

# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke

Prof. Dr. Walter Kaufmann, ETH Zürich



# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke



# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke

Einleitung

wirtschaftlich  $\neq$   
umweltfreundlich?

Tragwerkseffizienz

Geschossdecken

Schlussfolgerungen



# Einleitung

---

Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen der Betonbauweise müssen reduziert werden.

Alle am Bau beteiligten müssen dazu beitragen.



CLINKER  
CEMENT  
CONCRETE  
CONSTRUCTION  
CARBONATION

- |                     |   |
|---------------------|---|
| <b>CLINKER</b>      | Alternative Brennstoffe<br>CO <sub>2</sub> -Abscheidung im Zementwerk<br>Alternative Klinkertypen |
| <b>CEMENT</b>       | Einsatz klinkerarmer Zemente  |
| <b>CONCRETE</b>     | Reduktion Zementgehalt<br>Rezyklierte Gesteinskörnung   |
| <b>CONSTRUCTION</b> | Effiziente und dauerhafte Bauwerke  |
| <b>CARBONATION</b>  | Maximierung CO <sub>2</sub> -Aufnahme Beton   |

# Einleitung

---

Ressourcenverbrauch und Treibhausgasemissionen der Betonbauweise müssen reduziert werden.

Alle am Bau beteiligten müssen dazu beitragen.

Im konstruktiven Ingenieurbau ist dies durch statisch effiziente Tragwerke möglich.



CLINKER  
CEMENT  
CONCRETE  
CONSTRUCTION  
CARBONATION

## CLINKER

Alternative Brennstoffe  
CO<sub>2</sub>-Abscheidung im Zementwerk  
Alternative Klinkertypen

## CEMENT

Einsatz klinkerarmer Zemente

## CONCRETE

Reduktion Zementgehalt  
Rezyklierte Gesteinskörnung

## CONSTRUCTION

Effiziente und dauerhafte Bauwerke

## CARBONATION

Maximierung CO<sub>2</sub>-Aufnahme Beton

# Einleitung

Viele Massnahmen – auch der 5C-Ansatz – fokussieren auf die Reduktion der Emissionen von Beton und Zement.

Es dauert aber noch lange, bis Beton CO<sub>2</sub>-neutral ist.

## CEMBUREAU 2050 roadmap

CO<sub>2</sub> reductions along the cement value chain (5Cs: clinker, cement, concrete, construction, re-carbonation)



# Einleitung

Viele Massnahmen – auch der 5C-Ansatz – fokussieren auf die Reduktion der Emissionen von Beton und Zement.

Es dauert aber noch lange, bis Beton CO<sub>2</sub>-neutral ist.

Mit materialeffizienten Tragwerken, die weniger Beton verbrauchen, können wir bereits heute einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

## CEMBUREAU 2050 roadmap

CO<sub>2</sub> reductions along the cement value chain (5Cs: clinker, cement, concrete, construction, re-carbonation)



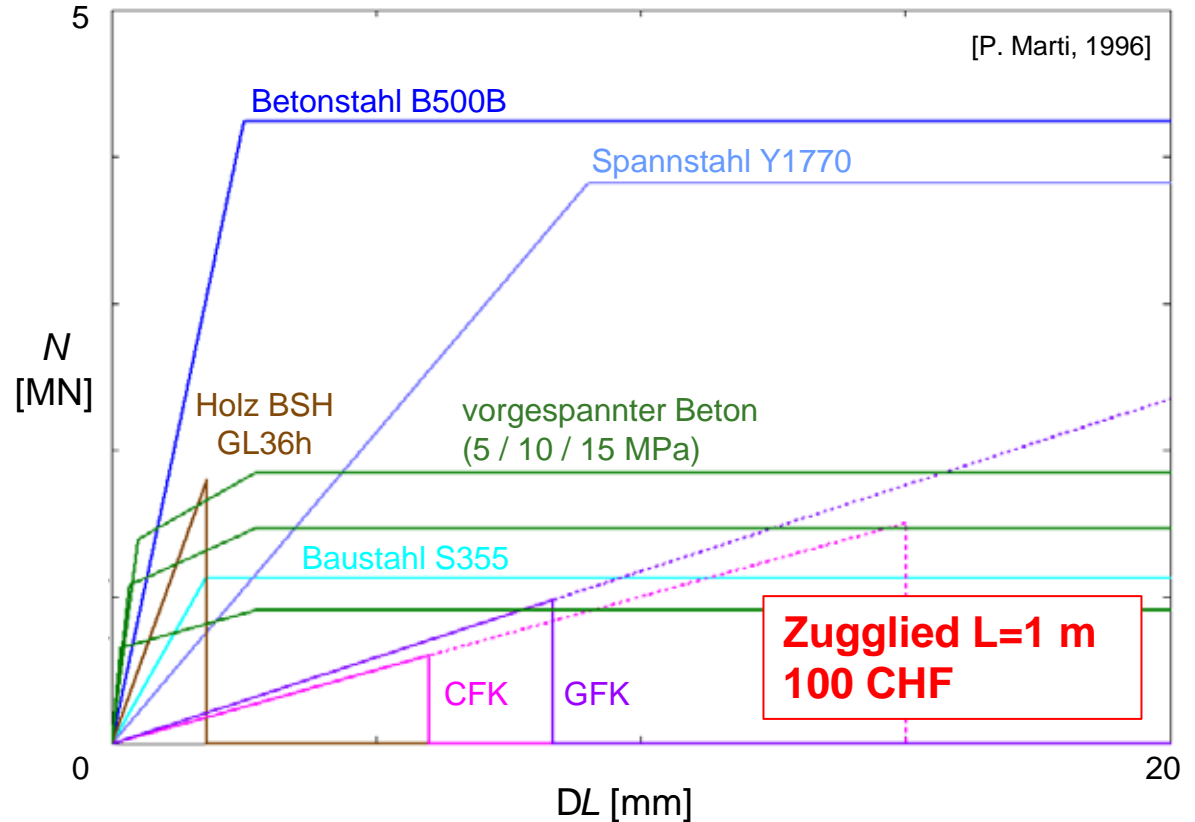
# Einleitung

## Spannbeton vereint

- hohe Festigkeit
- Steifigkeit und
- Duktilität

### Basis: CH Baukosten (eingebaut / abgebunden)

Beton 600 CHF/m<sup>3</sup>  
Betonstahl 1'500 CHF/t  
Spannstahl 6'000 CHF/t  
Baustahl 4'000 CHF/t  
Holz (BSH) 2'000 CHF/t  
CFK 90'000 CHF/t  
GFK 30'000 CHF/t



# Einleitung

... und ist auch bei den Emissionen vorteilhaft

## Basis:

- KBOB Ökobilanzdaten
- treeze Betonrechner
- EPD (BSH, (Beton-)stahl)

Beton 180 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>

Betonstahl 400 kg CO<sub>2</sub>/t

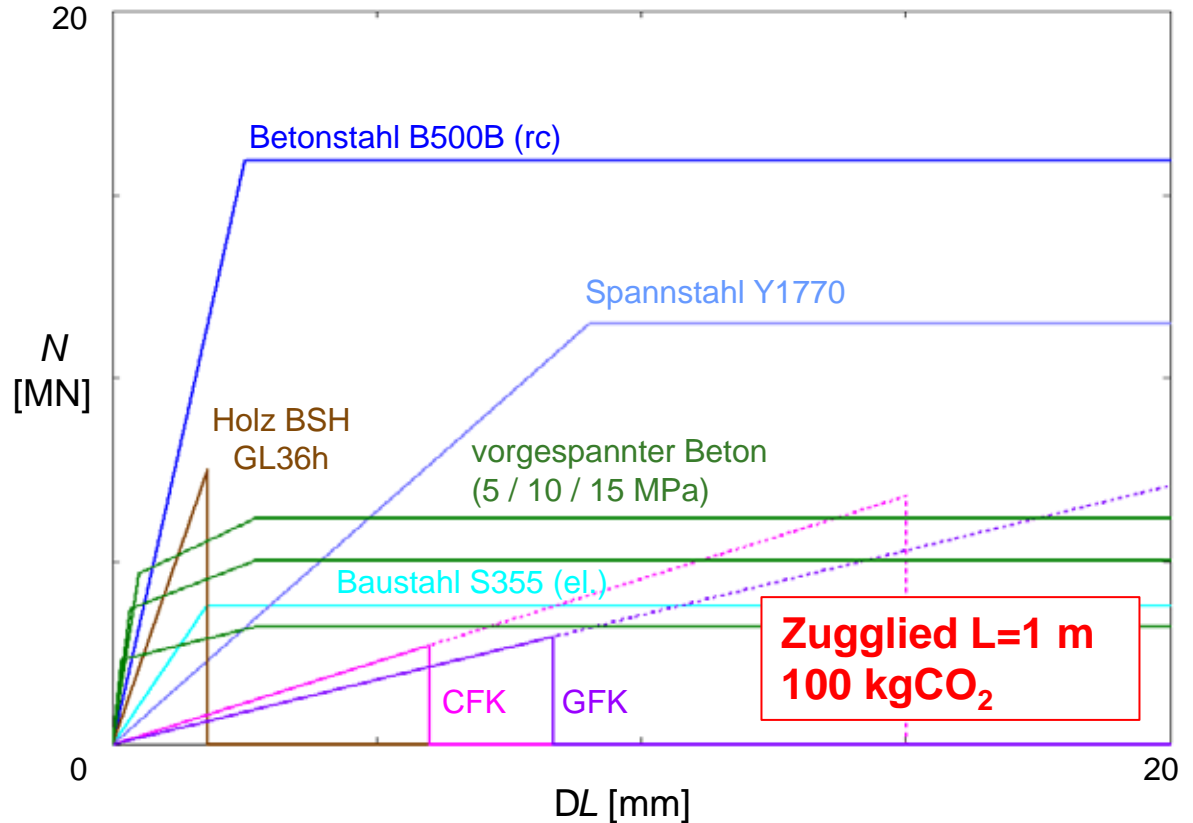
Spannstahl 2'000 kg CO<sub>2</sub>/t

Baustahl 1'200 kg CO<sub>2</sub>/t

Holz (BSH) 470 kg CO<sub>2</sub>/t

CFK 20'000 kg CO<sub>2</sub>/t

GFK 10'000 kg CO<sub>2</sub>/t



# Einleitung

(Warum) sind  
Betonbauten nicht  
umweltfreundlich?

**Basis:**

- KBOB Ökobilanzdaten
- treeze Betonrechner
- EPD (BSH, (Beton-)stahl)

Beton 180 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>

Betonstahl 400 kg CO<sub>2</sub>/t

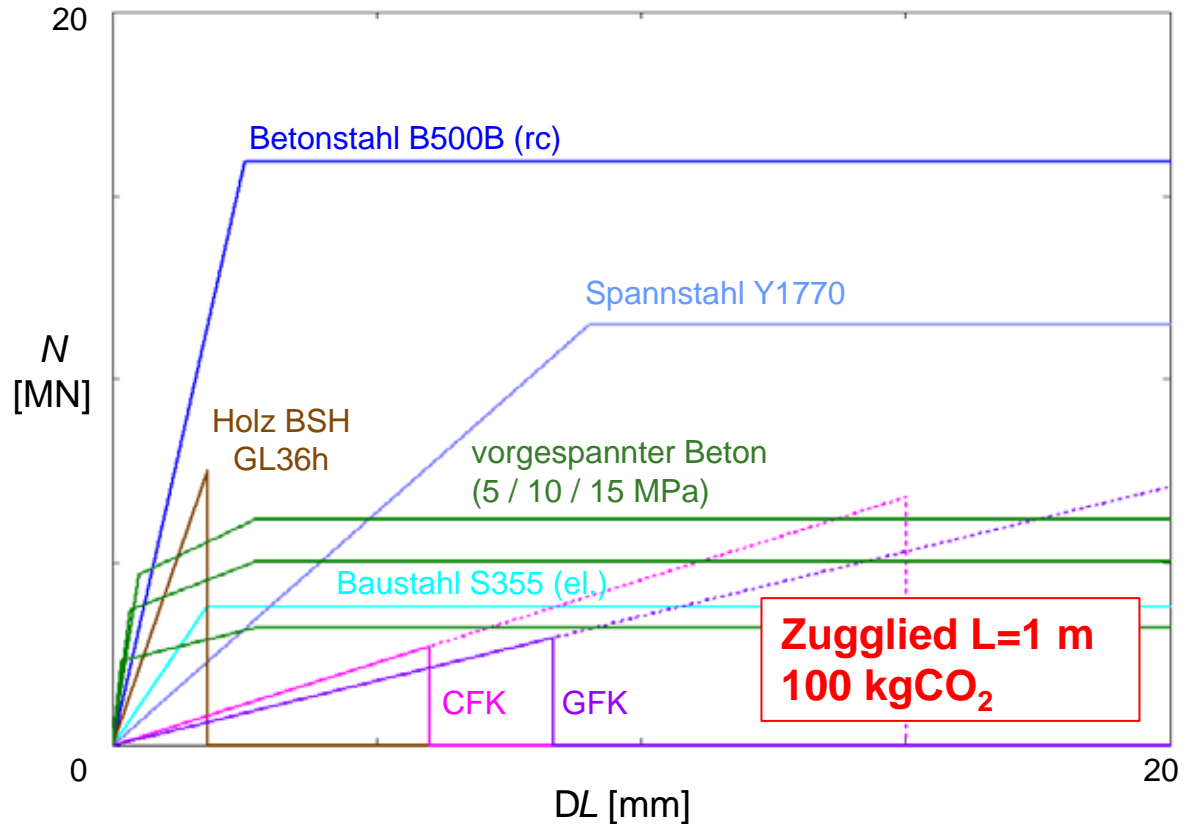
Spannstahl 2'000 kg CO<sub>2</sub>/t

Baustahl 1'200 kg CO<sub>2</sub>/t

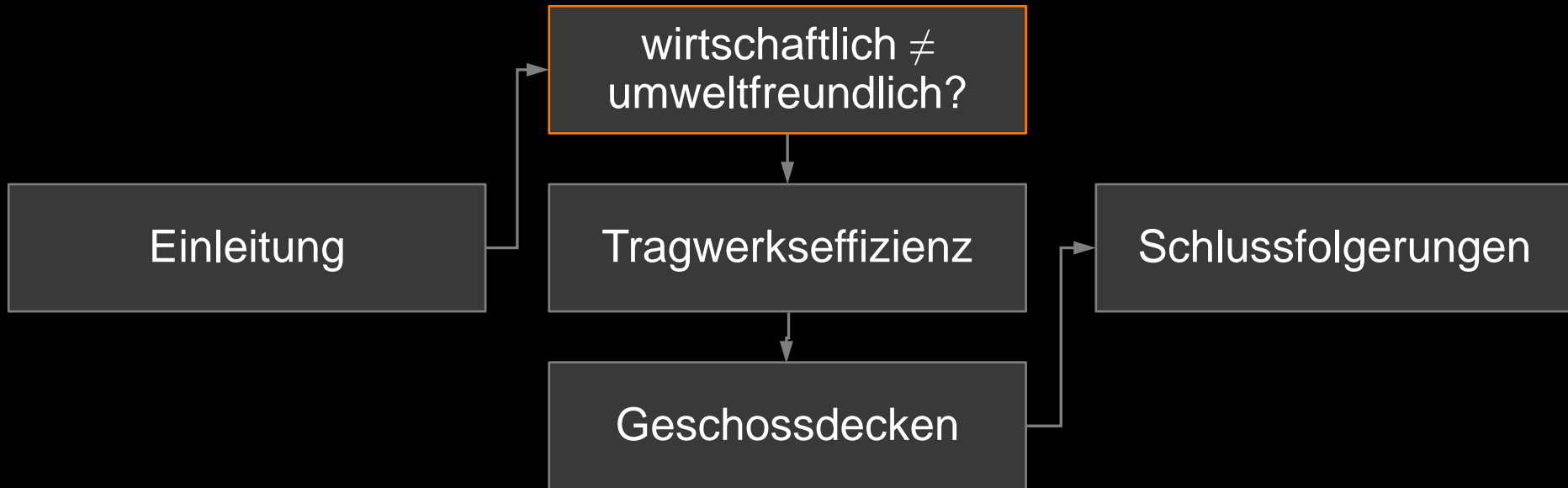
Holz (BSH) 470 kg CO<sub>2</sub>/t

CFK 20'000 kg CO<sub>2</sub>/t

GFK 10'000 kg CO<sub>2</sub>/t



# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke

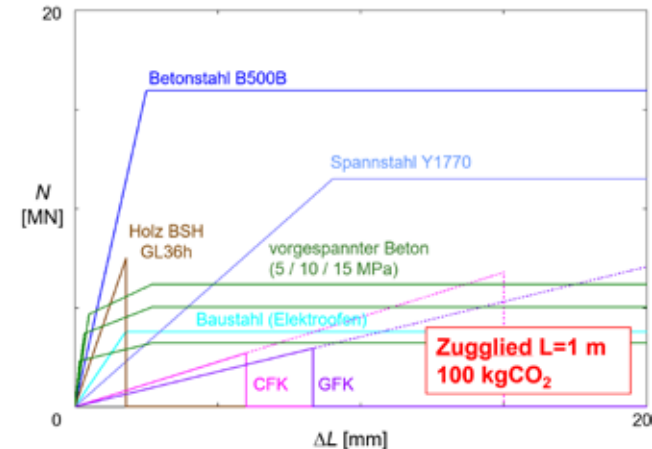
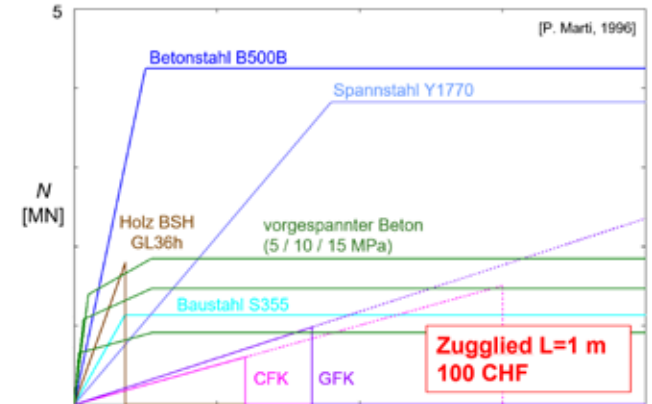


# Wirtschaftlich $\neq$ umweltfreundlich?

Wirtschaftliche Betontragwerke sind auch umweltfreundlich ...

... sofern sie statisch effizient sind (im Sinne von Materialeffizienz), d.h.

... wenn sie nicht unnötig viel mehr Material verbrauchen als nötig.

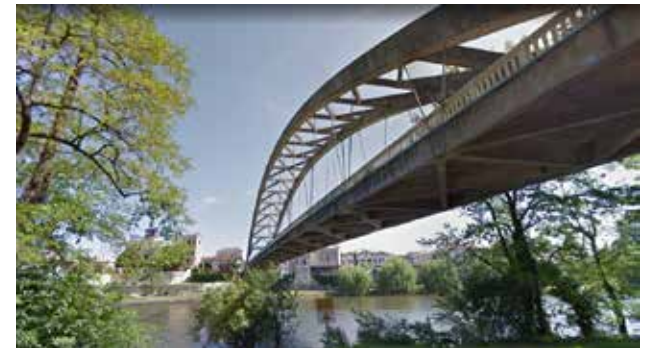


# Wirtschaftlich ≠ umweltfreundlich?

---

Frühe Betonbauten waren in der Regel zugleich wirtschaftlich und statisch effizient.

Materialeffizienz war direkt mit der Wirtschaftlichkeit verknüpft, weil die Materialkosten hoch waren.

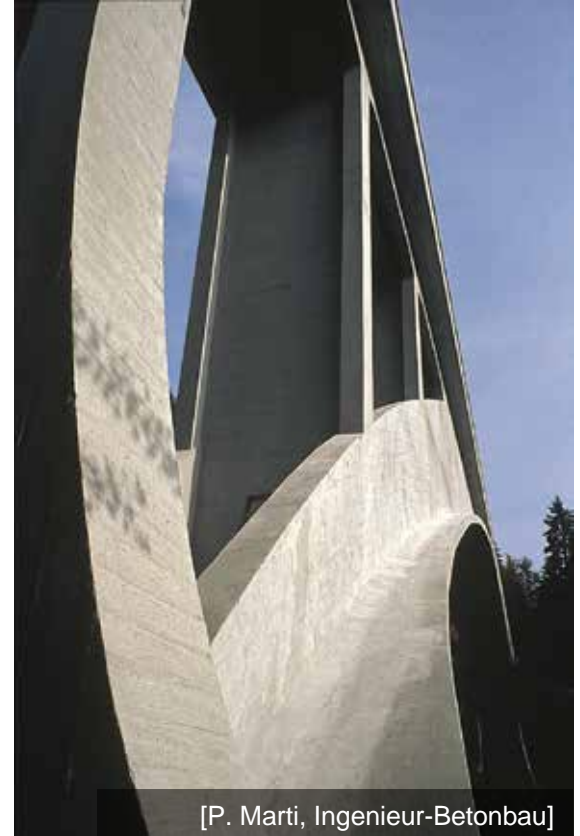


# Wirtschaftlich ≠ umweltfreundlich?

---

Frühe Betonbauten waren in der Regel zugleich wirtschaftlich und statisch effizient.

Materialeffizienz war direkt mit der Wirtschaftlichkeit verknüpft, weil die Materialkosten hoch waren.



[P. Marti, Ingenieur-Betonbau]

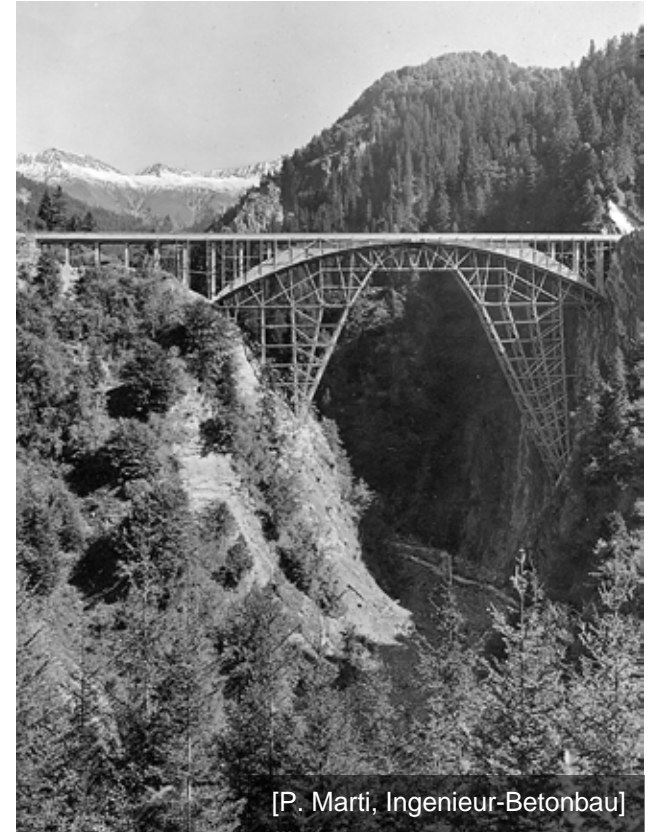
# Wirtschaftlich $\neq$ umweltfreundlich?

---

Frühe Betonbauten waren in der Regel zugleich wirtschaftlich und statisch effizient.

Materialeffizienz war direkt mit der Wirtschaftlichkeit verknüpft, weil die Materialkosten hoch waren.

Die Lohnkosten waren dagegen tief und Holz viel günstiger als Beton, so dass Betonbauten trotz komplizierter Lehrgerüste wirtschaftlich waren.



# Wirtschaftlich ≠ umweltfreundlich?

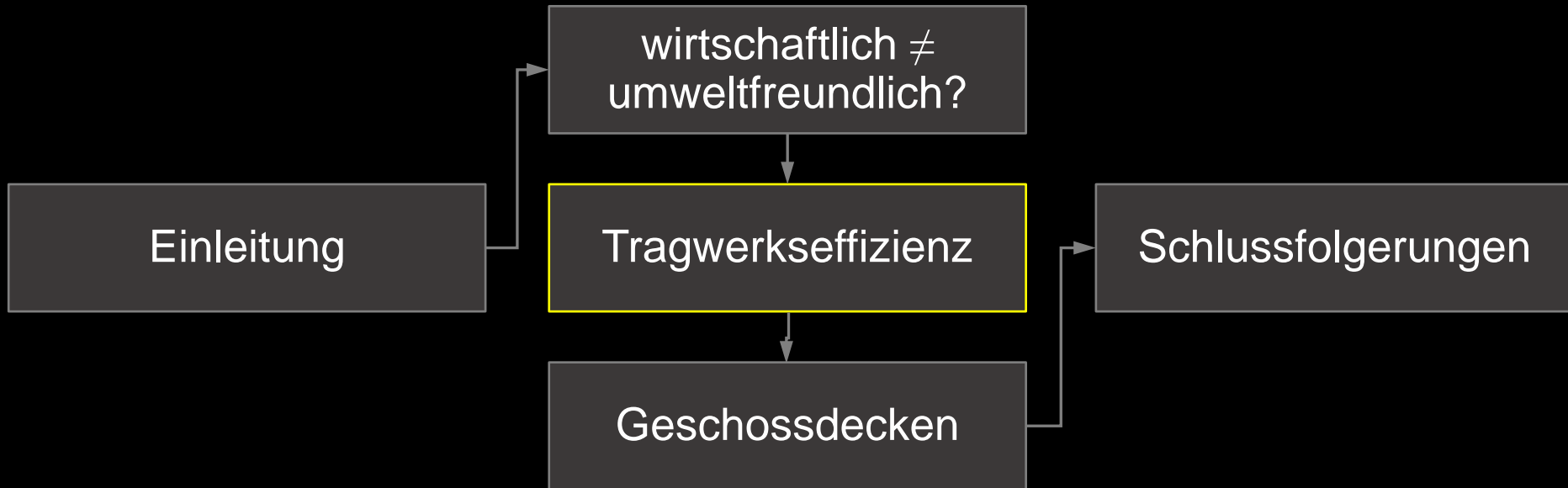
Heute aber sind viele Betonbauten in Industrieländern statisch ineffizient.

Tiefe Material- und hohe Lohnkosten führten zu einer Entkopplung von Materialverbrauch und Baukosten.

Einfache Geometrien, die mit wenig Arbeitsaufwand hergestellt werden können, sind wirtschaftlich, selbst viel mehr Beton und Bewehrung verbraucht wird als nötig.

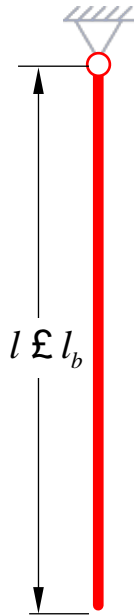


# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke



# Tragwerkseffizienz

Materialeffizienz = Tragwerkseffizienz?



$g$  spezifisches Gewicht

$f_u$  Festigkeit

Ⓜ  $l_b = \frac{f_u}{g}$  Abreislänge

Beispiele

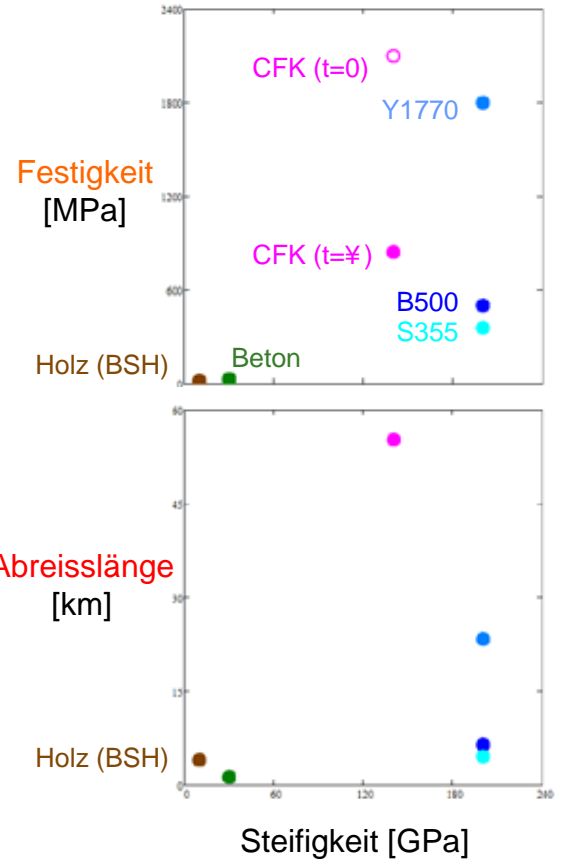
Beton (Druck):  $l_b \gg 1\text{K } 4 \text{ km}$

Holz:  $l_b \gg 2\text{K } 5 \text{ km}$

Stahl:  $l_b \gg 3\text{K } 6 \text{ km}$

Spannstahl:  $l_b \gg 20\text{K } 25 \text{ km}$

CFK:  $l_b \gg 50\text{K } 100 \text{ km}$

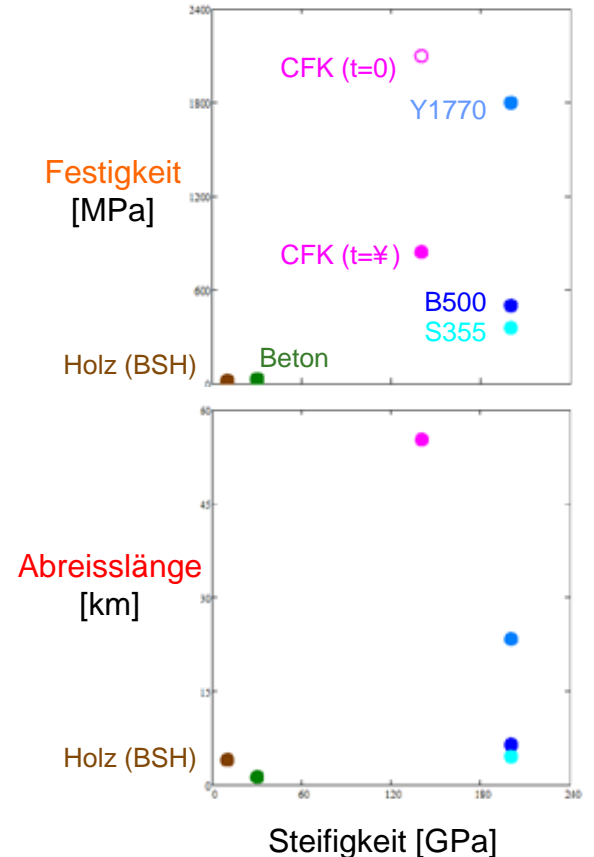


# Tragwerkseffizienz

Das Eigengewicht ist nur bei grossen Spannweiten dominant. Bei den meisten Tragwerken sind Nutzlasten ebenso wichtig ® Abreisslänge wenig relevant.

Steifigkeit und Duktilität müssen ebenfalls gewährleistet werden (Gebrauchstauglichkeit, Robustheit).

Auch wenn diese Kriterien berücksichtigt werden, ist die Bewertung fragwürdig (nur CFK und Spannstahl verwenden?)

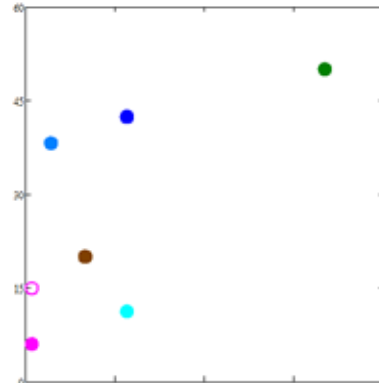


# Tragwerkseffizienz

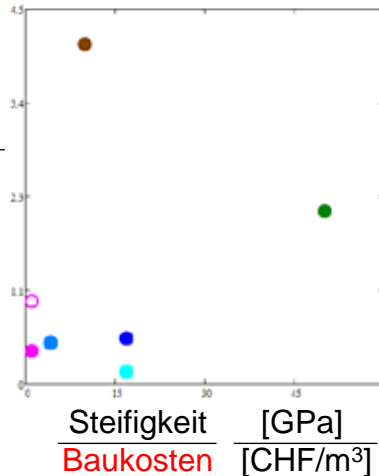
Wirtschaftlichkeit  
galt lange als  
wichtiges Kriterium  
für «effiziente  
Tragwerke».

Normalisiert mit den  
Baukosten resultiert  
eine völlig andere  
Beurteilung.

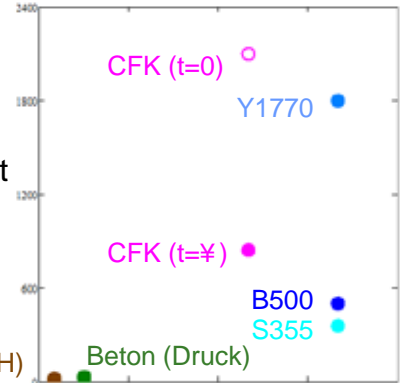
$$\frac{\text{Festigkeit}}{\text{Baukosten}} \\ \frac{[\text{MPa}]}{[\text{CHF}/\text{m}^3]}$$



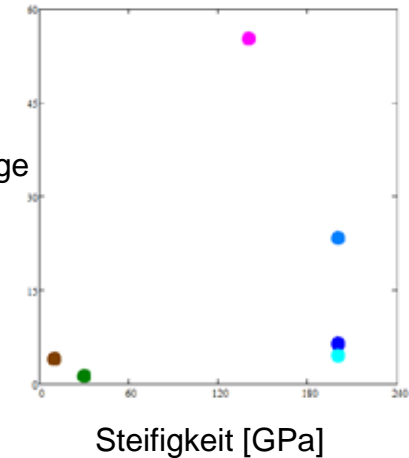
$$\frac{\text{Abreislänge}}{\text{Baukosten}} \\ \frac{[\text{km}]}{[\text{CHF}/\text{m}^3]}$$



$$\frac{\text{Festigkeit}}{[\text{MPa}]}$$



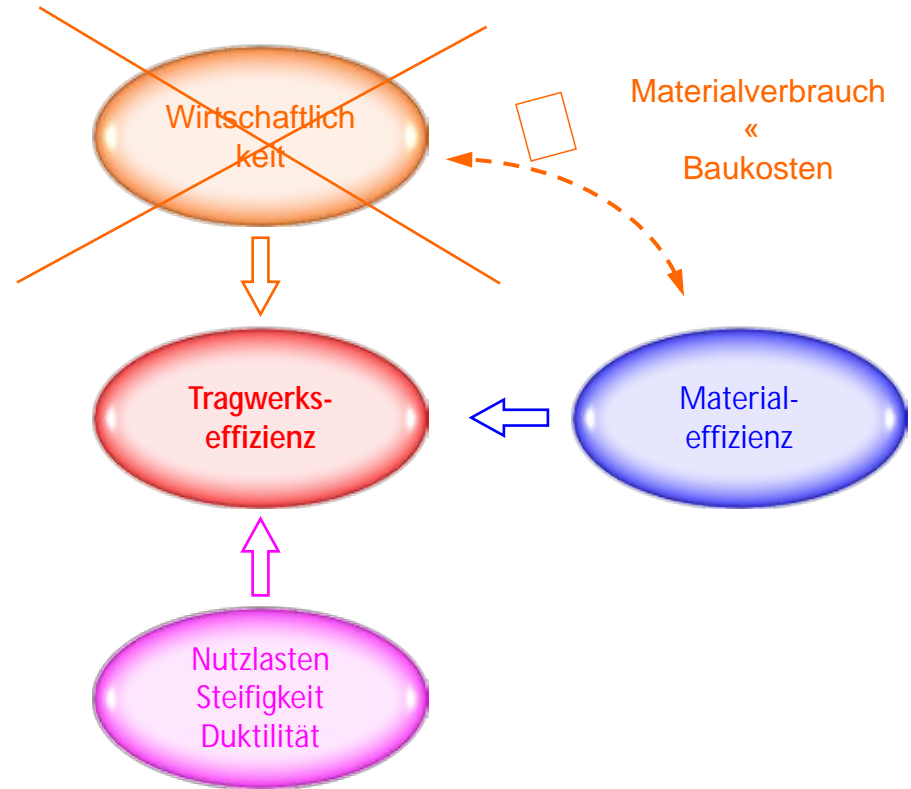
$$\frac{\text{Abreislänge}}{[\text{km}]}$$



# Tragwerkseffizienz

Wegen der Entkopplung von Materialverbrauch und Baukosten steht die Wirtschaftlichkeit aber oft im Widerspruch zur Materialeffizienz.

Dies führt zu nicht mehr zeitgemässen, Ressourcen verschwendenden Bauwerken.

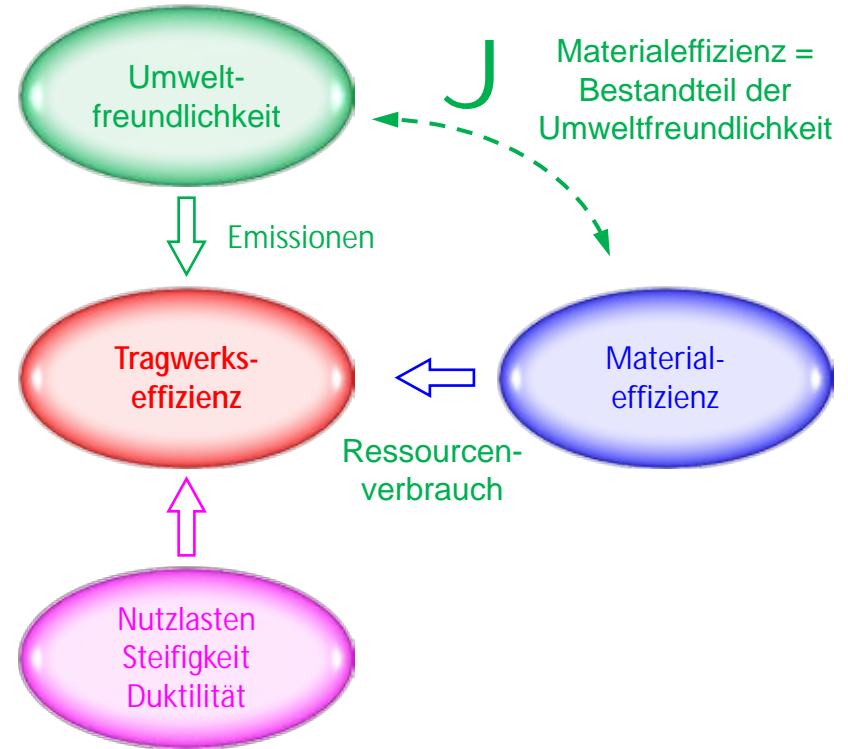


# Tragwerkseffizienz

Der richtige Gradmesser für die Tragwerkseffizienz muss heute statt der Wirtschaftlichkeit die Umweltfreundlichkeit sein.

Dabei müssen Materialverbrauch und Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden.

Damit erhält die statische Effizienz den Stellenwert zurück, den sie verdient.

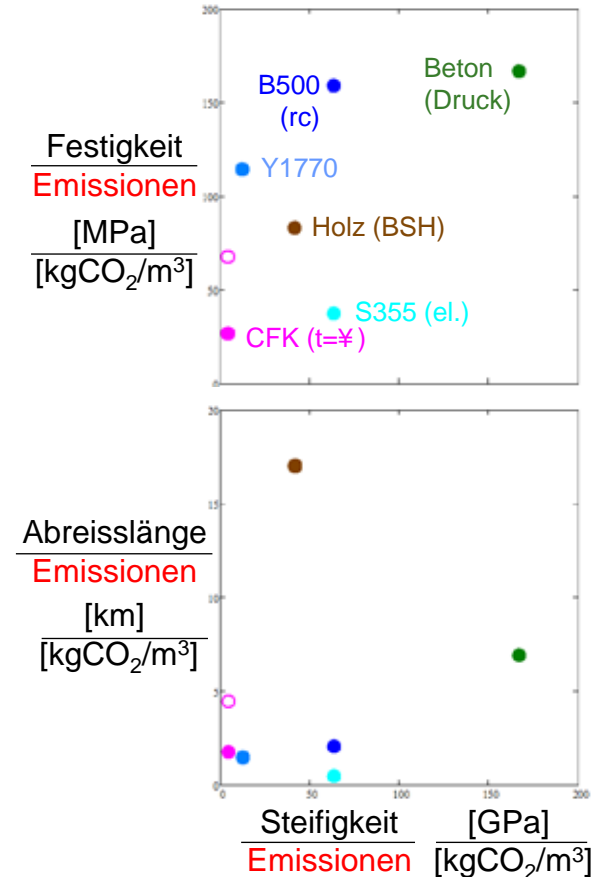


# Tragwerkseffizienz

Der richtige Gradmesser für die Tragwerkseffizienz muss heute statt der Wirtschaftlichkeit die Umweltfreundlichkeit sein.

Dabei müssen Materialverbrauch und Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden.

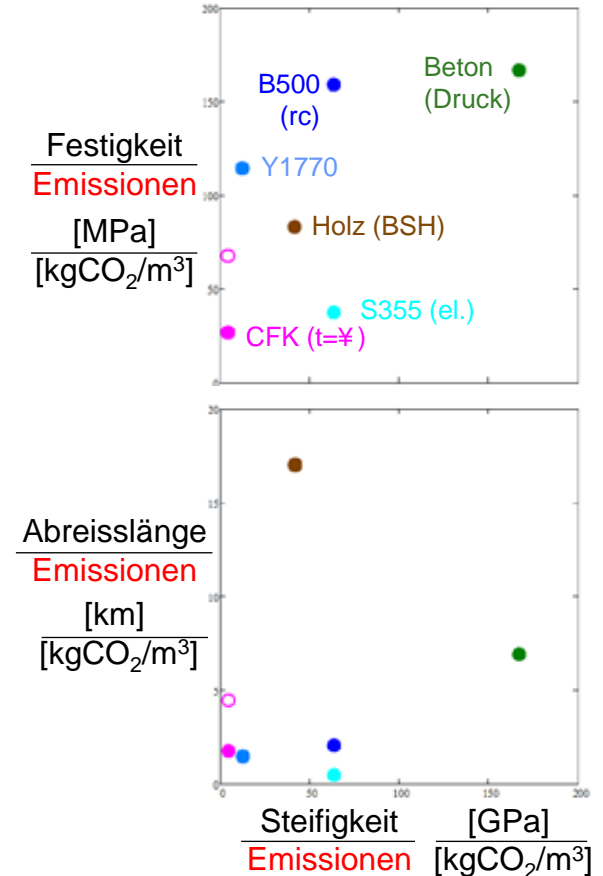
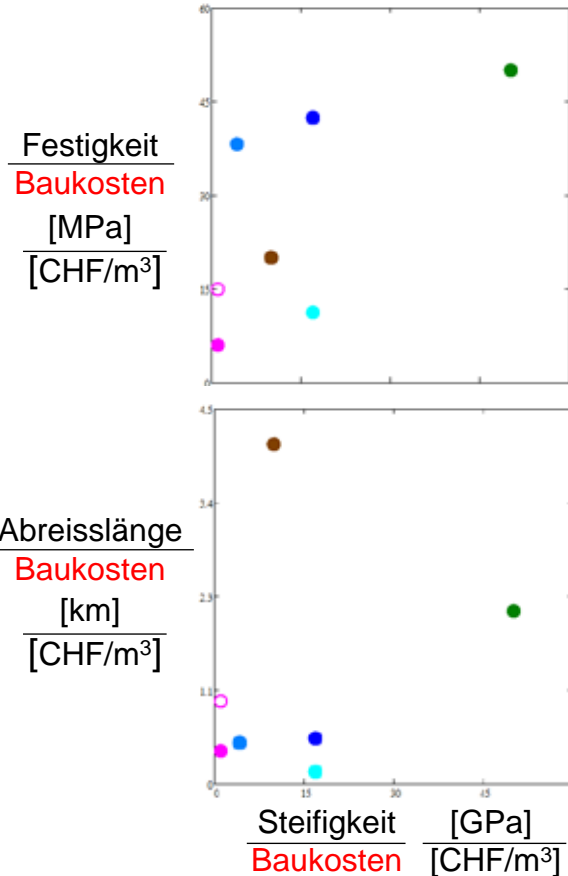
Damit erhält die statische Effizienz den Stellenwert zurück, den sie verdient.



# Tragwerkseffizienz

Umweltfreundlichkeit  
oder Materialkosten  
als Kriterium  
ergeben allerdings  
» gleiche Resultate.

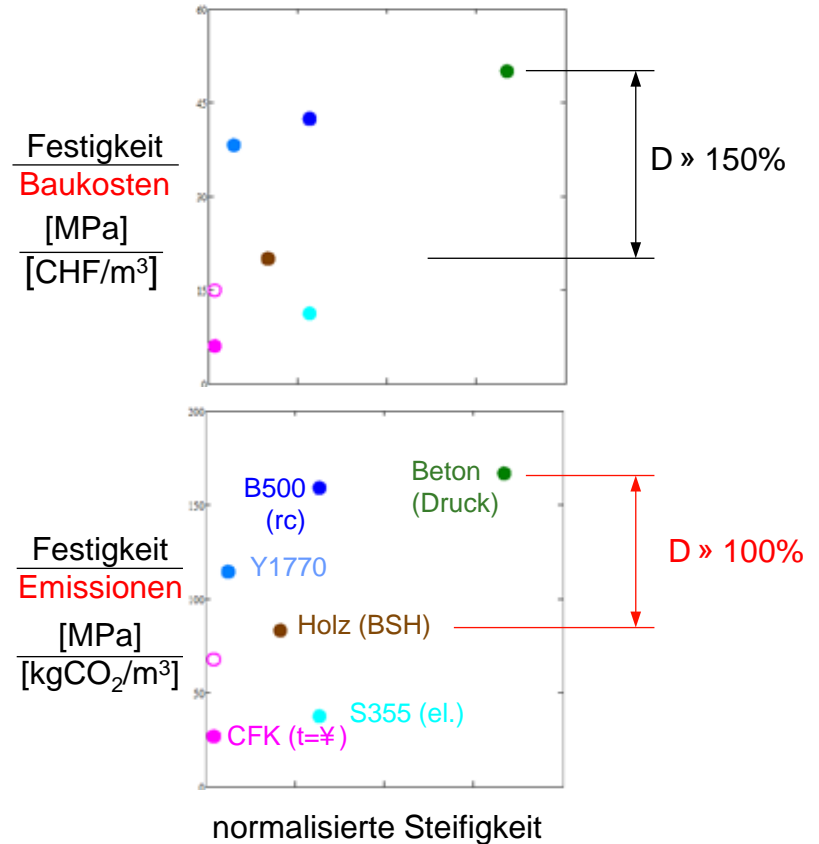
Weshalb sind heute  
viele Betonbauten  
wirtschaftlicher, aber  
weniger umwelt-  
freundlich als z.B.  
Holzbauten?



# Tragwerkseffizienz

Der Kostenvorteil von Beton und Bewehrung ist derart gross, dass bei moderaten Spannweiten selbst sehr massive, ineffiziente Tragwerke wirtschaftlich sind.

Leider bauen wir heute viele solche Bauwerke – die dann bei der Umweltfreundlichkeit im Nachteil sind, da weniger «Marge» besteht.



# Tragwerkseffizienz

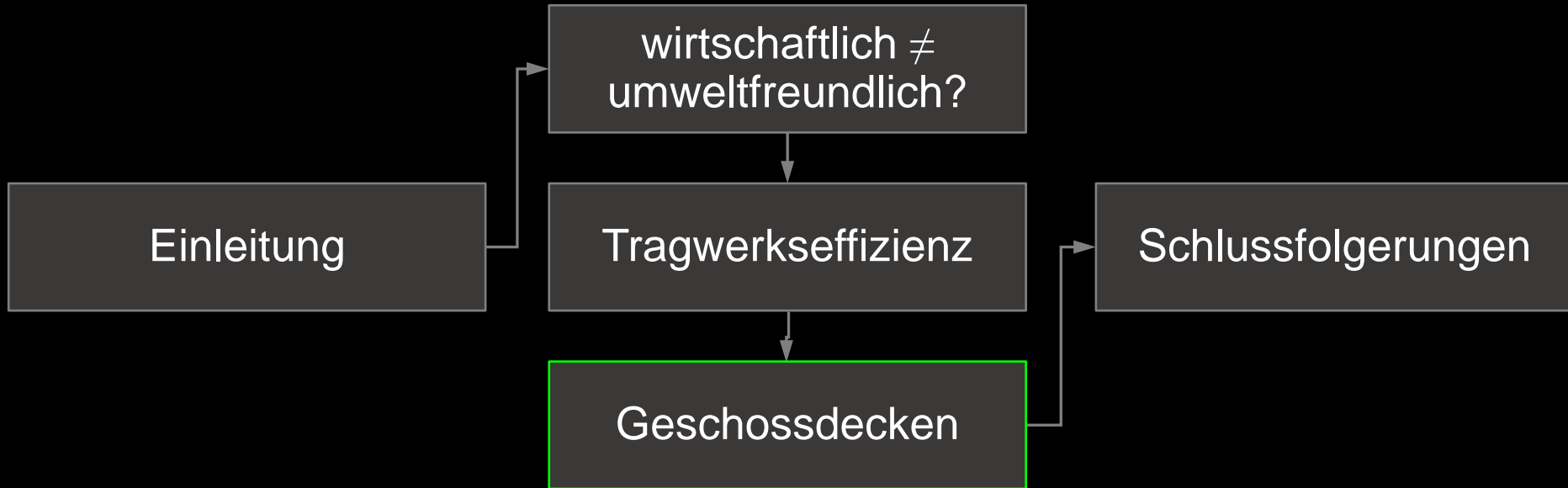
Betonbauten müssen (wieder) materialeffizienter werden, damit sie auch umweltfreundlich sind.

Dies ist in der Regel mit Mehrkosten verbunden.

Damit umweltfreundliche Betonbauten wirtschaftlich konkurrenzfähig bleiben, müssen in der Projektierung statische Effizienz und Herstellungsprozesse berücksichtigt werden.



# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke



# Geschossdecken

Ein relevantes Beispiel sind Geschossdecken.

Diese sind (in der CH) in der Regel Vollplatten und viel dicker als statisch notwendig, u.a. wegen

- Leitungen
- Schalldämmung
- Architektur



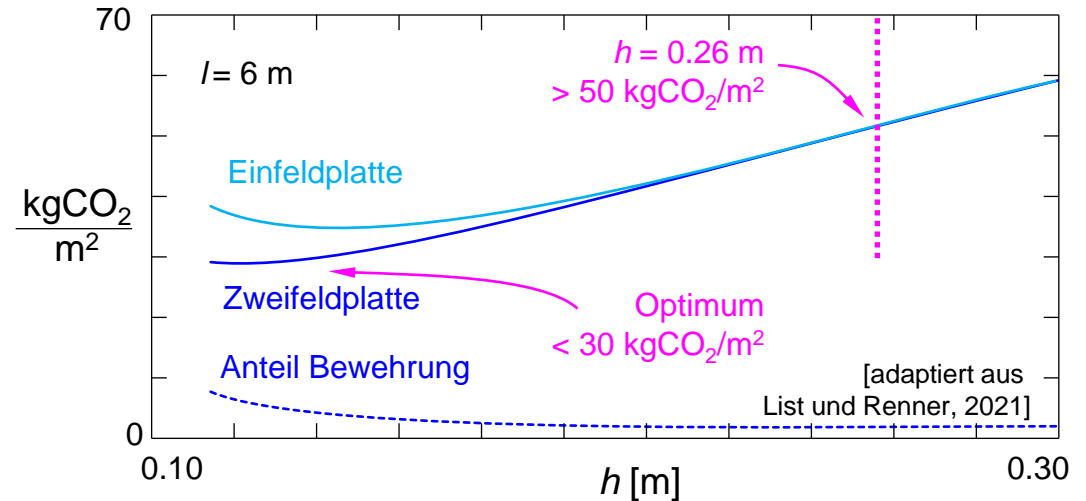
[dsp Ingenieure + Planer]

# Geschossdecken

Bei Minergie-Bauten ist z.B. für die integrierte Lüftung eine Deckenstärke von  $h = 26$  cm üblich.



Bei einer Spannweite von  $l = 6$  m verursacht dies fast doppelt so hohe  $\text{CO}_2$ -Emissionen wie mit der minimal erforderlichen Deckenstärke resultieren.

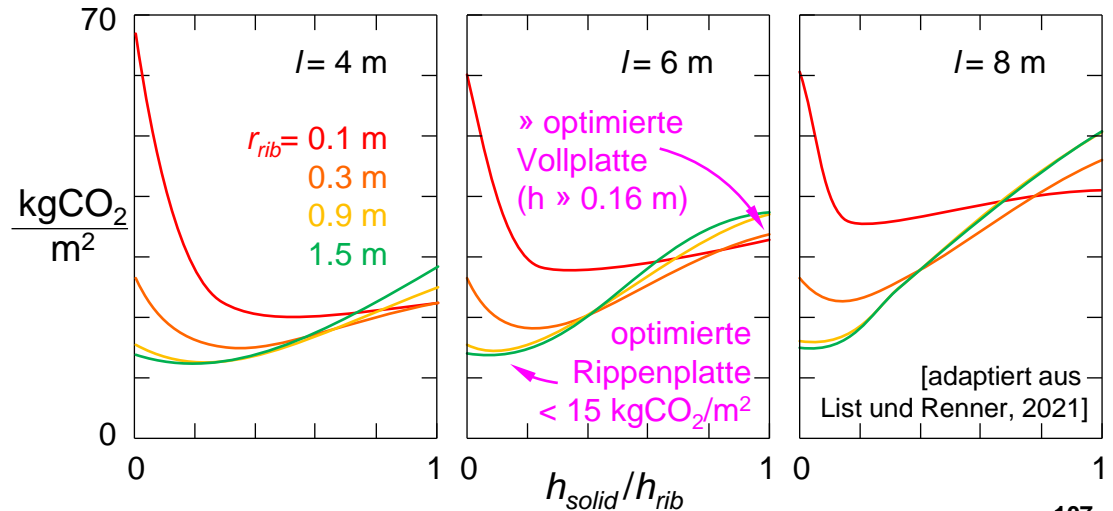
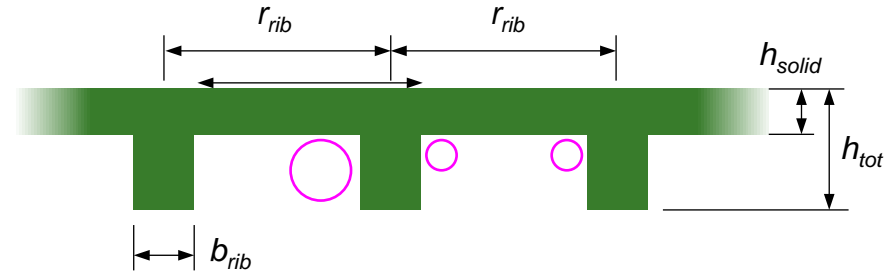


# Geschossdecken

Rippenplatten sind viel effizienter als Vollplatten.

Bei  $l = 6$  m reduzieren sich die Emissionen gegenüber der Vollplatte mit  $h = 26$  cm um mehr als 70%.

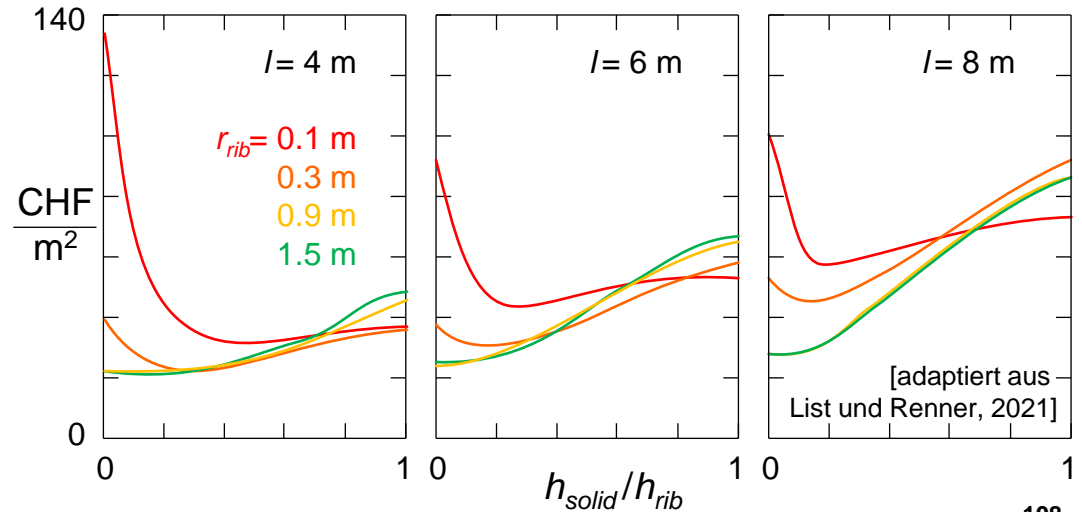
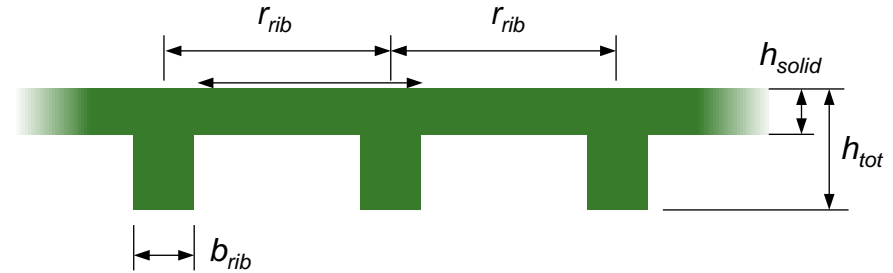
NB.  $h_{solid}^3$  6 cm (R30 ok, aber Trittschalldämmung erforderlich).



# Geschossdecken

Werden statt Emissionen die Materialkosten betrachtet, ändert sich wenig.

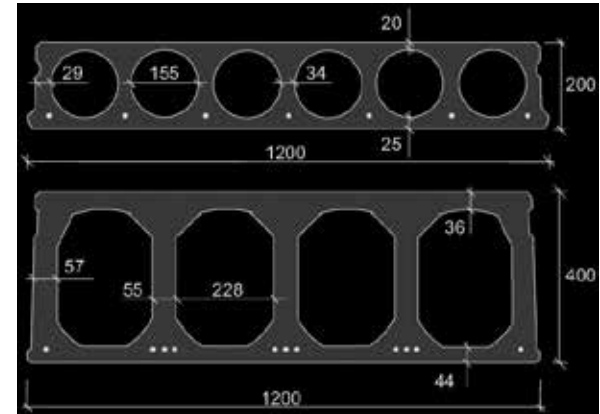
Rippen- und Kassettendecken sind wegen der Schalung bei üblichen Spannweiten teurer als Vollplatten. Gegenüber anderen Bauweisen sind sie aber wirtschaftlich.



# Geschossdecken

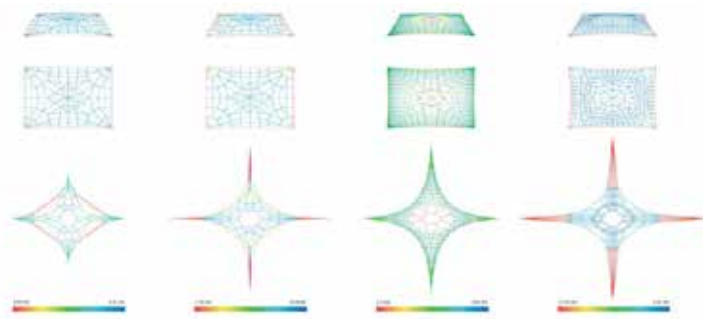
Vorfabrizierte Hohlkörperdecken erlauben ebenfalls bis 50% Reduktion der Betonkubatur. Die einseitig tragenden Elemente sind aber statisch und architektonisch suboptimal.

In Ortbeton sind Hohlkörper ebenfalls möglich, auch bei in zwei Richtungen tragenden Platten. Die Kunststoff-Hohlkörper verursachen jedoch relativ hohe Emissionen (Allokation?).



# Geschossdecken

Mit digitaler Fabrikation besteht das Potential, noch effizientere Tragwerke wirtschaftlich herzustellen  
(Beispiel: 3D-Druck BRG / Rippmann Floor System)

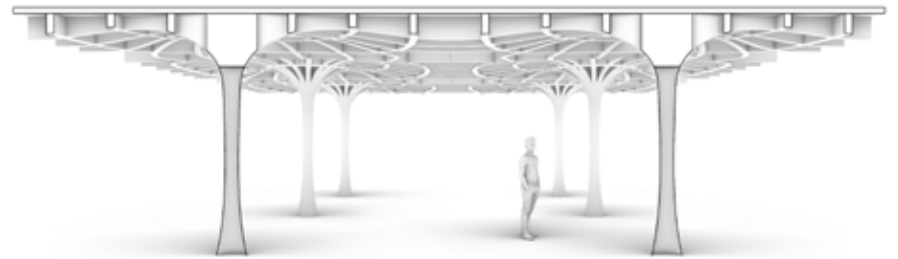
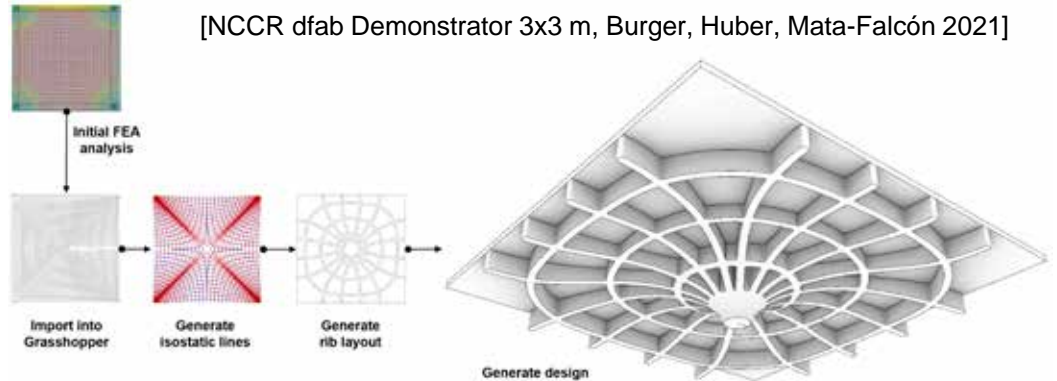




# Geschossdecken

Mit digitaler Fabrikation besteht das Potential, noch effizientere Tragwerke wirtschaftlich herzustellen (Beispiel: Eggshell)

- zweiachsig tragende Decken
- punktgestützte Flachdecken
- optimierte Rippengeometrie
- optimierte Bewehrungsführung



# Geschossdecken

---

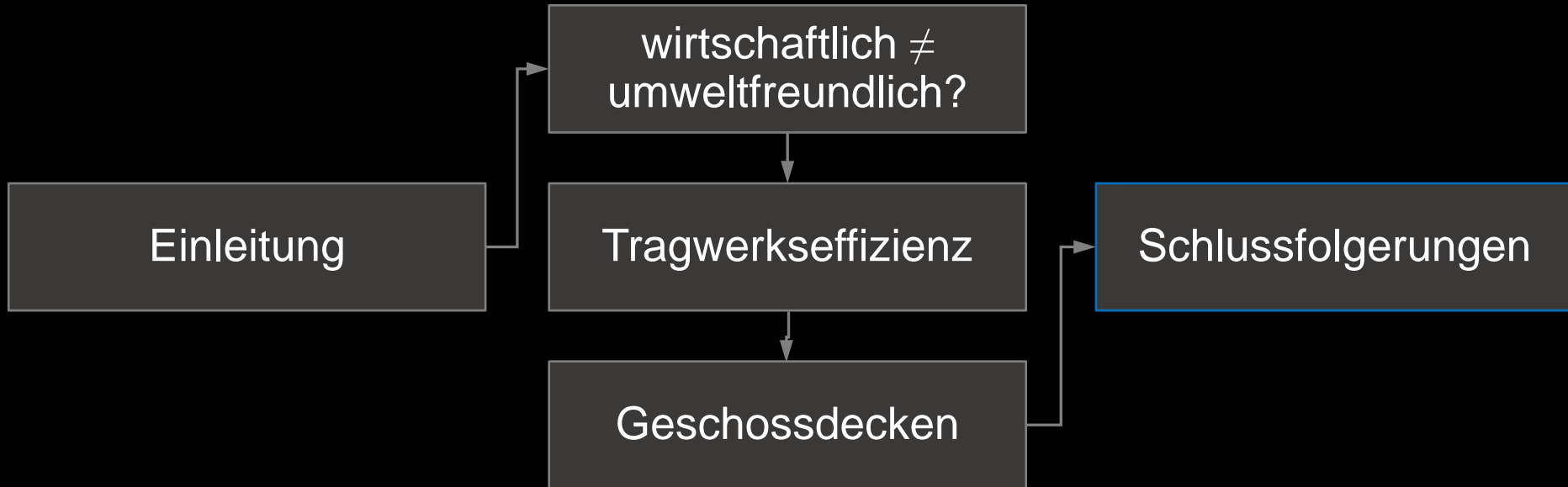
Mit digitaler Fabrikation besteht das Potential, noch effizientere Tragwerke wirtschaftlich herzustellen (Beispiel: Eggshell)

- zweiachsig tragende Decken
- punktgestützte Flachdecken
- optimierte Rippengeometrie
- optimierte Bewehrungsführung

[NCCR dfab Demonstrator 3x3 m, Burger, Huber, Mata-Falcón 2021]



# Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke



# Schlussfolgerungen

Betonbauten sind heute wirtschaftlich, aber oft nicht umweltfreundlich.

Dies liegt an den (im Vergleich mit den Lohnkosten) sehr niedrigen Kosten für Beton und Bewehrung.

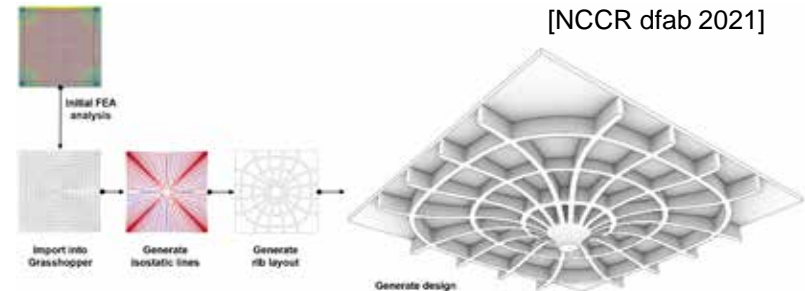
Daher sind heute Betonbauten, die viel mehr Material verbrauchen als nötig, dafür aber einfach und schnell gebaut werden können, meist günstiger als statisch effiziente Tragwerke.



# Schlussfolgerungen

Betonbauten müssen wieder materialeffizient – und damit umweltfreundlich – werden.

Die damit verbundenen Mehrkosten können durch den Einbezug der Herstellung im Tragwerksentwurf, und / oder die Entwicklung neuer Herstellungsverfahren reduziert werden.

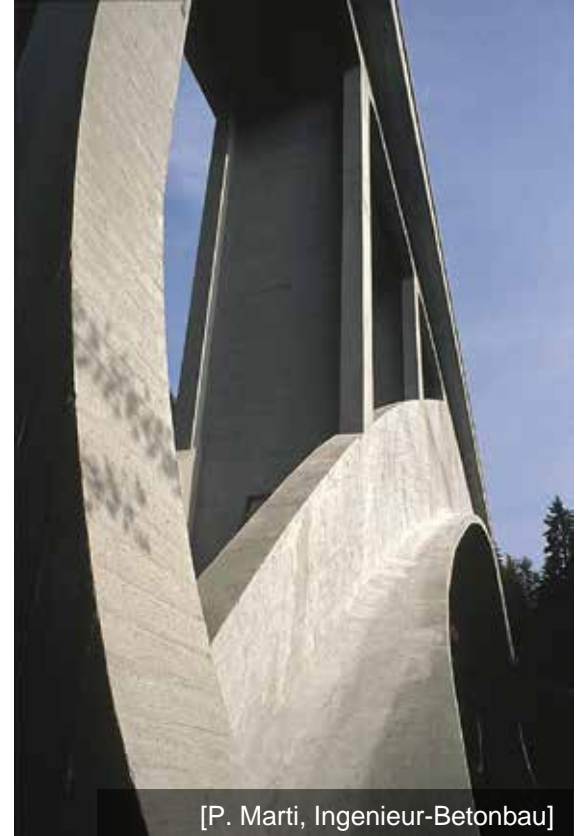


# Schlussfolgerungen

---

Die resultierenden, statisch effizienten Betonbauten sind im Vergleich mit anderen Bauweisen nach wie vor wirtschaftlich, zudem aber auch hinsichtlich Umweltfreundlichkeit konkurrenzfähig.

Damit können (und müssen) wir Bauingenieurinnen und Bauingenieure bereits heute unseren Beitrag zum Klimaschutz leisten.



[P. Marti, Ingenieur-Betonbau]



Holcim

A MEMBER OF  
 **HOLCIM**