**

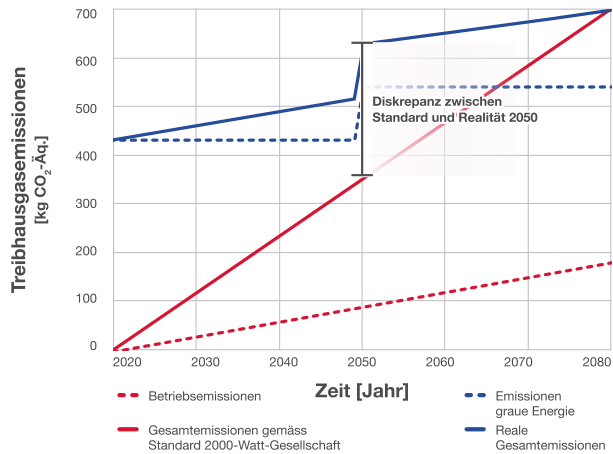
Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

### 2 Synthese «Gebäude und Siedlungen»

3 SIA (2010), Graue Energie von Gebäuden; SIA-Merkblatt 2032, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich

# CO<sub>2</sub> / Treibhausgase

### 1.3.2. Graue Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen fallen unregelmässig an



**Vergleich zwischen Betriebsemissionen und eingebundenen Emissionen für einen Neubau nach dem Standard der 2000-Watt-Gesellschaft.** *Quelle: Projekt «Energiearmer Beton»*

Während des Betriebs eines Bauwerks bleiben der jährliche Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen mehr oder weniger gleich, mit einer über die Jahre leicht steigenden Tendenz infolge zunehmender Alterung. Hinsichtlich Bau, Sanierung und Rückbau gibt es keine solche Regelmässigkeit; wann ein Bauwerk saniert oder rückgebaut wird, hängt vom Entscheid der Eigentümerin oder des Eigentümers ab. Es lässt sich dafür also keine Regel aufstellen.

Dennoch geben alle Quellen<sup>1 2 3</sup> jährliche Mittelwerte an, die sich auf standardisierte Lebensdauern von Baustoffen bzw. Bauteilen und technischen Anlagen beziehen. Diese werden dann auf die Zielwerte für ein ganzes Gebäude hochgerechnet. Der SIA-Effizienzpfad Energie<sup>4</sup> zum Beispiel definiert auf diese Weise – und auf der Basis des Konzepts «2000 Watt-Gesellschaft»<sup>5</sup> – folgende Zielwerte für die CO<sub>2</sub>-Emissionen eines neu zu erstellenden Wohngebäudes:

- Bau, Sanierung und Rückbau: 9,0 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> a
- Betrieb: 3,0 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> a

Diese Werte beziehen sich auf die Energiebezugsfläche des Gebäudes. Tatsächlich aber fallen die 9,0 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> a für Bau, Sanierung und Rückbau nicht linear verteilt an. Der weitaus grösste Teil der Belastung entsteht beim Bau, dann liegen die Werte etwa 30 Jahre lang bei null – bis das erste grosse Sanierungspaket anfällt. Wie die Grafik zeigt, wird die Problematik des CO<sub>2</sub>-Ausstosses in Abhängigkeit von der Zeit mit einer linearen Betrachtung stark unterschätzt. Das gilt ebenso für die graue Energie.

Anmerkungen und Referenzen



## Energie

Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

- 1 KBOB, IPB (2016), Ökobilanzen im Baubereich, Empfehlung 2009/1:2016, Koordinationskonferenz der öffentlichen Bauherren (KBOB) und Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB), Bern und Zürich
- 2 SIA 2032:2010, Graue Energie von Gebäuden; SIA-Merkblatt 2032, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich
- 3 SIA 2014:2017, SIA-Effizienzpfad Energie, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich
- 4 SIA 2014:2017, SIA-Effizienzpfad Energie, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich
- 5 <http://www.2000watt.ch>

### 1.3.3. Betonkonstruktionen sind Verbundkonstruktionen



Beton ist der am meisten verwendete Baustoff für Tragkonstruktionen von Gebäuden, Brücken, Stützbauwerken, Tunneln usw. Ein Kubikmeter Frischbeton besteht aus rund 2000 kg Gesteinskörnung (Kies und Sand), 300 kg Zement und 150 kg Wasser, wobei die Rezeptur je nach Verwendungszweck optimiert wird. Zusätzlich können dem Beton Zusatzmittel beigegeben werden, um spezifische Eigenschaften wie Porosität, Frühfestigkeit oder Verarbeitbarkeit zu verändern.

Nach dem Mischen wird der Frischbeton in die Schalung eingebracht und verdichtet. Dann erhärtet er unter Hydratation eines Teils des beigemischten Wassers. Dabei bindet der Zementstein die Gesteinskörnung, wodurch ein weitgehend homogenisierter Baustoff mit einer hohen Druckfestigkeit, jedoch geringer Zugfestigkeit, entsteht. Die Sollfestigkeit ist in der Regel nach 28 Tagen erreicht.

Betontragwerke werden jedoch nicht nur auf Druck beansprucht, sondern müssen auch Biegemomente aufnehmen können, zum Beispiel bei Balken- oder Deckentragwerken. Ein Biegemoment ist ein paralleles, gleich grosses Kräftepaar aus Druck- und Zugkraft in einem bestimmten Abstand. Damit eine Betonkonstruktion die Zugkräfte aufnehmen kann, wird auf der Zugseite der Betonkonstruktion eine Bewehrung aus Stahlstäben oder Spannstählen eingelegt. Somit ist eine Betonkonstruktion eine Verbundkonstruktion aus Beton und Stahl.

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen lassen sich in dieser Verbundkonstruktion in erster Linie auf den Beton zurückführen; graue Energie entfällt auf Beton und Bewehrungsstahl. Bei einer traditionellen Betondecke mit 18 cm Dicke und einem üblichen Anteil Bewehrung zeigen sich folgende Verhältnisse:<sup>1</sup>

- CO<sub>2</sub>-Ausstoss: Beton 75 Prozent, Bewehrung 25 Prozent.
- Graue Energie: Beton 54 Prozent, Bewehrung: 46 Prozent.

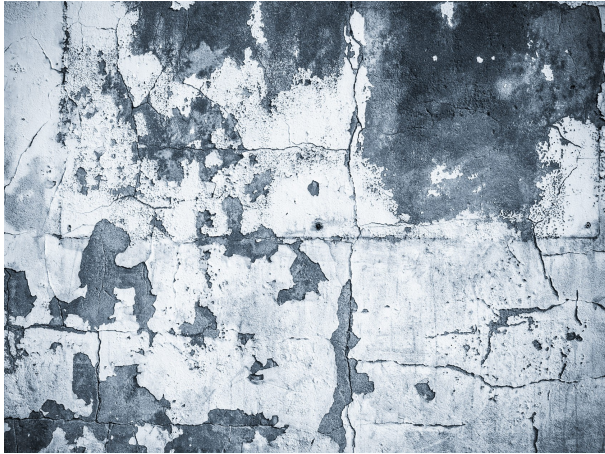
Massnahmen sind also sowohl beim Beton als auch bei der Bewehrung nötig.



### Anmerkungen und Referenzen

1 KBOB, IPB (2016), Ökobilanzen im Baubereich, Empfehlung 2009/1:2016,  
Koordinationskonferenz der öffentlichen Bauherren (KBOB) und Interessengemeinschaft  
privater professioneller Bauherren (IPB), Bern und Zürich

### 1.3.4. Auch Betonkonstruktionen altern



Betonkonstruktionen sind ausserordentlich beständig und langlebig. Dennoch altern sie. Das ist im Besonderen bei Betonkonstruktionen in einer feuchten Umgebung mit einer relativen Feuchtigkeit von über 80 Prozent der Fall. Dabei reagiert der alkalische Bestandteil des Zementsteins durch die Aufnahme von  $\text{CO}_2$  aus der Luft zu Kalziumkarbonat und Wasser [ $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ]. Dadurch reduziert sich der pH-Wert des Zementsteins von durchschnittlich 12,5 auf unter 10, wodurch der ursprünglich vorhandene Korrosionsschutz für den im Beton eingelegten Bewehrungsstahl weitgehend verloren geht. Folglich korrodiert der Bewehrungsstahl – und die damit verbundene Volumenvergrösserung führt zu Abplatzungen an der Betonoberfläche. Dies beschleunigt die Korrosion der Bewehrung zusätzlich.

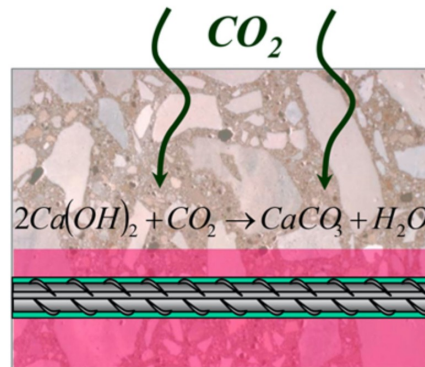
Darüber hinaus können weitere Effekte den Korrosionsvorgang verstärken, zum Beispiel ein erhöhter Gehalt an Natriumchlorid, der durch Streusalz bei Verkehrsbauten hervorgerufen wird. Fortgeschrittene Korrosion der Bewehrung führt zu einer unzulässigen Reduktion der Tragkraft von Betonkonstruktionen und schliesslich zum Kollaps.

Wie schnell die Korrosion abläuft, hängt vor allem von folgenden Faktoren ab:

- der oberflächennahen Betonfeuchte – am ungünstigsten sind 50 bis 70 Prozent;
- der Betonfestigkeit;
- der Betonporosität.

Bei Betonkonstruktionen, die der Witterung ausgesetzt sind – Sichtbetonfassaden, Brücken oder Stützmauern –, muss der Beton daher möglichst dicht und fest sein, und er darf nur wenige Haarrisse aufweisen. Bei Betonkonstruktionen im Trockenen, zum Beispiel im Gebäudeinnern, ist Korrosion in der Regel kein Problem.

Durch Karbonatisierung verursachte Korrosion in gewöhnlichen Stahlbetonstrukturen; zur Korrosion kommt es nicht, wenn der Beton keinem Wasser ausgesetzt ist, zum Beispiel in Innenräumen. Credits: Francesco Pittau.



Quelle: Projekt «Klinkerarmer Zement»

# CO<sub>2</sub> / Treibhausgase

### 1.3.5. Das Lebensende von Betonkonstruktionen



Betonkonstruktionen haben eine Lebensdauer – und damit ein Lebensende. Damit ist kein unkontrollierter Einsturz gemeint, wie er sich etwa bei der Morandi-Brücke in Genua ereignete, sondern der Zeitpunkt, zu dem die Gebrauchstauglichkeit oder die geforderte Sicherheitsmarge nicht mehr gewährleistet ist. In diesem Fall ist eine tief greifende Verstärkung oder der Ersatz der Konstruktion nötig. Welche der beiden Massnahmen besser geeignet ist, hängt vom Zustand der Konstruktion, von den ökologischen und betrieblichen Auswirkungen der Massnahme sowie der Wirtschaftlichkeit ab.

Da in der Regel nicht sämtliche Teile einer Betonkonstruktion das Lebensende gleichzeitig erreichen, sind in der Schweiz partielle Verstärkungen üblich. In der Schweiz besteht eine langjährige Tradition mit solchen partiellen Verstärkungsmassnahmen. Ersetzt wird eher dann, wenn dies neue Nutzungsanforderungen oder gesetzliche Rahmenbedingungen erfordern.

Bei Sanierungsprojekten muss ebenso wie bei Neubauten darauf geachtet werden, dass graue Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen so stark wie möglich vermieden werden – und der Ressourceneinsatz schonend erfolgt. Dabei ist zentral, zu welchem Zeitpunkt ein Sanierungsprojekt angesetzt wird: Zu früh ist unwirtschaftlich, zu spät kann verhängnisvoll sein. Trotz grosser Erfahrung in diesem Gebiet besteht auch in der Schweiz noch erhebliches Verbesserungspotenzial, etwa hinsichtlich der Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstosses und der Verbesserung der Dauerhaftigkeit. Die Forschungsergebnisse des Verbundprojekts «Energiearmer Beton» liefern dazu wichtige Grundlagen.



### 1.3.6. Fokus der Synthese



Die vorliegende Synthese fokussiert auf die Ergebnisse des Verbundprojekts «Energiearmer Beton» bzw. der zugehörigen Subprojekte «Klinkerarmer Zement»<sup>1</sup>, «Hochleistungs Beton»<sup>2</sup>, «Hybride Tragkonstruktionen»<sup>3</sup>, «Kohlefaser-vorgespannter Beton»<sup>4</sup> und «Monitoring von Betonkonstruktionen»<sup>5</sup>.

Gemeinsames Anliegen aller Forschungsgruppen war die substanzielle Reduktion der grauen Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses im Zusammenhang mit dem Bau, der Sanierung und dem Rückbau von Tragkonstruktionen aus Beton. Dabei stand die technische Machbarkeit im Vordergrund; die Wirtschaftlichkeit und die Akzeptanz wurden noch nicht vertieft behandelt.

#### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Projekt «Klinkerarmer Zement»
- 2 Projekt «Hochleistungs Beton»
- 3 Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»
- 4 Projekt «Kohlefaser-vorgespannter Beton»
- 5 Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»

## 1.4. Materialeigenschaften des Betons

Baustoffe binden viel graue Energie und sind für einen grossen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich. Diesem Umstand wurde bis anhin zu wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die



## **Energie**

Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

negativen Auswirkungen lassen sich aber drastisch reduzieren.

## 1.4.1. Aus gutem Grund Weltmeister



Beton – vor allem Stahlbeton – ist der weltweit am meisten verwendete Baustoff. Dafür gibt es gute Gründe:

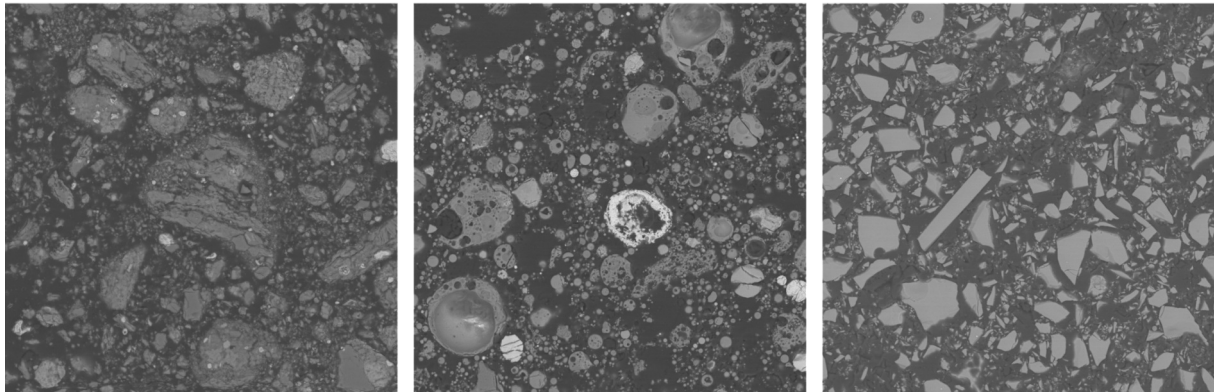
- Seine Komponenten lassen sich relativ einfach lokal herstellen.
- Betonbauteile können praktisch alle Formen annehmen.
- Die Verarbeitung auf der Baustelle erfordert keine besonderen Kenntnisse.
- Die Festigkeitsentwicklung ist hervorragend.
- Die Porosität ist gering.
- Der Baustoff ist sehr langlebig.
- Die Materialeigenschaften lassen sich mit Zusatzmitteln beinahe beliebig anpassen.
- Der Baustoff ist kostengünstig.

Dank dieser hervorragenden Eigenschaften lässt sich Stahlbeton auch nicht einfach durch ein anderes Material ersetzen.

Stahlbeton hat aber auch Nachteile: Bau, Sanierung und Rückbau von Betonkonstruktionen binden viel graue Energie und führen zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die grosse Herausforderung besteht darin, diese Nachteile so weit wie möglich zu eliminieren, ohne die hervorragenden Eigenschaften des Baustoffs zu beeinträchtigen.

# CO<sub>2</sub> / Treibhausgase

## 1.4.2. Zement mit weniger Klinker



**BSE (back scattered electrons) image of burnt oil shale (BOS), fly ash (FA) and slag embedded in epoxy resin.** *Quelle: ETHZ, Chair of Physical Chemistry of Building Materials*

Zementklinker ist der wichtigste Bestandteil von Zement. Er wird aus Kalkstein und Mergel gewonnen; das Gestein wird gebrochen und gemahlen und dann im Drehrohr- oder Schachtofen bei ca. 1450 °C durch Sinterung in Klinker umgewandelt. Dieser Prozess ist energieintensiv und emittiert viel CO<sub>2</sub>.

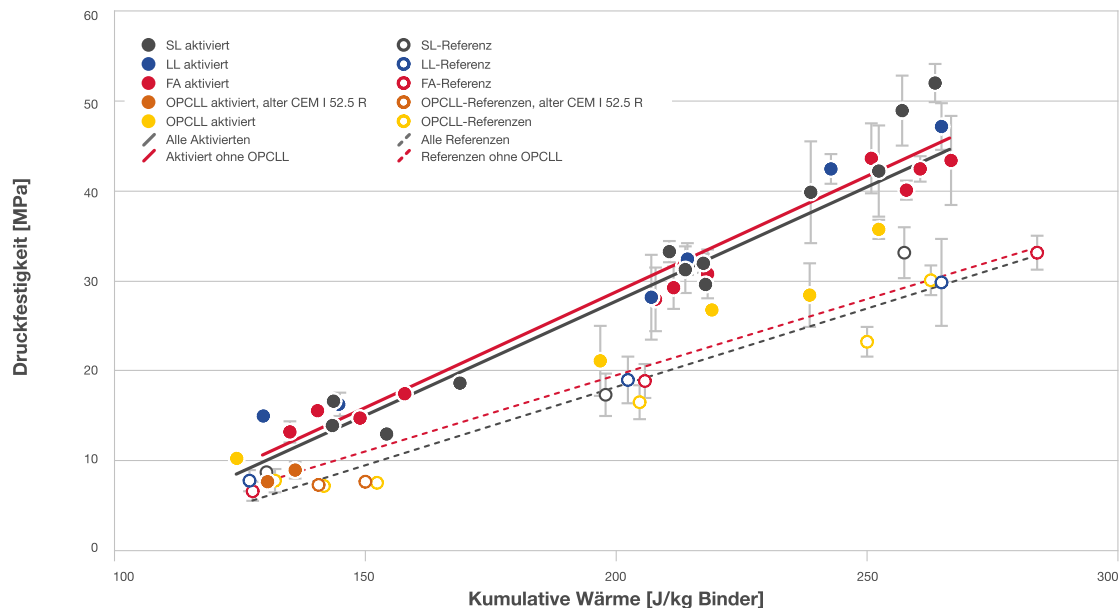
Um diese Nachteile zu verringern, wurde im Projekt «Klinkerarmer Zement»<sup>1</sup> ein Zement entwickelt, der bis zu 65 Prozent weniger Klinker erfordert als handelsüblicher Portlandzement (Typ CEM I). Der neuen Zementmischung (Typ CEM II/C) wurden 50 Prozent CEM I sowie Kalksteinmehl (Füller) und gebrannter Ölschiefer als zusätzliche zementartige Komponenten beigemischt. Diese neue Mischung kann mit den bestehenden Produktionsanlagen hergestellt werden und reduziert den CO<sub>2</sub>-Ausstoss auf rund die Hälfte.

Die wichtigsten Materialeigenschaften sind vergleichbar mit jenen von Portlandzement, da die Entwicklung der Frühfestigkeit durch chemische Zusatzmittel erheblich gesteigert werden konnte. Es bestehen jedoch noch Ungewissheiten hinsichtlich der Karbonatisierung und damit des Korrosionsrisikos der Stahleinlagen in sehr feuchter Umgebung mit einer relativen Feuchtigkeit über 80 Prozent. Es wird deshalb vorderhand empfohlen, den neuen Zement hauptsächlich im Innern von Gebäuden einzusetzen.

Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «**Klinkerarmer Zement**»

### 1.4.3. Hohe Frühfestigkeit dank chemischen Zugaben



**Einfluss der Zugabe von gering konzentrierten Alkalilösungen auf die Druckfestigkeit und die kumulative Wärmefreisetzung nach 7 Tagen im Vergleich mit Referenzmischungen ohne Aktivatoren. SL: Mischung mit 10 Prozent Schlacke. FA: Mischung mit 10 Prozent Flugasche. LL: Mischung mit 30 Prozent Kalksteinmehl. OPCLL: Mischung mit 50 Prozent Portlandzement und 50 Prozent Kalksteinmehl.**

Quelle: Projekt «Klinkerarmer Zement»

Im Projekt «Klinkerarmer Zement»<sup>1</sup> wurde der Einfluss von verschiedenen Aktivatoren – also «Anregern» wie moderat konzentrierten Alkalilösungen, Kalziumnitrat und Gips – auf die Entwicklung der Frühfestigkeit untersucht. Getestet wurden diese Zusätze an einer der neuen Zementmischungen mit 50 Prozent Portlandzement und 50 Prozent regional erhältlichen zementartigen Zusatzkomponenten wie 20 Prozent Kalksteinmehl, 20 Prozent gebranntem Ölschiefer und 10 Prozent Flugasche oder Schlacke.

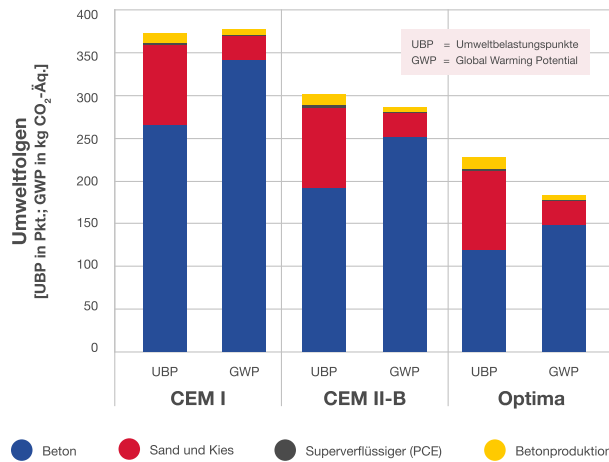
Die Analysen zeigten, dass diese Mischung unter Zugabe von Natriumhydroxid und Kalziumnitrat am besten abschnitt. Die 90-Tage-Festigkeit nahm um 14 bis 120 Prozent zu. Ebenso klar ging hervor, dass die Zunahme der Festigkeit eindeutig auf die Beimischung von gebranntem Ölschiefer zurückgeht. Zudem konnte nachgewiesen werden, dass der Ersatz von Flugasche und Schlacke durch Kalksteinmehl die Festigkeitsentwicklung nicht beeinflusst, wogegen die Mischung aus 50 Prozent Portlandzement und 50 Prozent Kalksteinmehl zu erheblichen Festigkeitseinbußen führt.

#### Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «Klinkerarmer Zement»

# CO<sub>2</sub> / Treibhausgase

### 1.4.4. Halbierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses



**Umweltfolgenabschätzung für 1 m<sup>3</sup> Beton.** *Quelle: Projekt «Energiearmer Beton»*

Um die Auswirkungen der neuen Zementmischung auf den CO<sub>2</sub>-Ausstoss und die graue Energie zu quantifizieren, wurde an zwei verschiedenen Zementmischungen eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt.<sup>1</sup> Basis der beiden Zemente war eine Mischung aus Portlandzement (CEM II), Kalksteinmehl und gebranntem Ölschiefer. Bei der einen Mischung (CEM II-B) wurden nur 60 Prozent Portlandzement verwendet, bei der anderen (OPTIMA) sogar nur 35 Prozent. Beiden Mischungen wurde ein speziell hergestellter Superverflüssiger beigegeben, um Frühfestigkeit und Langzeitverhalten zu verbessern.

Für die Lebenszyklusanalyse wurde einerseits die Methode der ökologischen Knappheit<sup>2</sup> angewendet, die mittels Ökofaktoren die Umweltbelastung einer Schadstoffemission bzw. einer Ressourcenentnahme in der Einheit «Umweltbelastungspunkte (UBP)» quantifiziert; andererseits wurde das globale Treibhauspotenzial (global warming potential)<sup>3</sup> mithilfe der CO<sub>2</sub>-Äquivalente bestimmt.

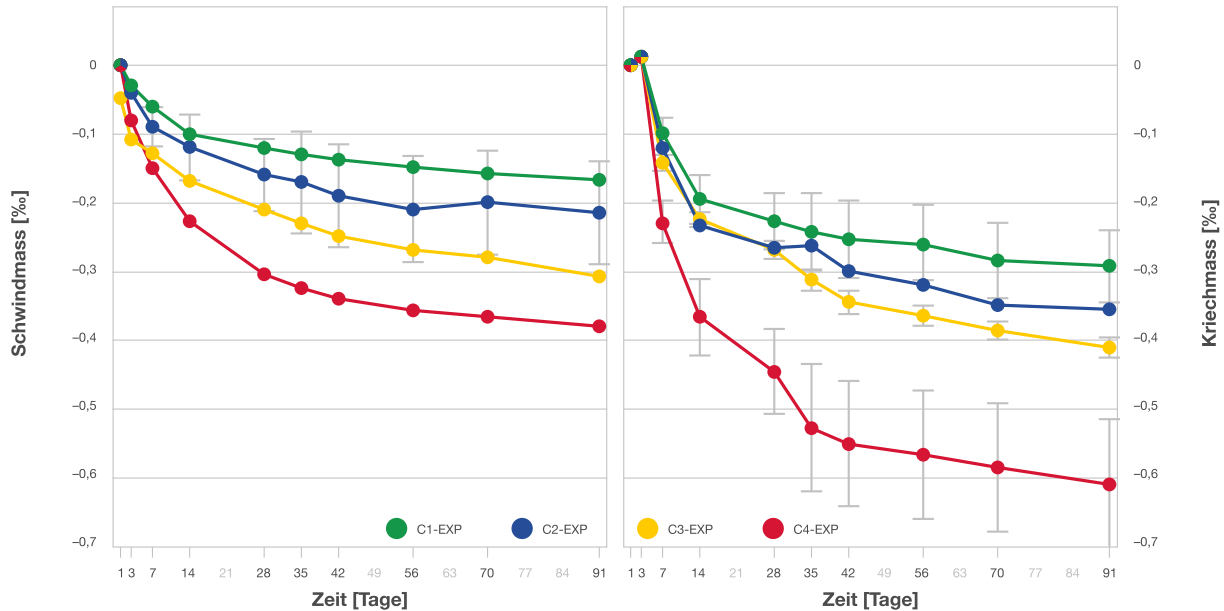
Die beiden Analysen zeigen, dass die neuen Zementmischungen beim fertigen Beton zu einer Reduktion der Umweltbelastung von 40 Prozent und einer Verringerung des globalen Treibhauspotenzials von 50 Prozent führen. Diese substantziellen Verbesserungen hinsichtlich der grauen Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses kommen zustande, ohne dass die Materialeigenschaften des Betons gross beeinträchtigt werden.

**Anmerkungen und Referenzen**

- 1 Projekt «Energiearmer Beton»
- 2 BAFU (2013), Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit, Bundesamt für Umwelt, Ittigen
- 3 [<https://www.unfccc.int>]

# CO2 / Treibhausgase

### 1.4.5. Nachhaltige Hochleistungszemente



**Schwindmass (links) und Kriechmass (rechts). Bei Messungen des Kriechmasses wurde die Last erhöht, um 20 Prozent der Druckfestigkeit nach 3, 7 und 28 Tagen zu entsprechen. C1 ist ein industrieller selbstverdichtender Hochleistungszement, wie er derzeit in der Schweizer Fertigteileindustrie eingesetzt wird. C2, C3 und C4 entsprechen der neu entwickelten Zementmischung. Quelle: Projekt «Hochleistungsbeton»**

Zur Vermeidung von Korrosion bei im Spannbett vorgespannten Betonelementen werden vermehrt kohlefaserverstärkte Polymere anstatt Spannstählen eingebaut. Um die Produktionskosten zu senken sowie ein rasches Ausschalen zu ermöglichen, kommen dabei selbstverdichtende Hochleistungszemente zum Einsatz. Dabei werden hohe Werte für graue Energie und CO<sub>2</sub>-Ausstoss erreicht.

Um dies zu beheben, wurde im Projekt «Hochleistungsbeton»<sup>1</sup> ein Hochleistungszement mit einem sehr geringen Karbonatanteil entwickelt. Bis zu 70 Prozent des Portlandzements wurden durch Metakaolin, Mikrosilika und Kalksteinmehl ersetzt, der Wasser/Zement-Wert wurde bis auf 17 Prozent reduziert. Die Selbstverdichtung liess sich mit einer stark erhöhten Zugabe von Superverflüssigern gewährleisten. Mit dieser umweltverträglicheren Zementmischung wurde eine Betondruckfestigkeit von 80 MPa und eine Verbundzugfestigkeit zwischen dem Beton und den sandbeschichteten kohlefaserverstärkten Polymeren von 20 MPa erzielt. Diese Werte entsprechen den Festigkeiten handelsüblicher Hochleistungszemente.

Zudem zeigten FEM-Berechnungen und Versuche, dass die neue Zementmischung ein wesentlich geringeres Kriech- und Schwindmass aufweist als die üblichen Hochleistungszemente. Das hat deutlich geringere Vorspannverluste und damit geringere



Kosten zur Folge – bei gleichzeitiger Halbierung der grauen Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses.

Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «Hochleistungsbeton»

## 1.5. Betonkonstruktionen ohne Stahl

Die Herstellung und der Transport der Bewehrungs- und Spannstähle für Betonkonstruktionen beanspruchen sehr viel Energie. Es gibt aber innovative Möglichkeiten, Betonkonstruktionen ohne Stahl zu bauen.



### 1.5.1. Stahl als Energiefresser



Beton weist eine hervorragende Druckfestigkeit auf – aber eine nur sehr beschränkte Zugfestigkeit. Bei traditionellen Betonkonstruktionen wie Fundamenten, Wänden, Stützen, Balken und Decken müssen daher Bewehrungsstähle oder Spannstähle eingebaut werden, um die auftretenden Zugkräfte aufzunehmen.

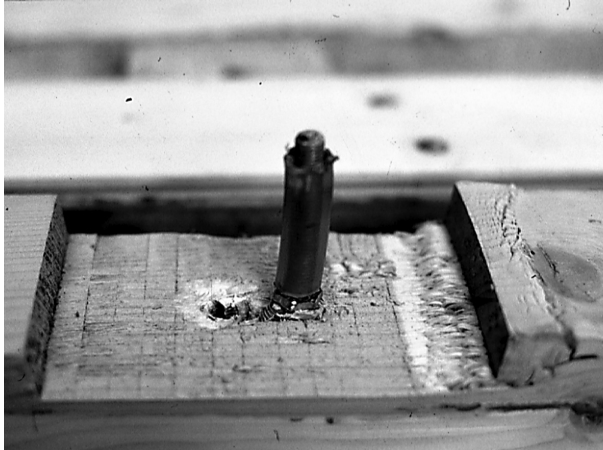
Die Herstellung von Stahl – vor allem von hochwertigem Bewehrungs- und Spannstahl – ist äusserst energieintensiv. Zudem muss die Stahlbewehrung vom Stahlwerk über relativ lange Strecken zu den Stahlhändlern und von dort zu den über das ganze Land verteilten Baustellen transportiert werden, was zusätzlich Energie benötigt. Die Bewehrungs- und Spannstähle enthalten also eine erhebliche Menge grauer Energie, wenn sie auf der Baustelle eintreffen. Beim Bewehrungsstahl sind das zum Beispiel 3,55 Rohöläquivalente/kg (ohne Transport). Zum Vergleich: Luftgetrocknetes, gehobeltes einheimisches Nadelholz enthält lediglich 0,69 Rohöläquivalente/kg.<sup>1</sup> Es ist aus ökologischer Sicht deshalb sinnvoll, den in Betonkonstruktionen enthaltenen Stahl zu minimieren oder ganz zu eliminieren.

#### Anmerkungen und Referenzen

1 KBOB, IPB (2016), Ökobilanzen im Baubereich, Empfehlung 2009/1:2016, Koordinationskonferenz der öffentlichen Bauherren (KBOB) und Interessengemeinschaft privater professioneller Bauherren (IPB), Bern und Zürich

# Holz

## 1.5.2. Holz statt Stahl



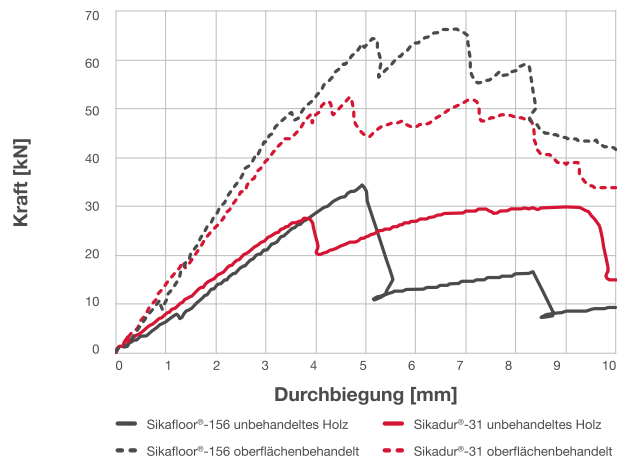
Das Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»<sup>1</sup> verfolgte einen innovativen Ansatz zur Vermeidung der Stahlbewehrung in Betondecken. Das Prinzip des Ansatzes besteht darin, dass die unten liegende Bewehrung durch eine Schicht Buchenfurnierschichtholz ersetzt wird, welche die Zugkräfte an der Deckenunterseite aufnimmt und während des Baus als Schalung wirkt. Auf dieses Buchenfurnierschichtholz wird eine relativ dünne Schicht Beton aufgebracht, welche die Druckkräfte an der Oberseite übernimmt; Holz und Beton müssen aber steif miteinander verbunden sein.

Diese Technik wird bei der Sanierung historischer Gebäude bereits seit mehreren Jahren angewendet. Denn solche Hybriddecken weisen gegenüber der konventionellen Holzdecke zahlreiche Vorteile auf, etwa einen besseren Trittschallschutz, einen höheren Brandwiderstand und eine kürzere Bauzeit. Es gibt aber auch Nachteile: Um den schlupflosen Verbund zwischen Holz und Beton zu gewährleisten, braucht es eine grosse Anzahl kräftiger Metalldübel. Das führt zu lokalen Spannungsspitzen und Korrosionsrisiken. Zudem eignen sich die heute üblichen Hybriddecken nur für einseitig gespannte Deckenfelder mit durchgehenden Balken als Auflager. Dieser erhebliche Nachteil schränkt die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten ein und verhindert eine breite Anwendung.

### Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «Klinkerarmer Zement»

### 1.5.3. Kleben statt dübeln



**4-Punkt-Biegeversuche von Holz-Beton-Verbundproben mit Sikafloor®-156 und Sikadur®-31 sowie behandelten und unbehandelten Holzoberflächen. Das Diagramm zeigt Referenzkurven von 10 Messungen.** *Quelle: Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»*

Damit bei den hybriden Holz-Beton-Verbunddecken<sup>1</sup> auf die problematischen Metalldübel verzichtet werden kann, wurde im Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»<sup>2</sup> eine neuartige Klebeverbindung entwickelt. Diese Technik beruht auf einer Hydrophobierung der Holzoberfläche mit handelsüblichen Polysilanen, um das Eindringen des Klebers in das Holz zu verhindern, und einem epoxybasierten Kleber. Mit dieser Klebschicht wird gleichzeitig das Eindringen von freiem Porenwasser aus dem Beton ins Buchenfurnier verhindert.

Um das Tragverhalten in der Fuge zwischen Buchenfurnier und Beton besser zu verstehen und optimieren zu können, wurden im Projekt «Hybride Tragkonstruktionen» zahlreiche Versuche im Massstab 1:1 mit zwei verschiedenen Klebern an vorbehandeltem und nicht vorbehandeltem Buchenholz durchgeführt. Sie zeigten, dass die beiden Kleber zu einem vergleichbaren Tragverhalten führen, während die Unterschiede zwischen den Proben mit den vorbehandelten und den nicht vorbehandelten Holzoberflächen beträchtlich sind. Im Weiteren trägt die Vorbehandlung zu einer stärkeren chemischen und mechanischen Verzahnung bei. Ausziehversuche zeigten, dass der Bruch zwischen Holz und Beton spröde erfolgt, da die geklebte Verbindung mit Epoxyharz nicht zu einem duktilen Bruchverhalten beiträgt. Für die praktische Anwendung wäre jedoch ein duktiler Bruchverhalten von grossem Vorteil.

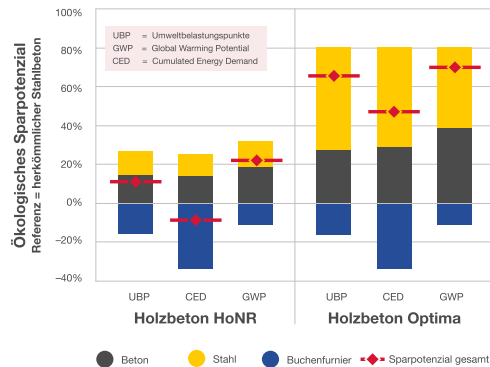
#### Anmerkungen und Referenzen

1 Holz statt Stahl

2 Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»

# Holz # CO2 / Treibhausgase

## 1.5.4. 70 Prozent weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen



**Umweltfolgenabschätzung für 1 m<sup>2</sup> Holz-Beton-Verbunddecke im Haus der natürlichen Ressourcen (HoNR) und mit dem neuen Hochleistungszement Optima mit 40 Prozent Klinker. Referenz ist eine konventionelle Stahlbetondecke mit 100 Prozent Portlandzement. Quelle: Projekt «Energiearmer Beton»**

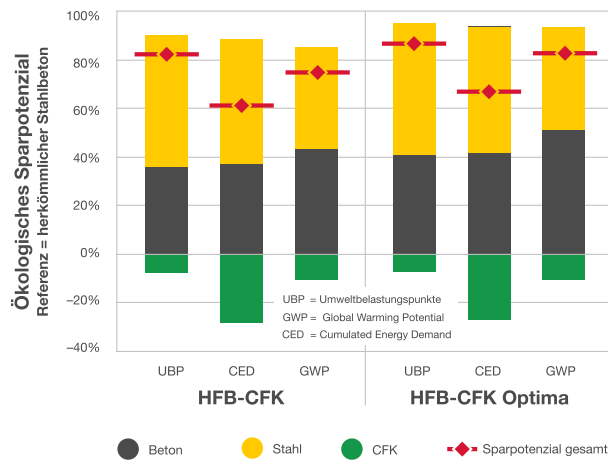
Die Weiterentwicklung der Holz-Beton-Verbunddecke<sup>1</sup> im Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»<sup>2</sup> führte zu erstaunlichen Ergebnissen: Lebenszyklusanalysen zeigen, dass bei Verwendung von Hochleistungszement Optima mit nur 40 Prozent Portlandzement die kumulierte graue Energie (CED) um rund 50 Prozent und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um rund 70 Prozent gesenkt werden können, verglichen mit einer konventionellen Stahlbetondecke. Auch die Umweltbelastungspunkte (UBP) nach der Methode der ökologischen Knappheit reduzieren sich um gut 60 Prozent.

Das gleiche Forschungsteam implementierte und testete erste Holz-Beton-Verbunddecken bereits 2014 beim Demonstrationsobjekt «Haus der natürlichen Ressourcen (HonR)»<sup>3</sup> auf dem Campus Höggerberg der ETH Zürich. Dabei wurde Buchenurnierschichtholz mit 40 mm Dicke als Schalung und untere Bewehrung verwendet. Im Überbeton mit einer Dicke von 120 bis 160 mm wurde etwas Bewehrungsstahl eingesetzt, und die Schubverbindung zwischen Holz und Beton wurde mittels Verzahnung mit ins Holz eingefrästen Kerben sichergestellt. In Anbetracht des nach wie vor relativ hohen Stahlgehalts dieser Konstruktion sind die umweltrelevanten Einsparungen deutlich geringer. Die Weiterentwicklung dieser Technologie im Rahmen des NFP «Energie» brachte also substantielle Verbesserungen.

### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Holz anstatt Stahl
- 2 Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»
- 3 <https://honr.ethz.ch>

## 1.5.5. Kohlefaserverstärkte Polymere statt Stahl



**Umweltfolgeabschätzung für 1 m<sup>2</sup> Kohlefaser-vorgespannten Hochleistungsbeton mit Hochleistungszement Optima und 40 Prozent Klinkeranteil. Referenz ist konventioneller Stahlbeton mit 100 Prozent Portlandzement.** *Quelle: Projekt «Energiearmer Beton»*

Eine weitere Möglichkeit, um Stahl gänzlich aus Betonkonstruktionen zu verbannen, besteht im Ersatz des Bewehrungs- und des Spannstahls durch kohlefaserverstärkte Polymere. Diese Technik wird seit mehreren Jahren bereits mit Erfolg praktiziert, vor allem bei im Spannbett vorgespannten Betonelementen und zur Verstärkung bestehender Betontragkonstruktionen. Bis anhin schenkte man dabei den umweltrelevanten Aspekten jedoch kaum Beachtung.

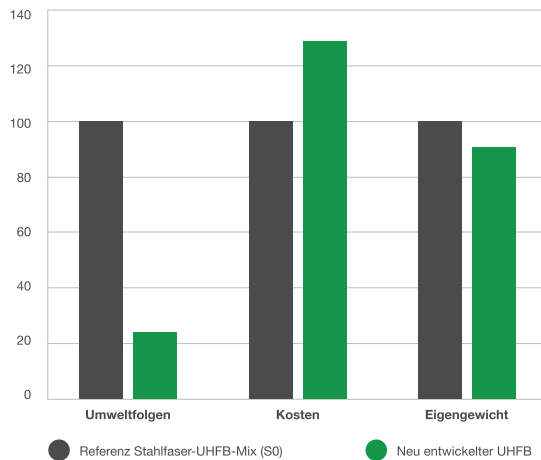
Um diese Lücke zu schliessen, wurde im Rahmen des Projekts «Kohlefaser-vorgespannter Beton»<sup>1</sup> eine neue Generation von Kohlefaser-vorgespannten Balken entwickelt. Einerseits wurden in den Spanngliedern ultrahochfeste Karbonfasern eingesetzt, andererseits wurden die neu entwickelten Zementmischungen<sup>2</sup> verwendet, bei denen bis zu 60 Prozent des Portlandzements durch Kalksteinmehl und Metakaolin ersetzt werden. Umfangreiche Grossversuche im Labor haben gezeigt, dass diese neue Bauart – im Vergleich zu konventionellen Lösungen – zu höheren Traglasten, geringeren Durchbiegungen und kleineren Rissweiten führt.

Neben den mechanischen Vorteilen erzielen die neu entwickelten Kohlefaser-vorgespannten Betonbalken grosse umweltrelevante Verbesserungen: Im Vergleich zu einem konventionell bewehrten Stahlbetonbalken lassen sich mit der neuen Bauart und bei Verwendung der Zementmischung Optima die graue Energie um gegen 70 Prozent und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss um gut 80 Prozent reduzieren.

### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Projekt «Kohlefaser-vorgespannter Beton»
- 2 Zement mit wenig Klinker

### 1.5.6. Polyethylenfasern statt Stahl



**Vergleich von Umweltfolgen, Preis und Eigengewicht des neu entwickelten Ultra-Hochleistungs-Faserbetons und eines konventionellen Stahlfaserbetons.** *Quelle: Projekt «Hochleistungsbeton»*

Für spezielle Anwendungen werden Betonkonstruktionen nicht mit Stabstählen oder Spanngliedern bewehrt, sondern mit homogen und ungerichtet verteilten Stahlfasern (Länge ca. 35 mm, Durchmesser ca. 0,6 mm, Menge ca. 25–35 kg/m<sup>3</sup> Beton). Stahlfaserbeton wird heute vor allem für hoch belastete Bodenbeläge, als Spritzbeton im Tunnelbau und für vorfabrizierte Elemente eingesetzt.

Im Rahmen des Projekts «Hochleistungsbeton»<sup>1</sup> wurde ein Ultra-Hochleistungs-Faserbeton entwickelt. Einerseits werden dafür die Stahlfasern vollständig durch hochwertige Polyethylenfasern ersetzt, andererseits kommt ein Hochleistungszement zum Einsatz, bei dem 50 Prozent des Klinkers durch Kalksteinmehl substituiert sind. Dieser Polyethylen-faserbewehrte Beton weist eine ähnliche elastische Grenzspannung auf wie Stahlfaser-bewehrter Beton, und er erfüllt die Anforderungen der Sorte UA gemäss dem Merkblatt SIA 2052<sup>2</sup>. Dieser neue Beton hat sich im Rahmen der Sanierung der Brückenplatte des Viadukts von Chillon bereits bestens bewährt und erfreut sich in der Schweiz zunehmender Beliebtheit.

Im Vergleich zum Stahlfaser-bewehrten Beton weist der Polyethylenfaser-bewehrte Beton jedoch rund 75 Prozent weniger graue Energie und eine um rund 10 Prozent geringere Dichte auf. Demgegenüber sind die aktuellen Marktpreise rund 30 Prozent höher.

#### Anmerkungen und Referenzen

<sup>1</sup> Projekt «Hochleistungsbeton»

<sup>2</sup> SIA (2016), Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung, SIA-Merkblatt 2052:2016, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich



## 1.6. Optimale Erhaltungsstrategie

Werden Betonkonstruktionen länger genutzt, reduzieren sich die im Durchschnitt pro Jahr anfallende graue Energie und die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Nötig sind dafür besondere Verfahren und Baustoffe.

### 1.6.1. Sparen durch längere Nutzung



Bei Bauwerken lässt sich grundsätzlich am meisten sparen, wenn sie möglichst lang genutzt und nicht gleich bei den ersten Altersbeschwerden durch einen Neubau ersetzt werden – selbst dann, wenn ein Neubau gegenüber dem alternden Bauwerk gewisse Vorteile hätte. Eingespart wird durch die Strategie des Abwartens nicht nur Geld, sondern auch graue Energie und CO<sub>2</sub>.

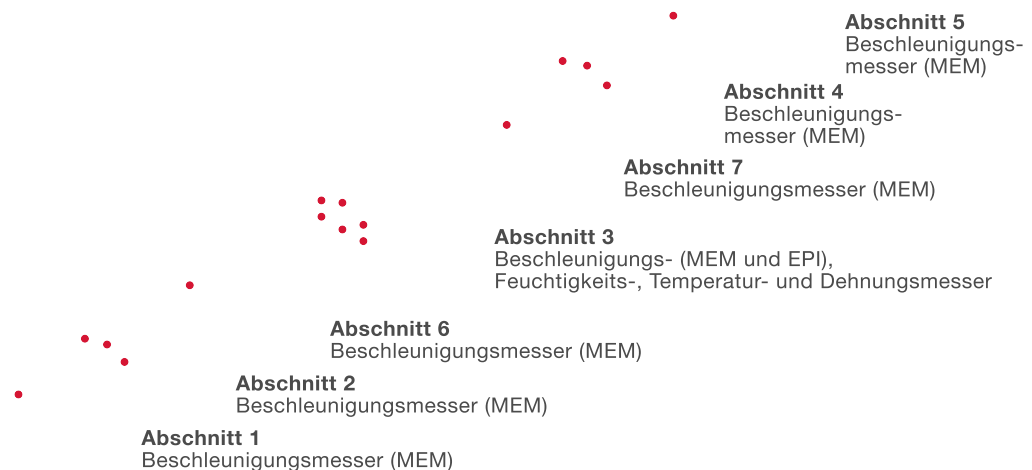
Der Grundsatz «Sparen durch längere Nutzung» gilt in erster Linie für Infrastrukturbauten wie Wasser- und Abwassersysteme, Stromnetze, Bahnlinien, Strassen, Brücken, Tunnel usw., die relativ niedrige Betriebskosten und geringe Emissionen aufweisen. Gespart werden natürlich nur Kosten und Emissionen, die von den Bauwerken selbst ausgehen und die nicht im Zusammenhang mit deren Nutzung stehen.

Bei Gebäuden präsentiert sich die Sachlage etwas anders: Schlecht isolierte Gebäude mit überalterter und fossil betriebener Gebäudetechnik weisen bekanntlich einen hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoss und kontinuierlich steigende Betriebskosten auf. Deshalb ist bei Gebäuden eine Gesamtanalyse angezeigt, bei welcher der Aufwand für den Betrieb, die energetische Sanierung und den Rückbau der bestehenden Bausubstanz mit jenem eines Neubaus verglichen wird.

Damit Infrastrukturbauten länger genutzt werden können, braucht es eine optimale Strategie. Grundlagen dafür sind der aktuelle Zustand des Bauwerks, eine Prognose über die Zustandsentwicklung sowie fundierte Vorstellungen zu allfälligen Sofort- und längerfristigen Massnahmen.



## 1.6.2. Neue Grundlagen für eine saubere Diagnose



### **Instrumentierung eines halben Brückenfeldes des Chillon-Viadukts.** *Quelle: Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»*

Geht es um die Sanierung oder Erneuerung von Infrastrukturbauten, sind umfassende und zuverlässige Diagnosen entscheidend. In der Verantwortung stehen dabei Behörden auf Stufe Bund, Kanton und Gemeinde – und zunehmend auch private Organisationen, etwa im Rahmen von Public Private Partnerships.

Früher wurden Diagnosen anhand von Begehungen und visuellen Kontrollen gestellt, heute sind die Prozesse weit komplizierter und anspruchsvoller. Dabei werden zum Beispiel Hightech-Messmethoden, denkende Dinge (IoT), Drohnen sowie viel Informatik und Kommunikationstechnologien angewendet.

Im Rahmen des Projekts «Monitoring von Betonkonstruktionen»<sup>1</sup> wurde ein umfassendes Monitoringsystem entwickelt und bei der umfassenden Sanierung des 1966 bis 1969 erstellten Chillon-Viadukts praktisch erprobt. Die imposante Strassenbrücke ist 2100 Meter lang und führt als vorgespannter Durchlaufträger über 23 Felder mit Spannweiten zwischen 42 und 108 Metern. Die zunehmenden Probleme mit Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) am Beton und die damit verbundenen Schäden an der Fahrbahnplatte machten eine umfassende Sanierung nötig.

An einem der Felder wurde vor Beginn der Sanierungsarbeiten ein Messsystem mit vier Dehnungs-, elf Beschleunigungs- und je einem Temperatur- und Feuchtigkeitsmesser installiert. Damit liessen sich unzählige dynamische Belastungen, Dehnungen, Steifigkeitswerte und Klimadaten messen, die online dem Auswertungsteam an der ETH Zürich übermittelt wurden.



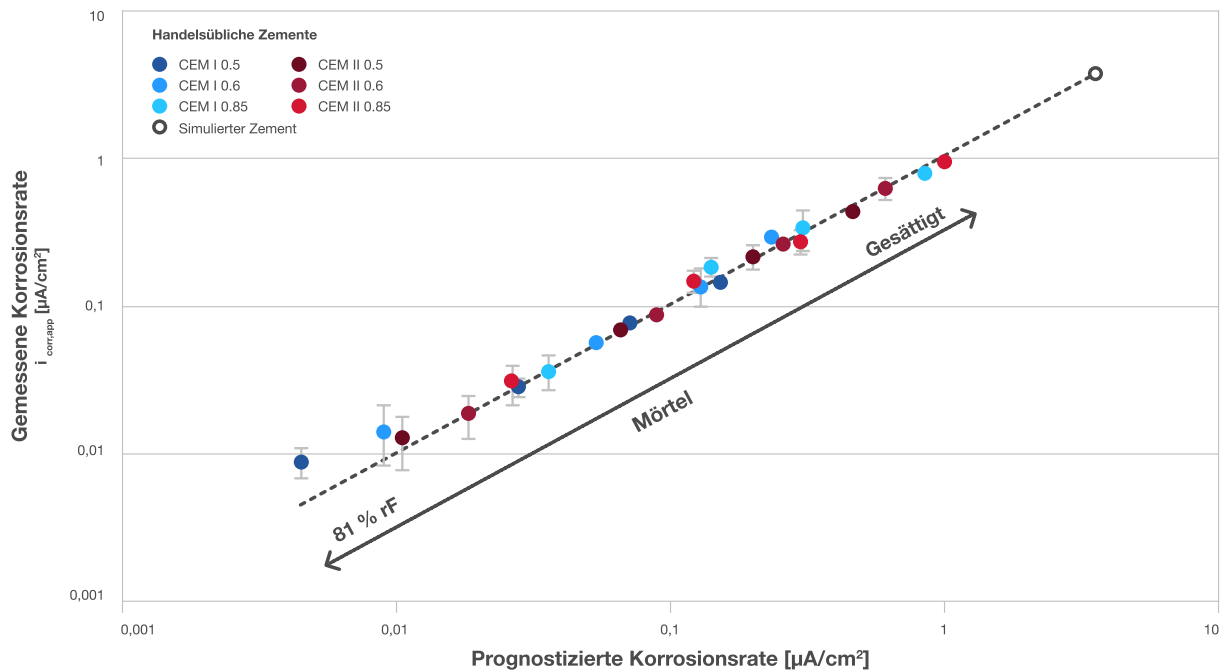
## Energie

Nationale Forschungsprogramme 70 und 71

### Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «**Monitoring von Betonkonstruktionen**»

### 1.6.3. Untersuchungen von Materialproben



**Korrosionskurve von Stahl in porösen Medien. Das Diagramm zeigt, wie mit dem vorgeschlagenen theoretischen Modell die gemessenen Korrosionsraten zuverlässig vorhergesagt werden können. Marker = Durchschnittswerte, Whisker-Plot = Standardabweichungen.** *Quelle: Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»*

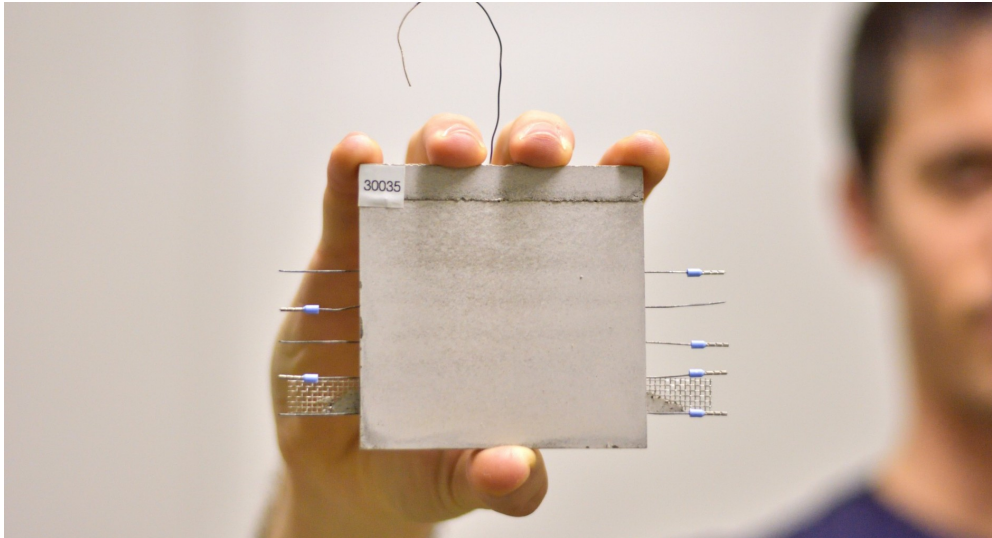
Um die Schäden an der Fahrbahn des Chillon-Viadukts korrekt zu interpretieren und die adäquaten Sanierungsmassnahmen zu treffen, wurden der Brücke unzählige Materialproben für Laboruntersuchungen entnommen. Dies war nötig, weil die üblichen Verfahren zum Messen der Korrosion an einbetoniertem Betonstahl – wie die ohmsche Widerstandsmessung oder die kathodische Korrosionskontrolle – keine zuverlässigen Ergebnisse liefern.

Im Rahmen des Projekts «Monitoring von Betonkonstruktionen»<sup>1</sup> wurde eine neue Methode zur Messung der Stahlkorrosion in karbonisiertem Mörtel entwickelt. Versuchsanlage ist eine kleine Mörtelprobe (8 × 8 × 0,6 cm), die mit einer Referenzelektrode, fünf Elektroden aus normalem Stahldraht und einer Gegenelektrode aus rostfreiem Stahl versehen ist. Die dünne Mörtelprobe erlaubt bei 57 Prozent Raumfeuchte und 4 Prozent CO<sub>2</sub>-Gehalt eine vollständige Karbonatisierung innerhalb einer Woche. Gemessen werden der elektrische Widerstand, das Korrosionspotenzial und die Korrosionsrate des Stahls sowie die Sauerstoffdiffusion und der Sauerstoffverbrauch. Mit diesen Daten kann die karbonatisierungsinduzierte Korrosion untersucht werden, vor allem auch deren Dynamik. Dabei wurde für jede Probe ein linearer Zusammenhang zwischen der Korrosionsrate und dem Wassergehalt festgestellt. Das entwickelte Modell stützt sich auf zwei Parameter: die Porenstruktur des Mörtels und die Umgebungsfeuchtigkeit.

Mit diesem Ansatz liess sich der Einfluss der verschiedenen Betonmischungen auf die Korrosion des Betonstahls zuverlässig quantifizieren. Dabei bestätigte sich, dass Betons mit

einem substanzialen Ersatz von Portlandzement durch andere Binder (CEM II) keine wesentlich höhere Korrosionsrate zur Folge haben als jene mit den üblichen Mischungen (CEM I). Dagegen ergaben die Analysen auch, dass die Beimischung von aktivierenden oder beschleunigenden Zusätzen die Korrosionsanfälligkeit deutlich – und zwar proportional zur Dosierung – erhöht.

Bild der kleinen Betonprobe. Zu beachten ist das Fehlen von Rissen und Lunkern in der Oberfläche der Probe.



Quelle: Projekt «[Monitoring von Betonkonstruktionen](#)»

#### Anmerkungen und Referenzen

1 Projekt «[Monitoring von Betonkonstruktionen](#)»

## 1.6.4. Von der Diagnose zur Behandlung



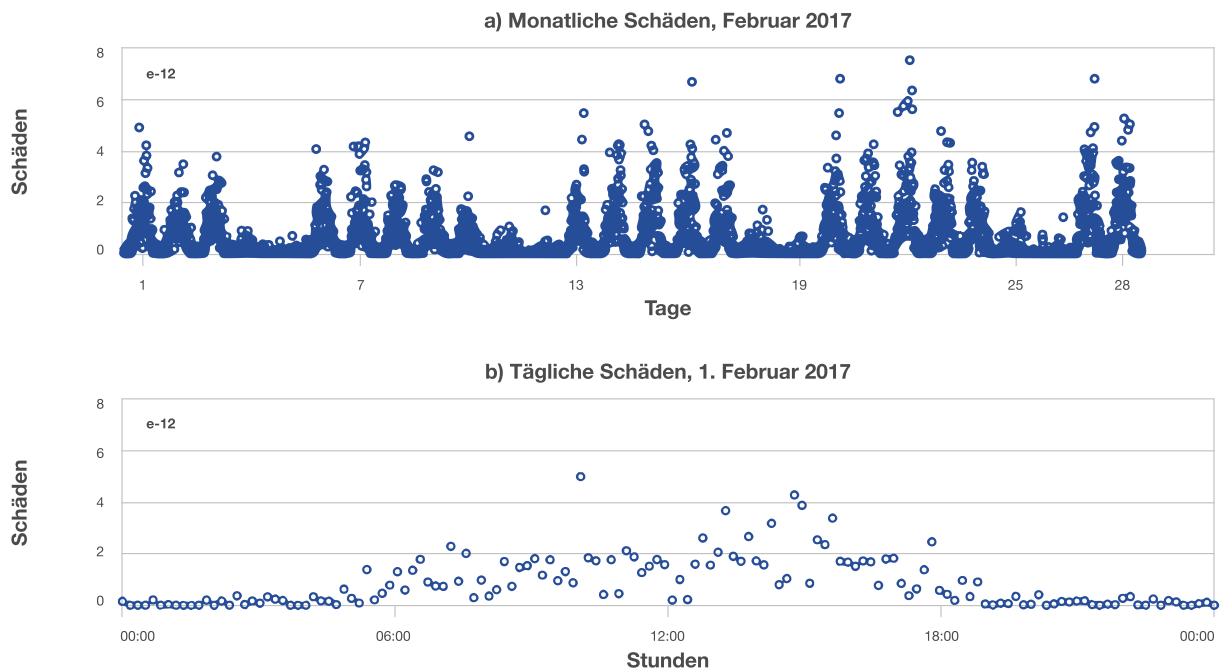
Zur Diagnose des aktuellen Zustands des Chillon-Viadukts wurden unzählige Messungen am Bauwerk sowie Laborversuche durchgeführt. Sie ergaben eindeutig, dass die beschädigten Stellen an der Brückenseite grossflächig ausgeräumt werden müssen und es anschliessend eine neue Deckschicht braucht. Diese Deckschicht mit einer Dicke von 40 mm wurde mit dem im Rahmen des Projekts «Monitoring von Betonkonstruktionen»<sup>1</sup> neu entwickelten Ultra-Hochleistungs-Faserbeton mit Polyethylenfasern<sup>2</sup> ausgeführt. Da dieser neue Beton auch langfristig eine hohe Dichtigkeit aufweist, konnte auf eine konventionelle Abdichtung verzichtet werden. Das führte zu substantiellen Zeitgewinnen und Kosteneinsparungen, zudem wurde graue Energie eingespart und der CO<sub>2</sub>-Ausstoss reduziert – verglichen mit den Werten bei der Anwendung eines konventionellen Stahlfaserbetons.<sup>3</sup>

In der Zwischenzeit wurden die neu entwickelten Mess- und Testkonzepte sowie der neue Ultra-Hochleistungs-Faserbeton auch bei anderen Bauwerken eingesetzt und weiter analysiert. So zum Beispiel bei der Sanierung der Buna-Eisenbahnbrücke in Kroatien oder beim Umbau des Du-Pont-Hauses, eines 8-stöckigen Gebäudes aus dem Jahr 1913 im Zentrum von Zürich, wo die Geschossdecken mit einer Schicht des neuen Ultra-Hochleistungs-Faserbetons mit 4 cm Dicke verstärkt wurden.

### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Projekt «**Monitoring von Betonkonstruktionen**»
- 2 **Polyethylenfasern statt Stahl**
- 3 **Polyethylenfasern statt Stahl**

## 1.6.5. Die Nachkontrolle



**Detail der Schadensakkumulation für den Längsdehnmessstreifen: für a) Monat und b) Tag. Dies veranschaulicht, dass die Beanspruchung an Arbeitstagen und in Hauptverkehrszeiten ausgeprägter ist.** *Quelle: Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»*

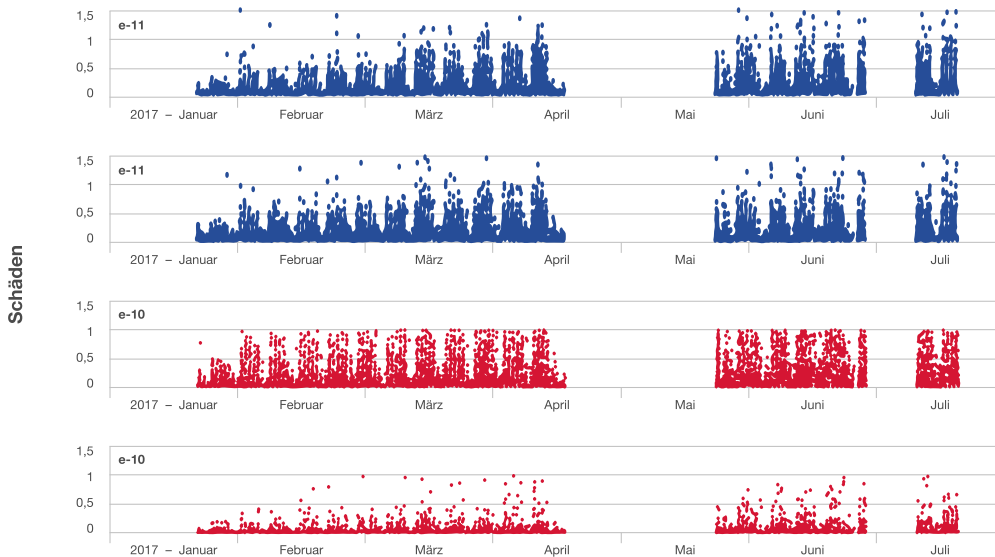
Mit den im Rahmen des Verbundprojekts «Energiearmer Beton» entwickelten Baustoffen und Verfahren wurden ungeahnte Potenziale zur Einsparung von grauer Energie und zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen theoretisch erschlossen und praktisch genutzt. Vor allem dort, wo diese Forschungsergebnisse an konkreten Bauvorhaben grossmassstäblich eingesetzt wurden, muss das erwartete langfristige Verhalten aber noch nachgewiesen werden.

Dazu sind die an den Bauwerken installierten Messsysteme unerlässlich. Beim Chillon-Viadukt wurde in der Periode von Mitte Mai bis Ende Juni 2017, also nach Abschluss der Sanierungsarbeiten, eine erste Messreihe aufgenommen und danach ausgewertet. Die Auswertungen waren zum Zeitpunkt des Projektabschlusses im Frühjahr 2018 noch im Gange. Erste Ergebnisse liegen jedoch bereits vor, zum Beispiel von den Beschleunigungsmessungen und den daraus abgeleiteten Frequenzen. Sie erlauben eine Aussage über den «gesunden» Zustand der Brücke und allfällige Schäden. Von den Dehnungsmessungen konnten die kumulierten Beanspruchungen hergeleitet werden, eine wichtige Grösse zur Beschreibung des wirklichen Tragverhaltens unter realen Bedingungen. Diese Messungen zeigten ein plausibles Verhalten der Brücke, indem die Beanspruchungen in den warmen Jahreszeiten, an Werktagen und tagsüber grösser waren als während der übrigen Zeit.

Im Mai 2018 wurde bei einem weiteren Brückenfeld eine vergleichbare Messausrüstung installiert – mit dem Ziel, anhand von eigens dafür definierten Indikatoren das

Langzeitverhalten der Sanierungsmassnahmen und deren Auswirkungen auf das gesamte Brückenbauwerk quantitativ erfassen zu können. Ergebnisse liegen noch nicht vor.

Abschätzung der akkumulierten Beanspruchungen bzw. Schäden anhand der Längsdehnungs- (blau) und der Querdehnungsmessstreifen (rot).



Quelle: Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»

## 1.7. Handlungsbedarf

## 1.7.1. Handlungsbedarf in Forschung und Entwicklung



Bei den Forschungen im Verbundprojekt «Energiearmer Beton» handelt es sich zum Teil um Grundlagenforschung mit einem niedrigen Technologiereifegrad. Es braucht deshalb weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen.

So muss zum Beispiel der im Labor entwickelte Aktivator zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit und der Frühfestigkeit von klinkerarmem Beton – der Superverflüssiger – durch Bauchemieunternehmen hochkaliert und marktfähig gemacht werden.<sup>1</sup> Auch die bei klinkerarmem Beton im Vergleich mit einem normalen Portlandzementbeton beschleunigte Karbonatisierung muss weiter untersucht und beherrscht werden<sup>2,3</sup>, damit diese nachhaltigen Betonsorten auch bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 80 Prozent ohne Korrosionsrisiko eingesetzt werden können.

Bei den Holz-Beton-Verbunddeckern<sup>4</sup> muss die Schubübertragung mittels Kleber zwischen dem Buchenbrett und dem Überbeton duktiler ausgestaltet werden. Bei den faservorgespannten Balken<sup>5</sup> ist es unerlässlich, die Scherfestigkeit zwischen den Spanngliedern aus Polyethylenfasern und dem Beton zu erhöhen.

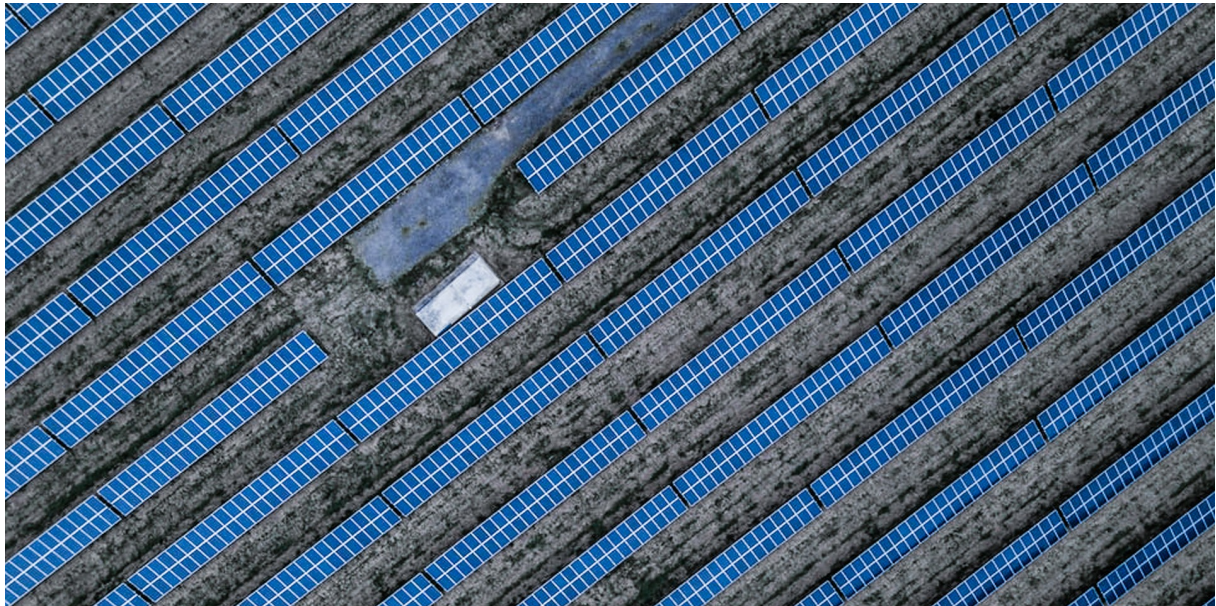
Erst wenn diese Herausforderungen praxistauglich und wirtschaftlich gelöst sind, wird der Markteintritt der neuen Materialien und Konstruktionen im grossen Umfang gelingen.

### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Projekt «Klinkerarmer Zement»
- 2 Projekt «Klinkerarmer Zement»
- 3 Untersuchungen von Materialproben
- 4 Projekt «Hybride Tragkonstruktionen»
- 5 Projekt «Kohlefaser-vorgespannter Beton»



## 1.7.2. Handlungsbedarf in der Praxis



Trotz der zum Teil noch niedrigen Technologiereifegrade der im Verbundprojekt «Energiearmer Beton» entwickelten Baustoffe, Konstruktionen und Verfahren besteht bereits Handlungsbedarf in der Praxis. Im Vordergrund stehen dabei folgende drei Bereiche:

### **Pilot- und Demonstrationsobjekte**

Kann man im Massstab 1:1 belegen, dass eine Neuigkeit funktioniert, wird diese von Bauherren und Bauherren, Architektinnen und Architekten, Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie den ausführenden Unternehmen eher angenommen. Dies gilt auch hinsichtlich des nachhaltigen Bauens bzw. aller innovativen Massnahmen zur Reduktion der grauen Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses. Für einen raschen Transfer der Forschungsergebnisse des Verbundprojekts «Energiearmer Beton» braucht es daher Pilot- und Demonstrationsobjekte.<sup>1</sup>

### **Bauwerkserhaltung**

Der Ersatz oder der tief greifende Umbau bestehender Bausubstanz beansprucht enorm viel graue Energie und führt zu erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Entsprechende Massnahmen müssen daher professionell auf ihre Notwendigkeit und Zweckmässigkeit hin geprüft werden, und die Ausführung soll so weit wie möglich hinausgeschoben werden. Für optimale Entscheide müssen der aktuelle Zustand und die weitere Entwicklung der Bausubstanz zuverlässig bekannt sein; visuelle Prüfungen und die Entnahme einiger Betonbohrkerne genügen nicht.<sup>2</sup>

### **Wissen und Können**

Architektinnen und Architekten, Ingenieurinnen und Ingenieure sowie ausführende Unternehmen wenden neue Baustoffe, Konstruktionen und Verfahren nur an, wenn sie diese kennen und sich in der Lage fühlen, sie korrekt zu implementieren. Mit anderen Worten: Ohne entsprechendes Wissen und Können werden innovative Massnahmen zur Reduktion der



graue Energie und des CO<sub>2</sub>-Ausstosses nur sehr zögerlich angewendet. Es braucht daher dringend Information und Weiterbildung.<sup>3</sup>

#### Anmerkungen und Referenzen

- 1 Projekt «Energiearmer Beton»
- 2 Projekt «Monitoring von Betonkonstruktionen»
- 3 Projekt «Energiearmer Beton»

## 1.8. Die Bauwerkseigentümerinnen und -eigentümer sind gefordert

## 1.8.1. Die relevanten Akteurinnen und Akteure



Im Hinblick auf die praktische Anwendung der neuen Erkenntnisse aus den Forschungen im Verbundprojekt «Energearmer Beton» sind folgende Hauptakteurinnen und -akteure entscheidend:

### *Bauwerkseigentümerinnen und -eigentümer*

Welche Baustoffe und Technologien beim Bauen zum Zuge kommen, wird primär von den Eigentümerinnen und Eigentümern der Bauten entschieden – also von Privatpersonen, Organisationen und Betrieben sowie von der öffentlichen Hand. In der Regel fallen die Entscheide aufgrund von einer Empfehlung der Architektinnen und Architekten sowie der Ingenieurinnen und Ingenieure.

### *Planerinnen und Planer sowie Unternehmerinnen und Unternehmer*

Den Architektinnen und Architekten, Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie den ausführenden Unternehmen, die von der Bauherrin oder dem Bauherrn beauftragt werden, kommt eine ebenso grosse Bedeutung zu, denn sie müssen den neuen Baustoffen, Konstruktionen und Verfahren vertrauen und diese bei ihren Bauprojekten einsetzen.

### *Verbände*

Die Berufsverbände sind bedeutend im Zusammenhang mit der Information und der Weiterbildung ihrer Mitglieder und dem verbandseigenen Normenschaftern.

Die Empfehlungen der Verbundsynthese «Nachhaltige Betonkonstruktionen» richten sich deshalb in erster Linie an diese drei Akteursgruppen.

# Gebäudeeigentümer

## 1.8.2. Demonstrationsprojekte fördern!



### **NEST, das modulare Forschungs- und Innovationsgebäude von Empa und Eawag.**

*Quelle: Roman Keller*

*Die Eigentümerinnen und Eigentümer von Gebäuden und Infrastrukturbauten unterstützen die Anwendung von klinkerarmem Beton sowie von Betonkonstruktionen ohne Stahleinlagen und teilen ihre Erfahrungen.*

Bei Neubau, Umbau oder Sanierung fördern die Bauherrinnen und Bauherren den Einsatz von Baustoffen, Konstruktionen und Verfahren, die möglichst wenig graue Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Folge haben. Sie leisten damit einen substanziellen Beitrag an die Nachhaltigkeit ihrer Bauten. Sie berichten über diese Demonstrationsobjekte und die gemachten Erfahrungen; damit fördern sie den raschen Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis.

# Gebäudeeigentümer

### 1.8.3. Professionelle Bauwerksdiagnose ist ein Muss!

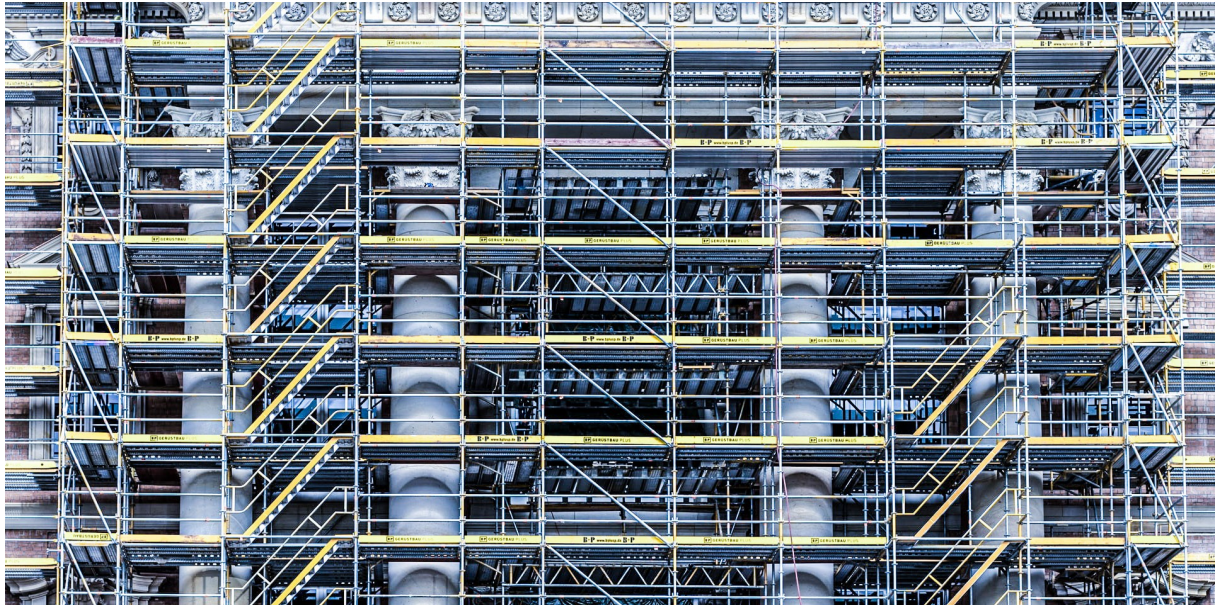


*Die Eigentümerinnen und Eigentümer von Gebäuden und Infrastrukturbauten sind vom Mehrwert einer professionellen Bauwerksdiagnose überzeugt und setzen darauf.*

Bauten können länger genutzt werden, wenn man sie sorgfältig unterhält. Mit «sorgfältig» ist nicht das Maximum an Unterhalt gemeint, sondern das Nötige zum richtigen Zeitpunkt. Um diese Forderung zu erfüllen, braucht es periodische Prüfungen und daraus abgeleitete professionelle Diagnosen. Mit diesem Wissen sparen Bauwerkseigentümerinnen und -eigentümer viel Geld, denn sie vermeiden überrissene Sanierungs- und verfrühte Ersatzmassnahmen.

# Gebäudeeigentümer

## 1.8.4. Sparsam renovieren anstatt abreißen!



*Die Eigentümerinnen und Eigentümer von Gebäuden und Infrastrukturbauten prüfen Notwendigkeit und Zweckmäßigkeit der beiden Optionen Erhalten und Ersatz umfassend und entscheiden sich im Zweifelsfall für eine sparsame Sanierung.*

Potenziell höhere Erträge und die Demodisierung von Bauten sind für nachhaltige Bauwerkseigentümerinnen und -eigentümer keine hinreichenden Gründe mehr für Abriss und Ersatz. Eine ganzheitliche Analyse zeigt rasch, dass die Option Ersatz mit überdurchschnittlich viel grauer Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen verbunden ist, wogegen die Option Sanierung wesentlich besser abschneidet – vor allem dann, wenn die im Verbundprojekt «Energiearmer Beton» entwickelten Baustoffe, Konstruktionen und Verfahren angewendet werden.<sup>1</sup>

Anmerkungen und Referenzen

1 [Synthese «Gebäude und Siedlungen»](#)

# Gebäudeeigentümer

### 1.8.5. Im Gebäudeinnern klinkerarmen Beton verwenden!



*Architektinnen/Architekten und Ingenieurinnen/Ingenieure sind von klinkerarmem Beton überzeugt und wenden diesen in trockener Umgebung wenn immer möglich an – vor allem im Gebäudeinnern.*

In der Regel sind es die Bauingenieurinnen/-ingenieure, die der Bauunternehmerin oder dem Bauunternehmer die Betonrezeptur vorgeben. Die Unternehmerin oder der Unternehmer kann diesen Vorschlag jedoch ablehnen und eine Alternative anbieten oder die Verantwortung dafür mittels Abmahnung an die Bauherrschaft weitergeben. Als Gesamtverantwortlicher für das Bauwerk kann auch die Architektin / der Architekt gegen neuartige Lösungen opponieren. Es ist also entscheidend, dass Planerinnen/Planer und Unternehmerinnen/Unternehmer den innovativen Lösungen Vertrauen schenken, sich entsprechend weiterbilden und den Mut zur Anwendung aufbringen.

# Gebäudeeigentümer

### 1.8.6. Bei Sanierungen nachhaltige Baustoffe einsetzen!



*Architektinnen/Architekten und Ingenieurinnen/Ingenieure kennen die hervorragenden Eigenschaften des neuen Ultra-Hochleistungs-Faserbetons mit Polyethylenfasern und wenden diesen wenn immer zweckmässig an.*

Der Ultra-Hochleistungs-Faserbeton mit Polyethylenfasern ist marktreif und bereits mehrmals erfolgreich eingesetzt worden. Er vereint alle Vorteile des konventionellen Stahlfaserbetons und zeichnet sich bei Verwendung von Optima-Zement durch rund 70 Prozent weniger graue Energie und einen um 80 Prozent geringeren CO<sub>2</sub>-Ausstoss aus. Der Mehrpreis von etwa 30 Prozent gegenüber dem Stahlfaserbeton wird durch die um 300 kg geringere Dichte zum Teil kompensiert. Architektinnen und Architekten sowie Ingenieurinnen und Ingenieure wissen um diese Vorteile und verwenden diesen Baustoff vor allem bei der Sanierung von Geschossdecken und Fahrbahnplatten sowie für die Herstellung von stark beanspruchten Bodenbelägen und vorgefertigten Betonelementen in Tunneln und im Freien.



# Verbände und NGOs

### 1.8.7. Information und Weiterbildung fördern!



*Berufsverbände informieren ihre Mitglieder hinsichtlich der grauen Energie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen beim Bau, bei der Sanierung und beim Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturbauten – und bilden sie dazu weiter. Bei Bedarf nehmen sie die Normierungsarbeit frühzeitig auf.*

Berufsverbände stehen in der Pflicht, ihre Mitglieder auf dem aktuellen Stand des Wissens und der Baukunst zu halten. Es ist deshalb in erster Linie an ihnen, Informations- und Weiterbildung zu Fragen der grauen Energie und der CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie zu neuen technischen Lösungen beim Bau, bei der Sanierung sowie beim Rückbau von Gebäuden und Infrastrukturbauten anzubieten. Berufsverbände, die auch im Normenwesen aktiv sind, müssen den ausgewiesenen Normierungsbedarf frühzeitig decken.