

28. Münchener Massivbau Seminar – 22. November 2024

Betonbau – Quo vadis?

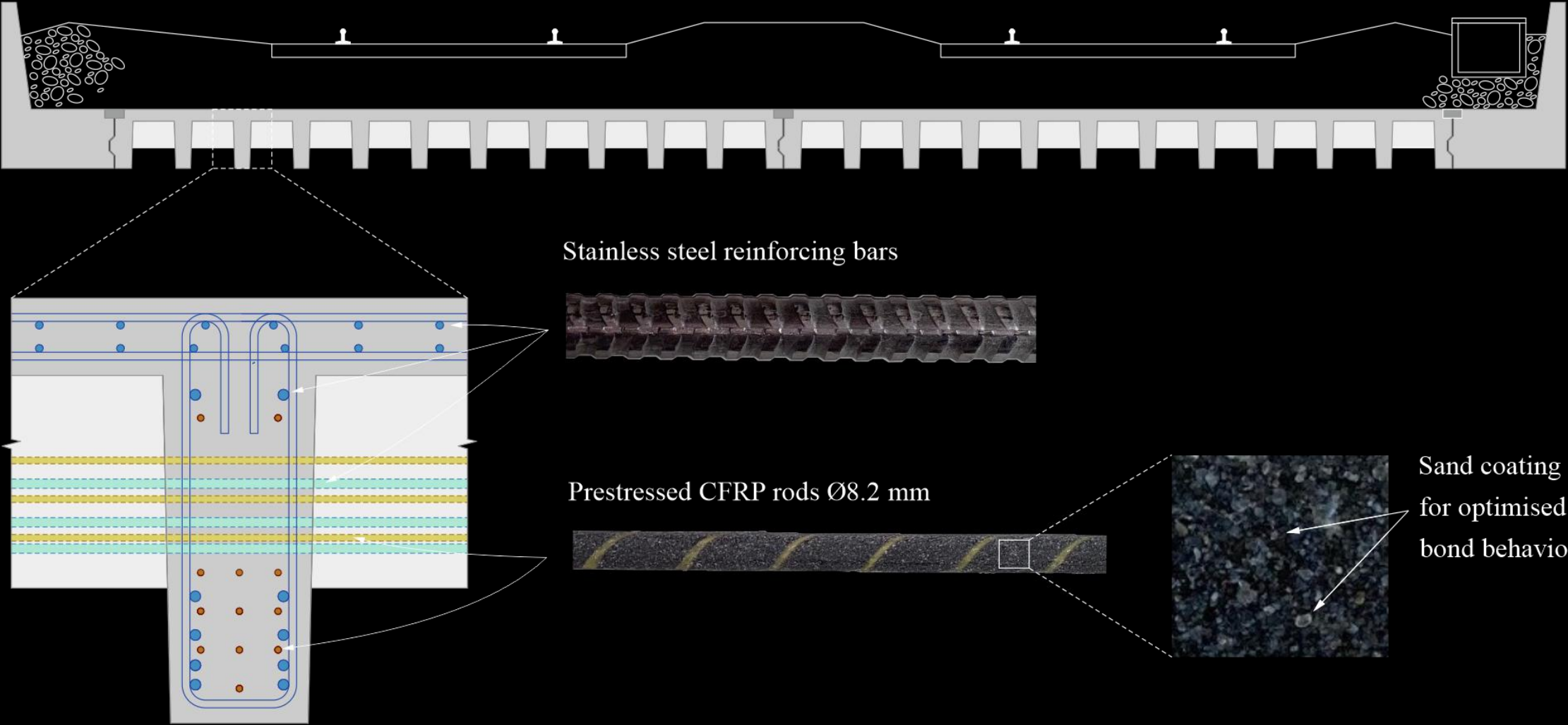
Prof. Dr. Walter Kaufmann

ETH Zürich

Institut für Baustatik und Konstruktion

SBB-Systembrücke aus ultrahochfestem, CFK-vorgespanntem Beton

Innosuisse Projekt : SBB / ETH Zürich / HSLU Luzern / EMPA / Alphabeton



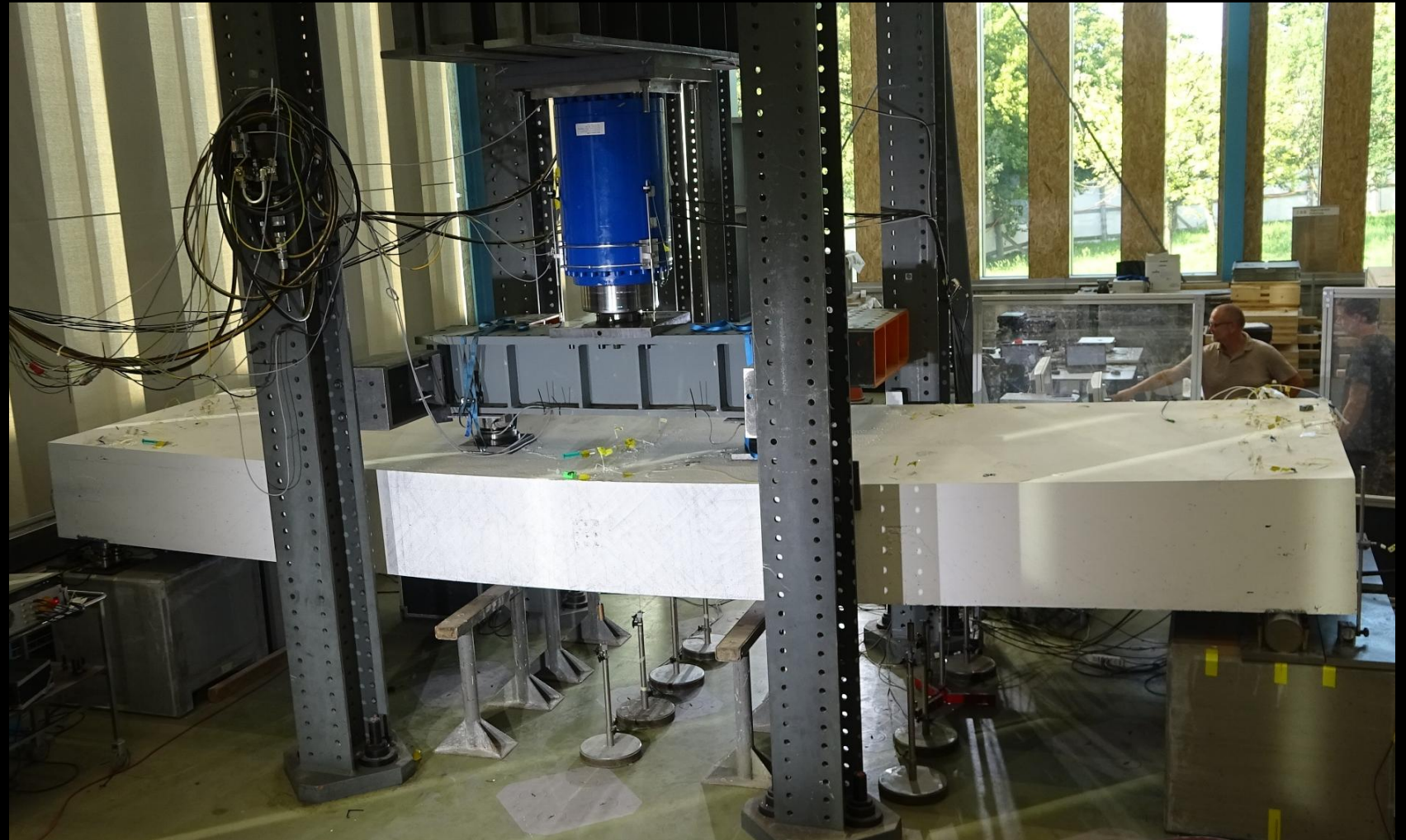
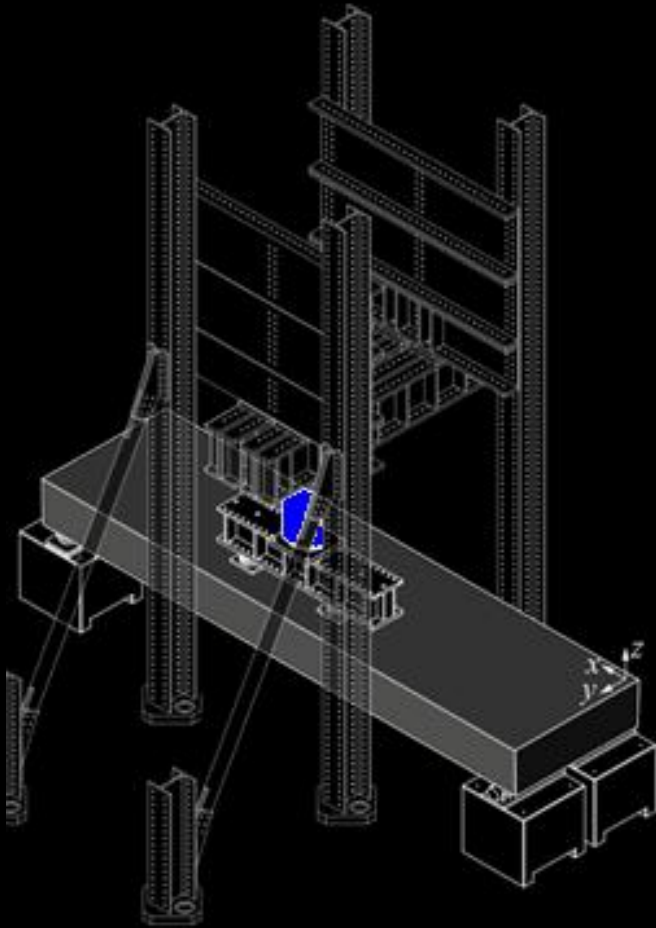
SBB-Systembrücke aus ultrahochfestem, CFK-vorgespanntem Beton

Innosuisse Projekt : SBB / ETH Zürich / HSLU Luzern / EMPA / Alphabeton



SBB-Systembrücke aus ultrahochfestem, CFK-vorgespanntem Beton

Innosuisse Projekt : SBB / ETH Zürich / HSLU Luzern / EMPA / Alphabeton





ETH zürich

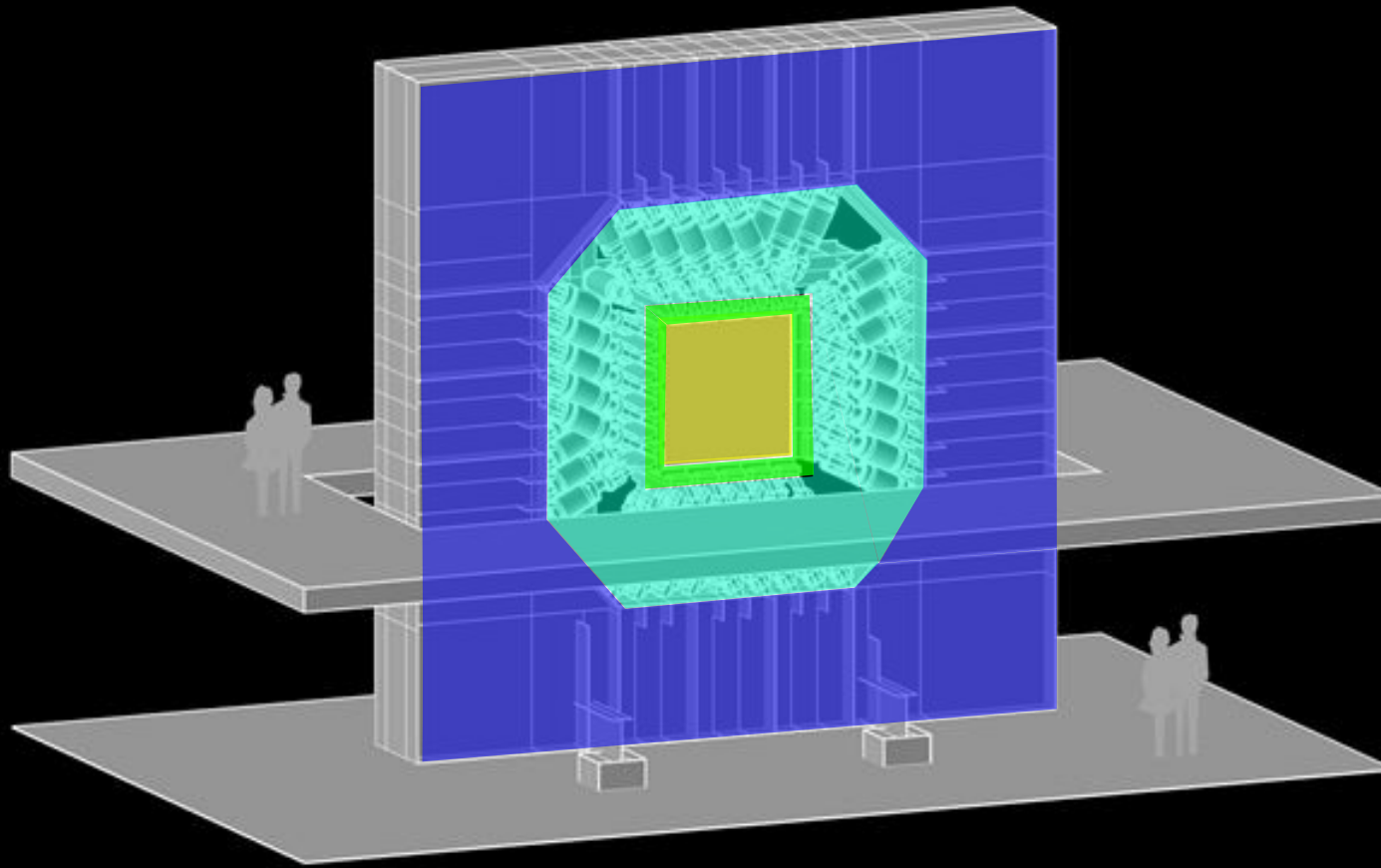
LUSET

LARGE UNIVERSAL
SHELL ELEMENT TESTER

2017

ETH zürich

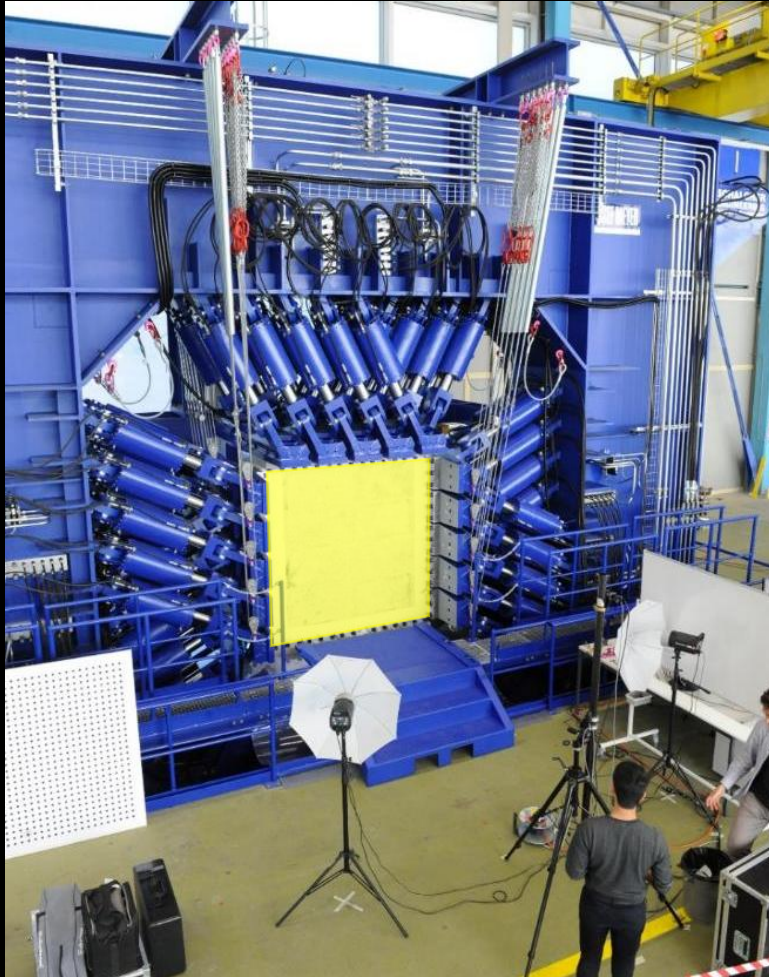
Large Universal Shell Element Tester



Prüfstand für ebene Schalenelemente

- Reaktionsrahmen aus Stahl (ca. 100 t)
- Hydrauliksystem @ 285 bar
 - ... 80 Pressen in Ebene (+1.2/-1.6 MN)
 - ... 20 Pressen aus Ebene (+1.0/-1.3 MN)
 - ... 20 Regelkreise / Achsen
- Quasi-homogene Beanspruchung durch 5 Joche pro Elementseite (total 20)
- Prüfkörper 2.00·2.00 m
Dicke bis 50 cm (üblich 0.25...0.35 m)

Large Universal Shell Element Tester

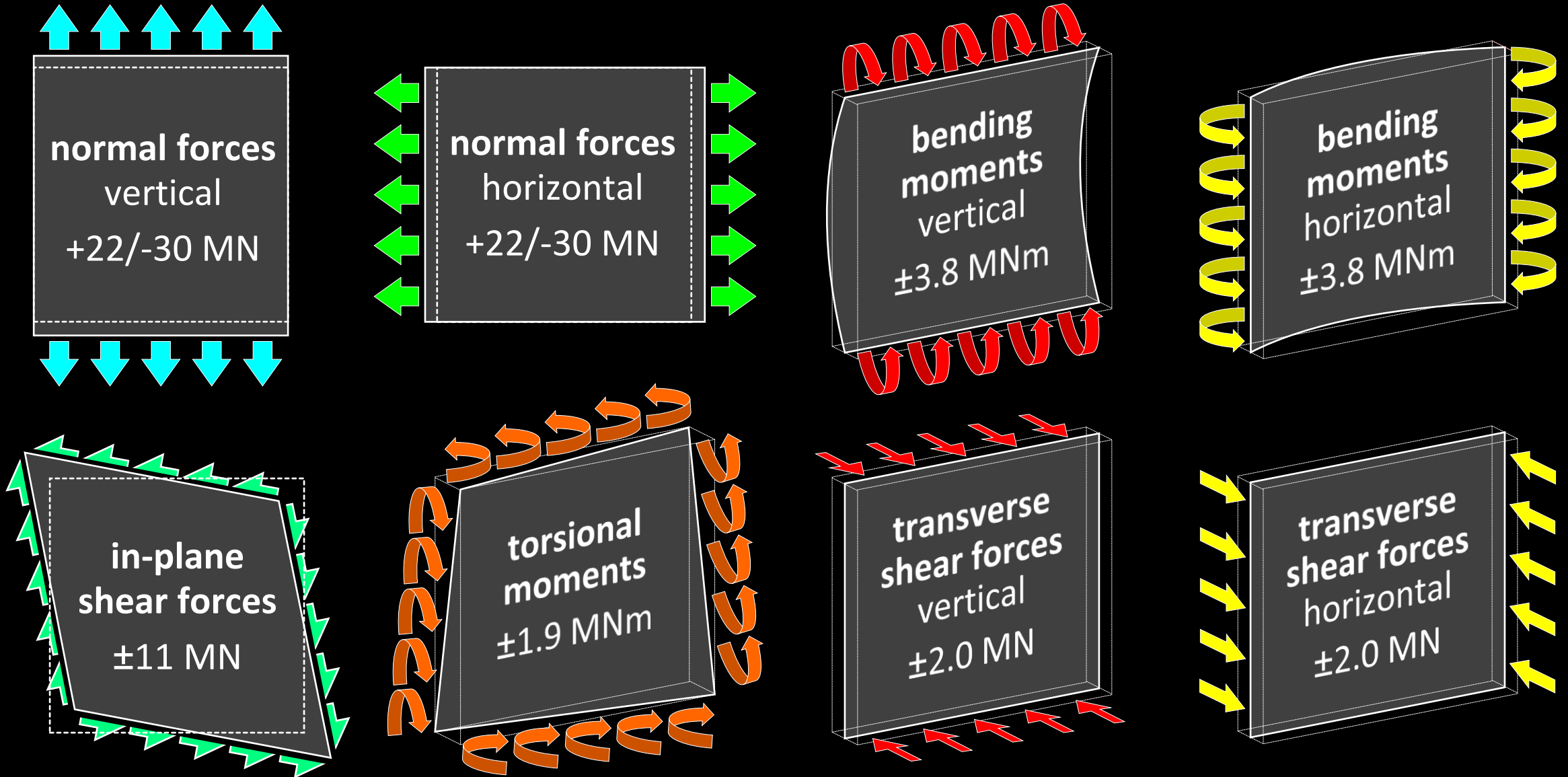


Prüfstand für ebene Schalenelemente

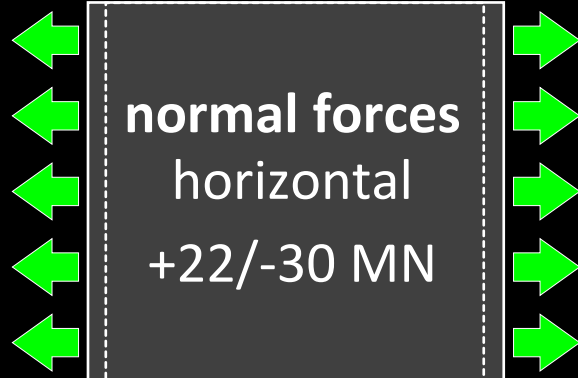
- Reaktionsrahmen aus Stahl (ca. 100 t)
- Hydrauliksystem @ 285 bar
 - ... 80 Pressen in Ebene (+1.2/-1.6 MN)
 - ... 20 Pressen aus Ebene (+1.0/-1.3 MN)
 - ... 20 Regelkreise / Achsen
- Quasi-homogene Beanspruchung durch 5 Joche pro Elementseite (total 20)
- Prüfkörper 2.00·2.00 m
Dicke bis 50 cm (üblich 0.25...0.35 m)
- 8 Spannungsergebende:
 $\{n_x, n_z, n_{zx}\}, \{m_x, m_z, m_{zx}\}, \{v_x, v_z\}$

(andere Belastungen möglich)

Large Universal Shell Element Tester

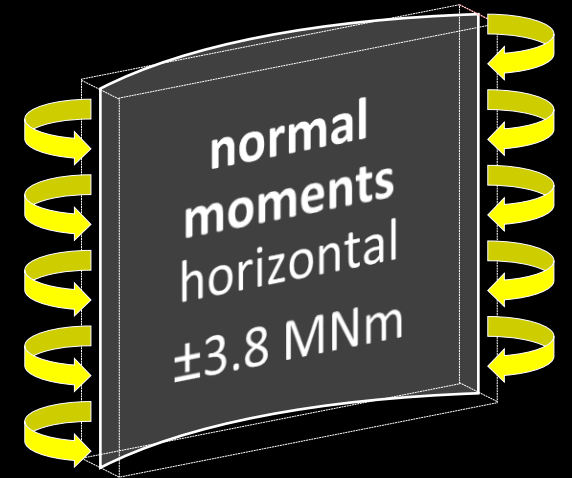
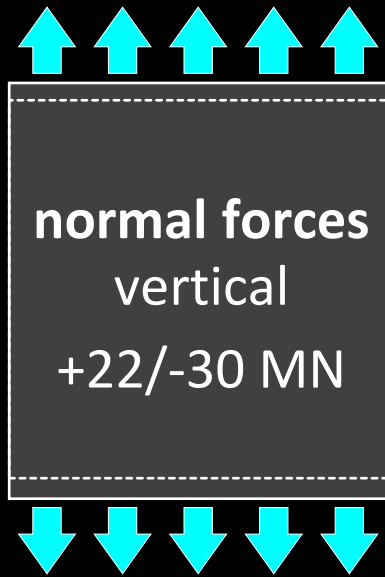


Large Universal Shell Element Tester



~ **Panel Tester**
University of Toronto
(0.89×0.89×0.07 m)

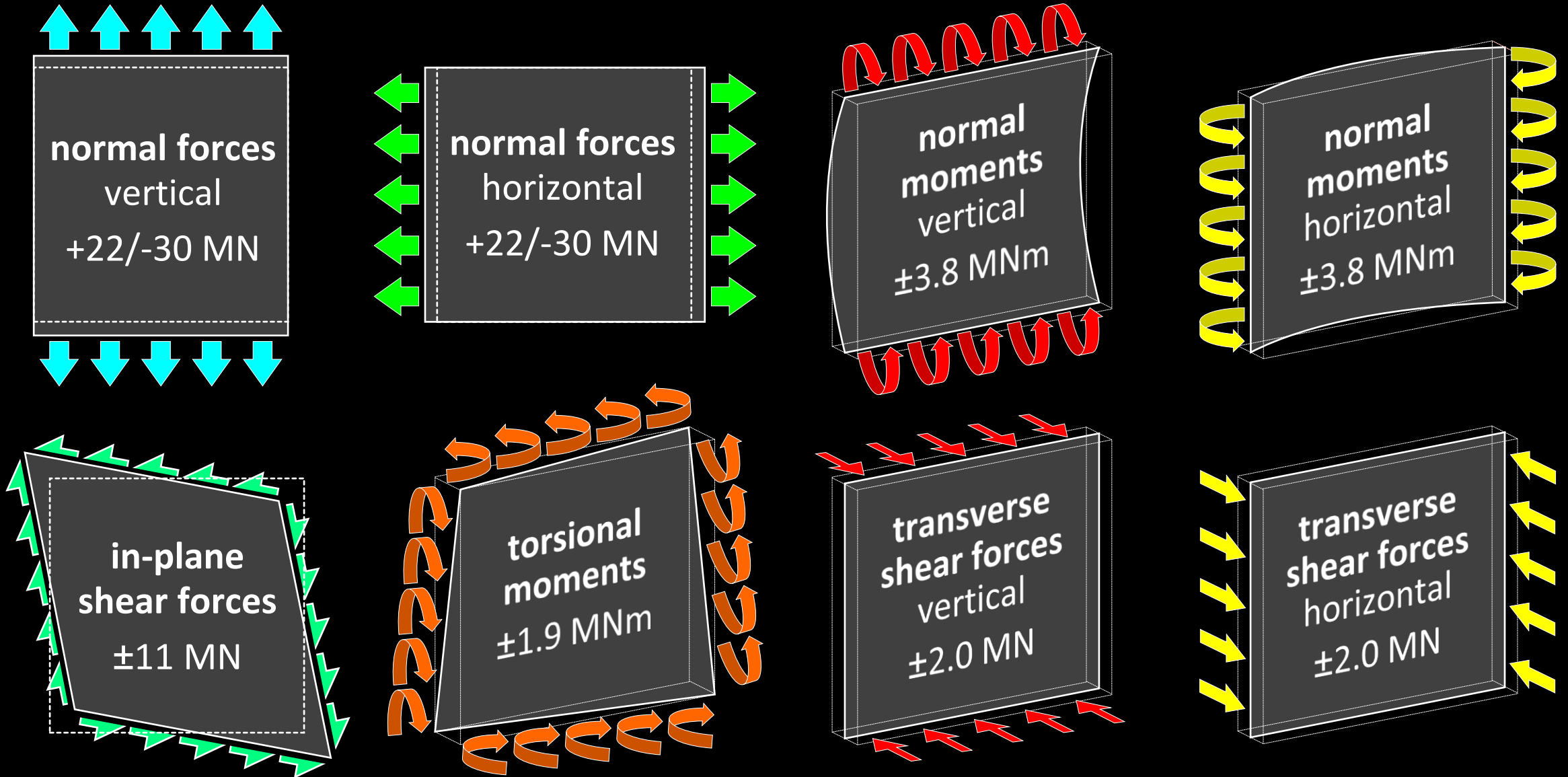
Large Universal Shell Element Tester



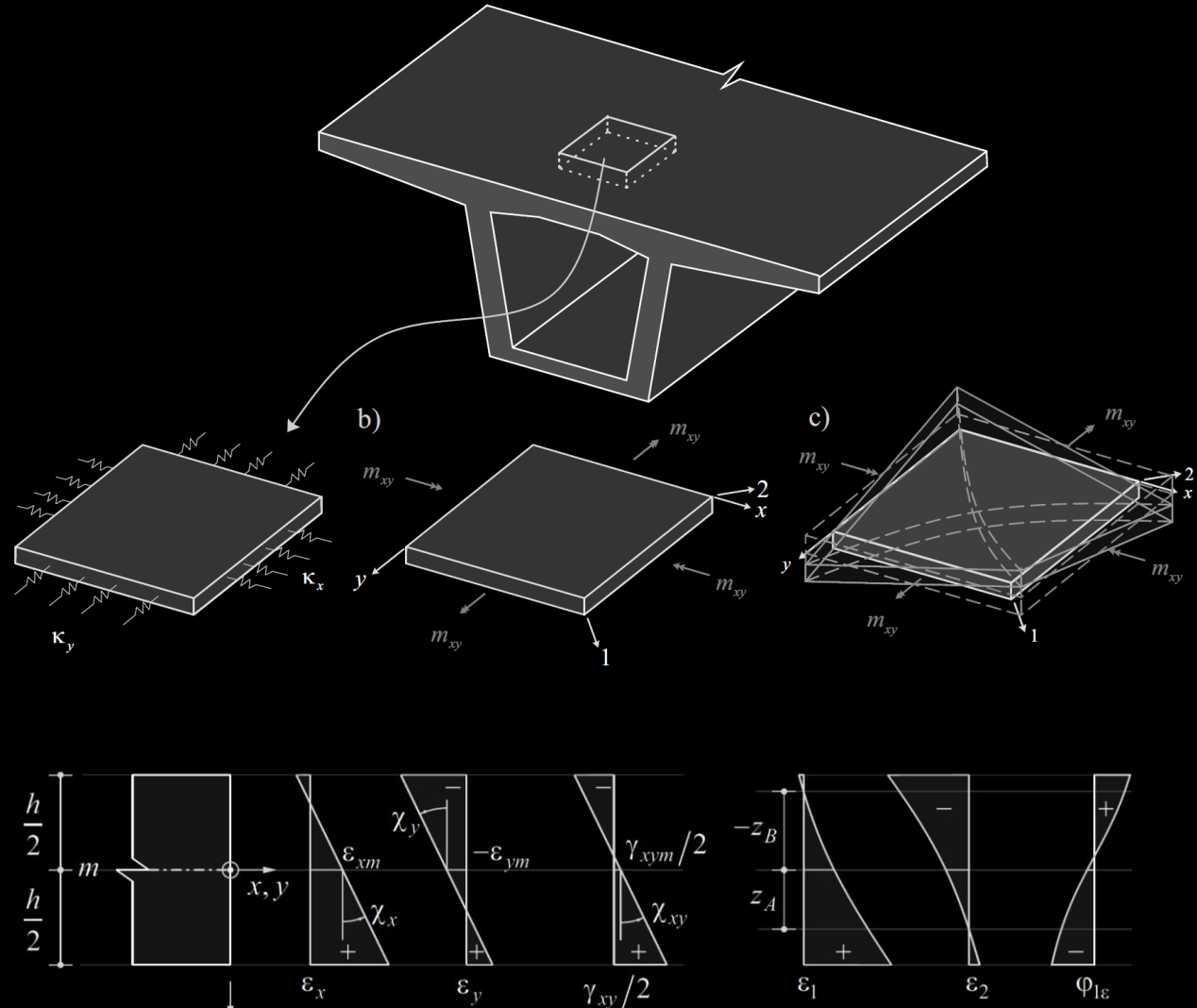
~ **Shell Element Tester**
University of Toronto
($1.52 \times 1.52 \times 0.35$ m)



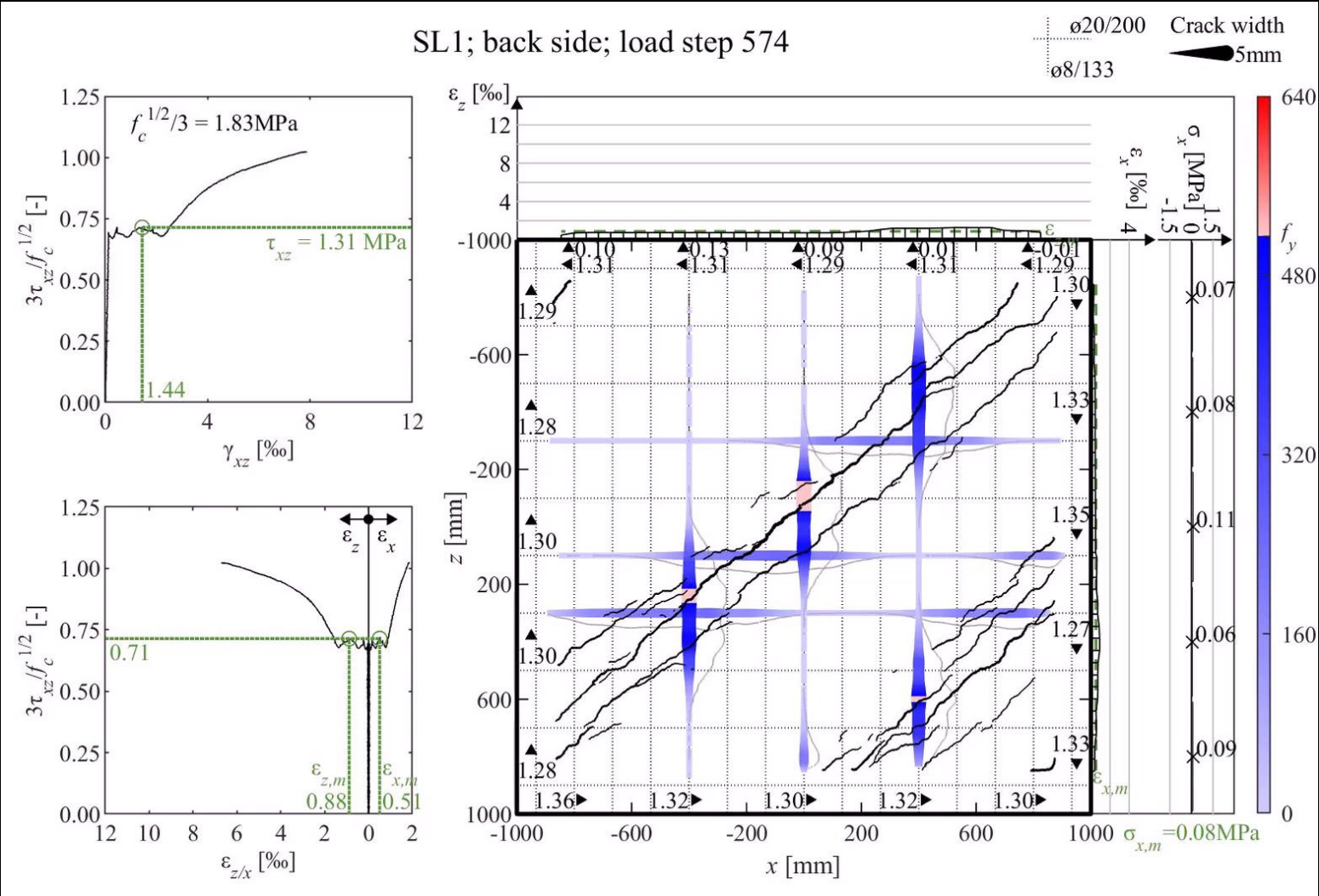
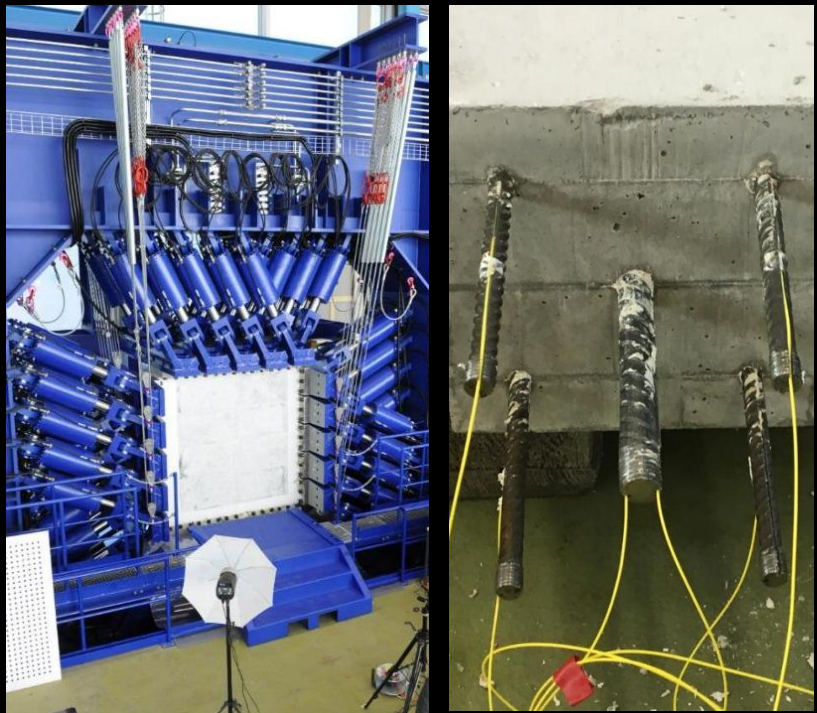
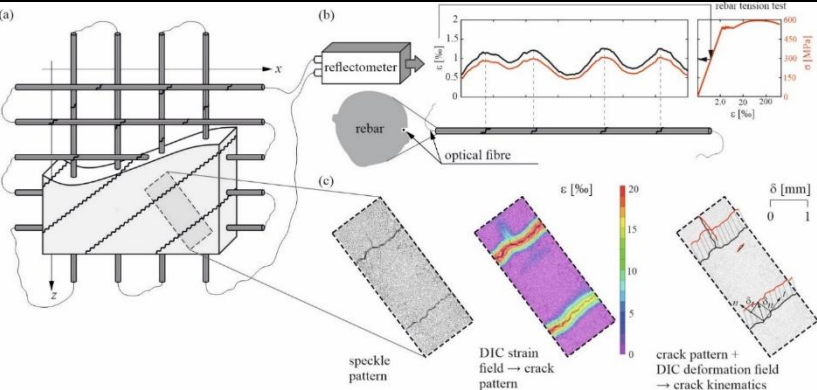
Large Universal Shell Element Tester



Stahlspannungen in Fahrbahnplatten (→ Membrandruckkräfte, Ermüdung)



Moderne Messtechnik



[Beck 2020]

Betonbau

Quo vadis?



Sydney Opera House [Bernard Gagnon]



Viaducto de Almonte [Arenas & Asociados]



Sunnibergbrücke [Tiefbauamt Graubünden]





Betonbau

Grundlage der modernen Zivilisation



Betonbau

Hauptbestandteil der alternden Infrastruktur

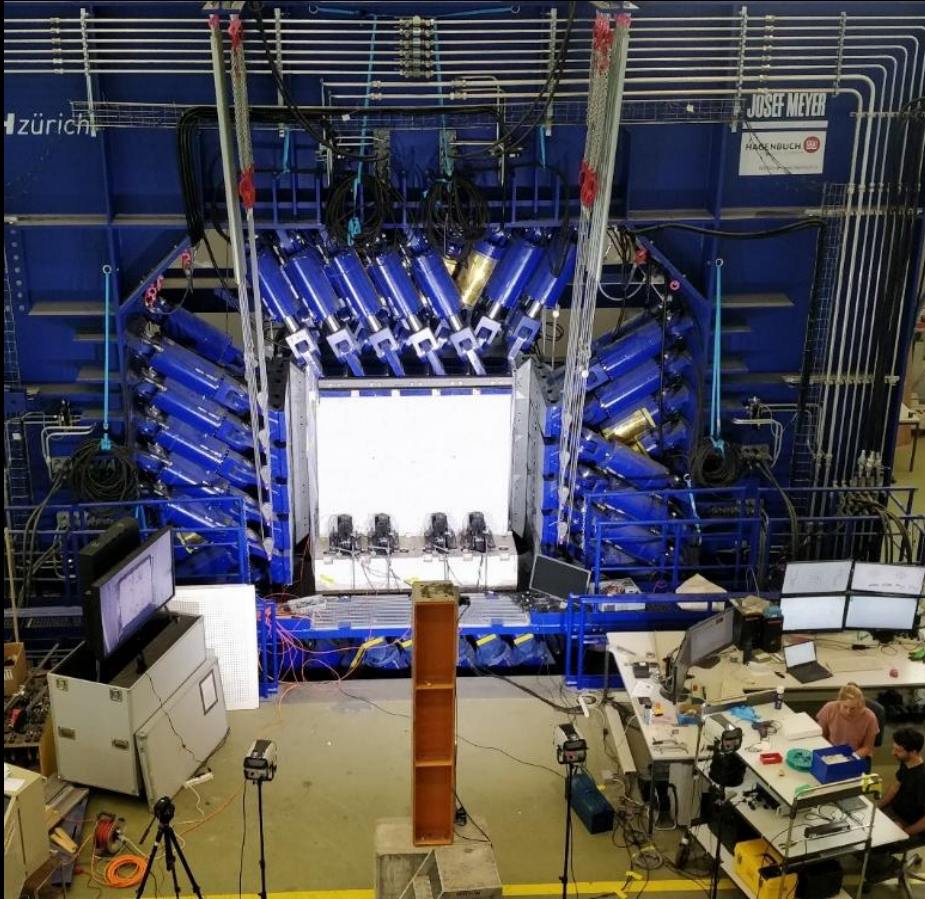






Carolabrücke [Landeshauptstadt Dresden]

Widerstand und Verformungsvermögen bei lokaler Korrosion



VENUE:
Politecnico di Milano
Polo Territoriale di Lecco Via
Gaetano Prevati 1/c Lecco,
Italy

<http://cacrcs.cte-eventi.com>

CACRCS DAYS 2025

ORGANIZED BY



COLLEGIO
DEI TECNICI DELLA
INDUSTRIALIZZAZIONE
EDILIZIA



ASSOCIAZIONE ITALIANA
CALCESTRUZZO
ARMATO E
PRECOMPRESSO



THE INTERNATIONAL
FEDERATION
FOR STRUCTURAL
CONCRETE

FIFTH EDITION

2025 • Lecco - June 30 / July 3

CAPACITY ASSESSMENT OF CORRODED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: FROM RESEARCH TO DAILY ENGINEERING EVALUATION

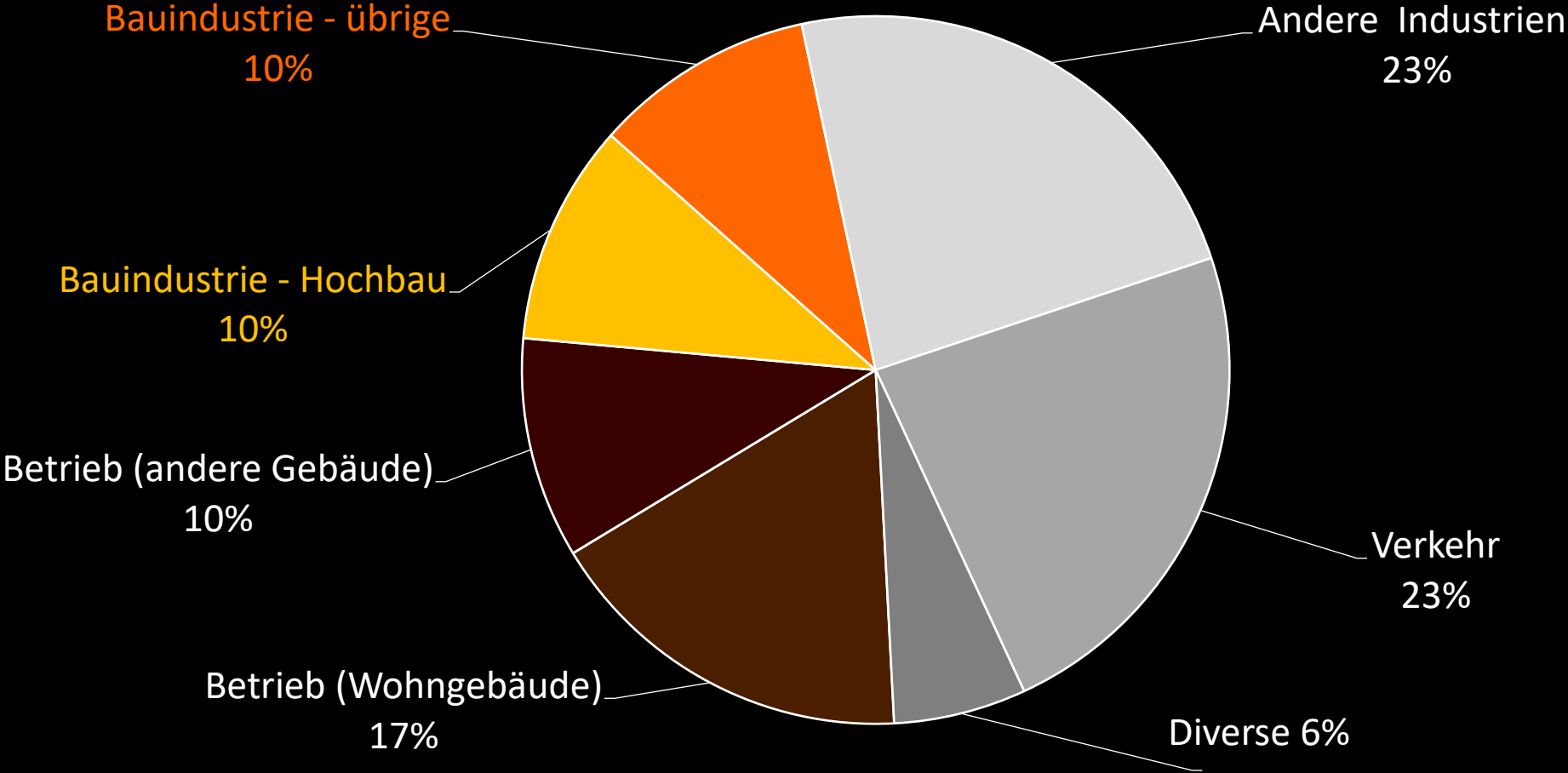
UNDER THE PATRONAGE OF



Betonbau

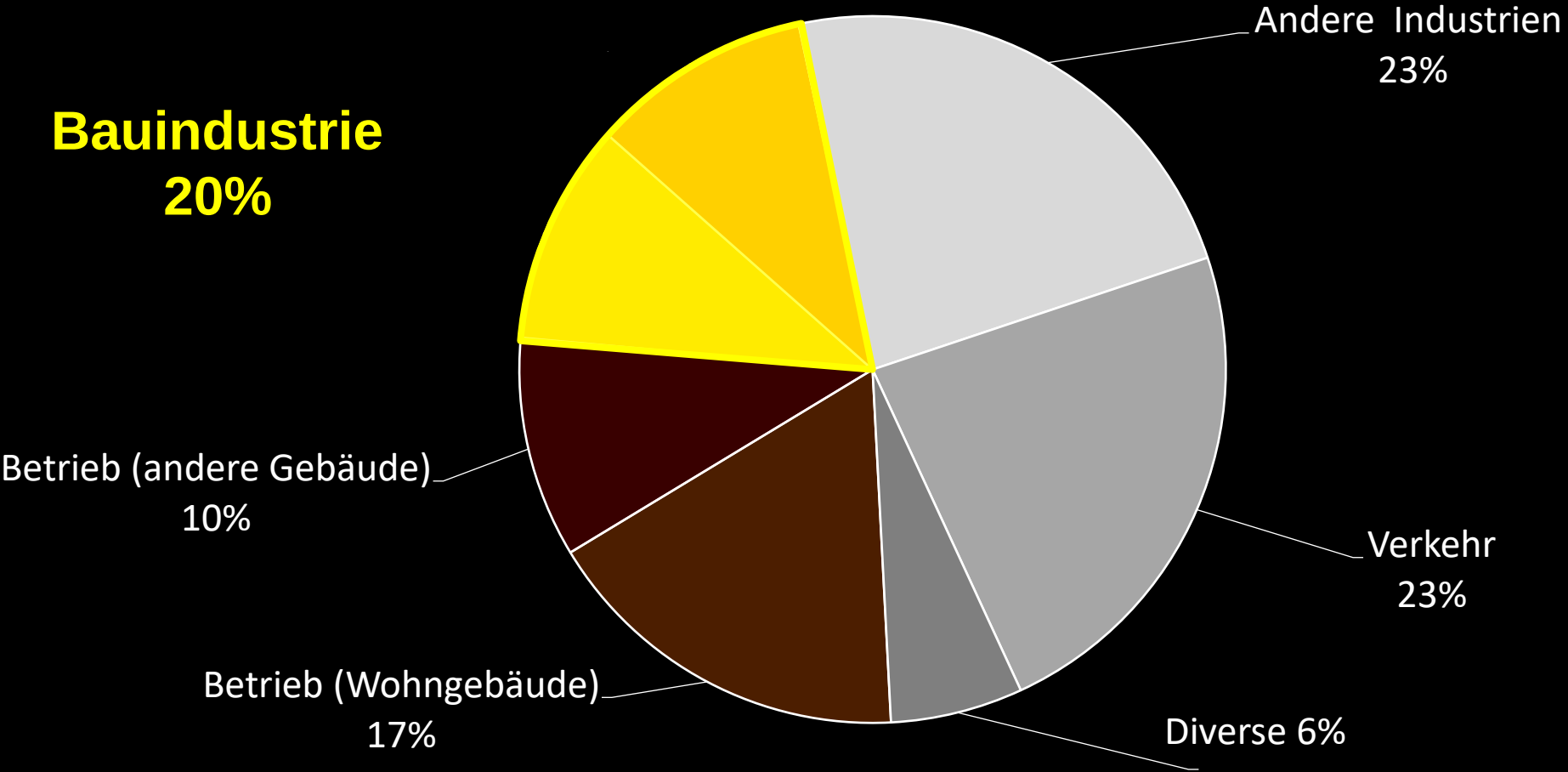
Massgebender Treiber des Klimawandels

Anteil des Bausektors an den weltweiten Treibhausgasemissionen, 2020
(total 31.6·10⁹ t)



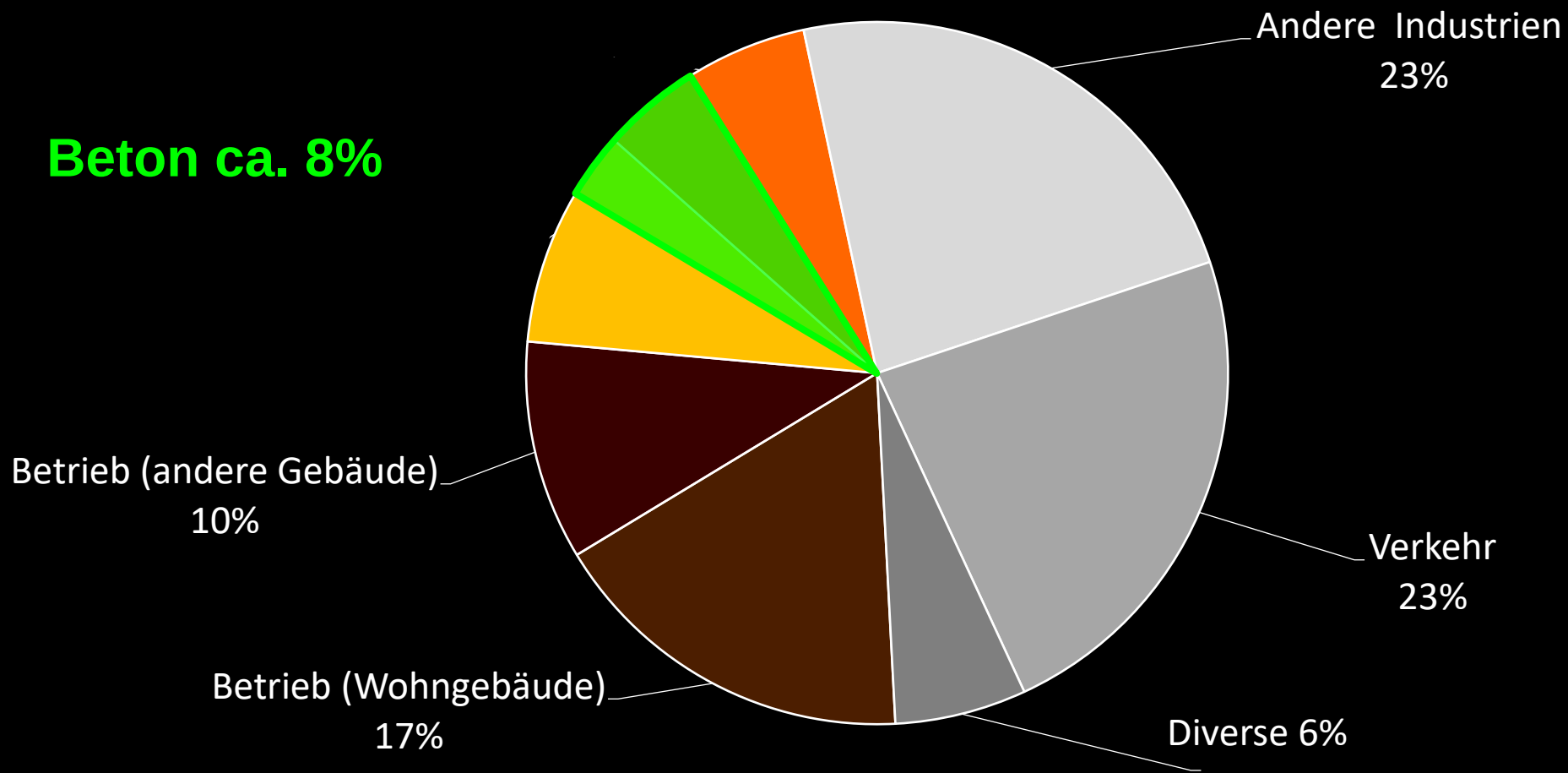
[data: UN environment programme - 2021 Global Status Report for Buildings and Construction]

Anteil des Bausektors an den weltweiten Treibhausgasemissionen, 2020
(total $31.6 \cdot 10^9$ t)



[data: UN environment programme - 2021 Global Status Report for Buildings and Construction]

Anteil des Bausektors an den weltweiten Treibhausgasemissionen, 2020
(total 31.6·10⁹ t)



[data: UN environment programme - 2021 Global Status Report for Buildings and Construction]



7/12

Klimakiller: BÖSE, BÖSER, BETON

[ARD Mediathek]





Karl Culmann
1821-1881
Prof. 1855-1881



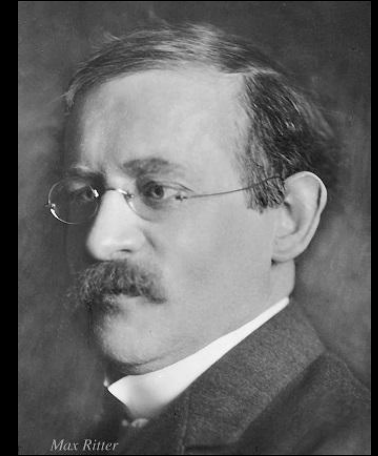
Karl Wilhelm Ritter
1847-1906
Prof. 1882-1904



Emil Mörsch
1872-1950
Prof. 1904-1908



Arthur Rohn
1878-1956
Prof. 1908-26/48



Max Ritter
1884-1946
Prof. 1927-1946



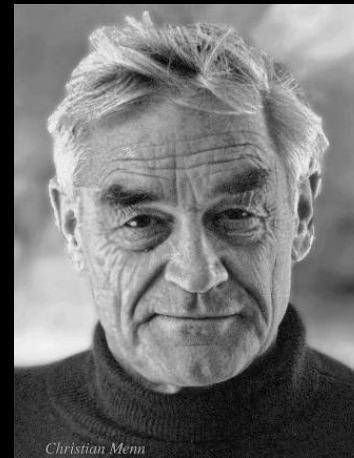
Pierre Lardy
1903-1958
Prof. 1946-1958



Bruno Thürlimann
1923-2008
Prof. 1960-1990



Hugo Bachmann
1935
Prof. 1969-2000



Christian Menn
1927-2018
Prof. 1971-1992



Peter Marti
1949
Prof. 1990-2014

CEMENTBULLETIN

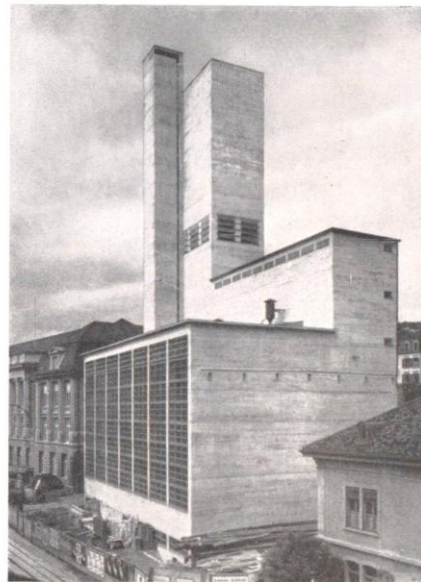
FEBRUAR 1934

JAHRGANG 2

NUMMER 2

Der Eisenbeton

ist das Material der neuen Zeit



Fernheizwerk der
Eidg. Techn. Hochschule
Zürich

Architekt: Prof. Salvis-
berg, Zürich
Unternehmung:
Züblin & Co. A.G., Zürich

Dem Beton die Zukunft!

Betonbau

Quo vadis?

Verdoppelung der
Geschossfläche bis 2060

ein neues Chicago
alle zwei Wochen

[Andrew Horne, Flickr / John Ochsendorf, 2024]

Verdoppelung der
Geschossfläche bis 2060

80% davon in Entwicklungs-
und Schwellenländern



[Cairo traffic jam / fwalidhassanain, flickr.com]

Verdoppelung der
Geschossfläche bis 2060

80% davon in Entwicklungs-
und Schwellenländern

Weniger bauen?

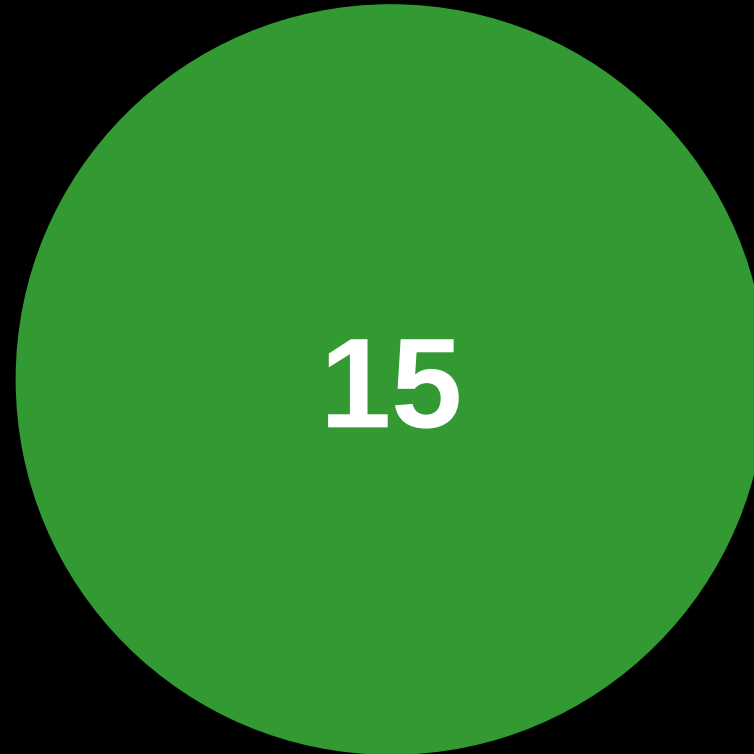
Teurer bauen?



> 25% der Weltbevölkerung
leben in Slums

jährlicher Betonverbrauch
(weltweit, 2009)

[Gm³]



jährliche Holzproduktion
(weltweit, 2020)

[Gm³]



Beton durch Holz ersetzen?

... nur teilweise möglich

... meist teurer

... nur bedingt nachhaltig
(siehe folgende Folien)



Ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit

Ganzheitliche Betrachtung der Treibhausgasemissionen (Beispiel: Geschossdecken)

$$\underbrace{\text{jährliche Emissionen}}_{\text{drastische Reduktion zwingend}} \text{ pro } \underbrace{\text{Nutzung}}_{\text{Bedürfnisse und Ansprüche der Gesellschaft}} = \frac{\overbrace{\frac{\text{Emissionen}}{\text{Masse}}}^{\text{Emissionen der Baustoffe reduzieren}} \cdot \overbrace{\frac{\text{Masse}}{\text{Nutzfläche}}}^{\text{effiziente Tragwerke konzipieren}} \cdot \overbrace{\frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Nutzung}}}^{\text{Komfort-niveau reduzieren}}}{\underbrace{\text{Nutzungsdauer}}_{\text{Dauerhaftigkeit, Kreislaufwirtschaft, Flexible Nutzung}}}$$

Ganzheitliche Betrachtung der Treibhausgasemissionen (Beispiel: Geschossdecken)

	Spezifische Emissionen	Tragwerks- effizienz	Indirekte Einflüsse	Komfort- anspruch
$\frac{E}{U \cdot T_{service}}$	$= \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$			
Emissionen pro Nutzung und Zeit	Nutzungsdauer			

Ganzheitliche Betrachtung der Treibhausgasemissionen

$$\frac{E}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{Spezifische} \\ \text{Emissionen} \end{array} \cdot \frac{\begin{array}{c} \text{Tragwerks-} \\ \text{effizienz} \end{array} \cdot \begin{array}{c} \text{Indirekte} \\ \text{Einflüsse} \end{array} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}$$

The equation is presented with a light blue rounded rectangle highlighting the terms inside the large parentheses. The labels above the terms are: 'Spezifische Emissionen' (blue), 'Tragwerks-effizienz' (green), and 'Indirekte Einflüsse' (red). The terms themselves are: $\text{CO}_2\text{-eq}$ (blue), M (green), A_{floor} (green), $\pm$ (black), E_{ind} (red), and U (black).

nachfolgend kurz erläutert

Tragwerkseffizienz

$$\frac{E}{U \cdot T_{service}} = \frac{\overset{\text{Tragwerks-}}{\text{effizienz}} \left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$$

Tragwerkseffizienz

$$\frac{E}{U \cdot T_{service}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$$

Tragwerks-
effizienz

$$\frac{M}{A_{floor}} = \frac{\rho}{\left\{ f_{d,mat}, E_{mat} \right\}} \cdot \frac{t_m}{\left\{ W, I \right\}} \cdot \left\{ \alpha_m \cdot l^2, \frac{\alpha_w \cdot l^4}{w_{adm}} \right\} \cdot \left(\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k \right)$$

Tragwerks-
effizienz

Spezif. Leistung
Baustoff

Effizienz
Querschnitt

Effizienz
Tragsystem

Einwirkungen und
Zuverlässigkeit

Leistungsbezogener Materialvergleich

$$\frac{E}{U \cdot T_{service}} = \frac{\overset{\text{Spezifische Emissionen}}{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right)} \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$$

$$\frac{M}{A_{floor}} = \frac{\rho}{\left\{ f_{d,mat}, E_{mat} \right\}} \cdot \frac{t_m}{\left\{ W, I \right\}} \cdot \left\{ \alpha_m \cdot l^2, \frac{\alpha_w \cdot l^4}{w_{adm}} \right\} \cdot \left(\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k \right)$$

Spezif. Leistung
Baustoff

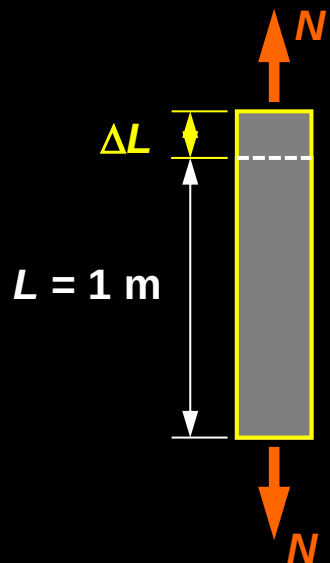
Leistungsbezogener Materialvergleich



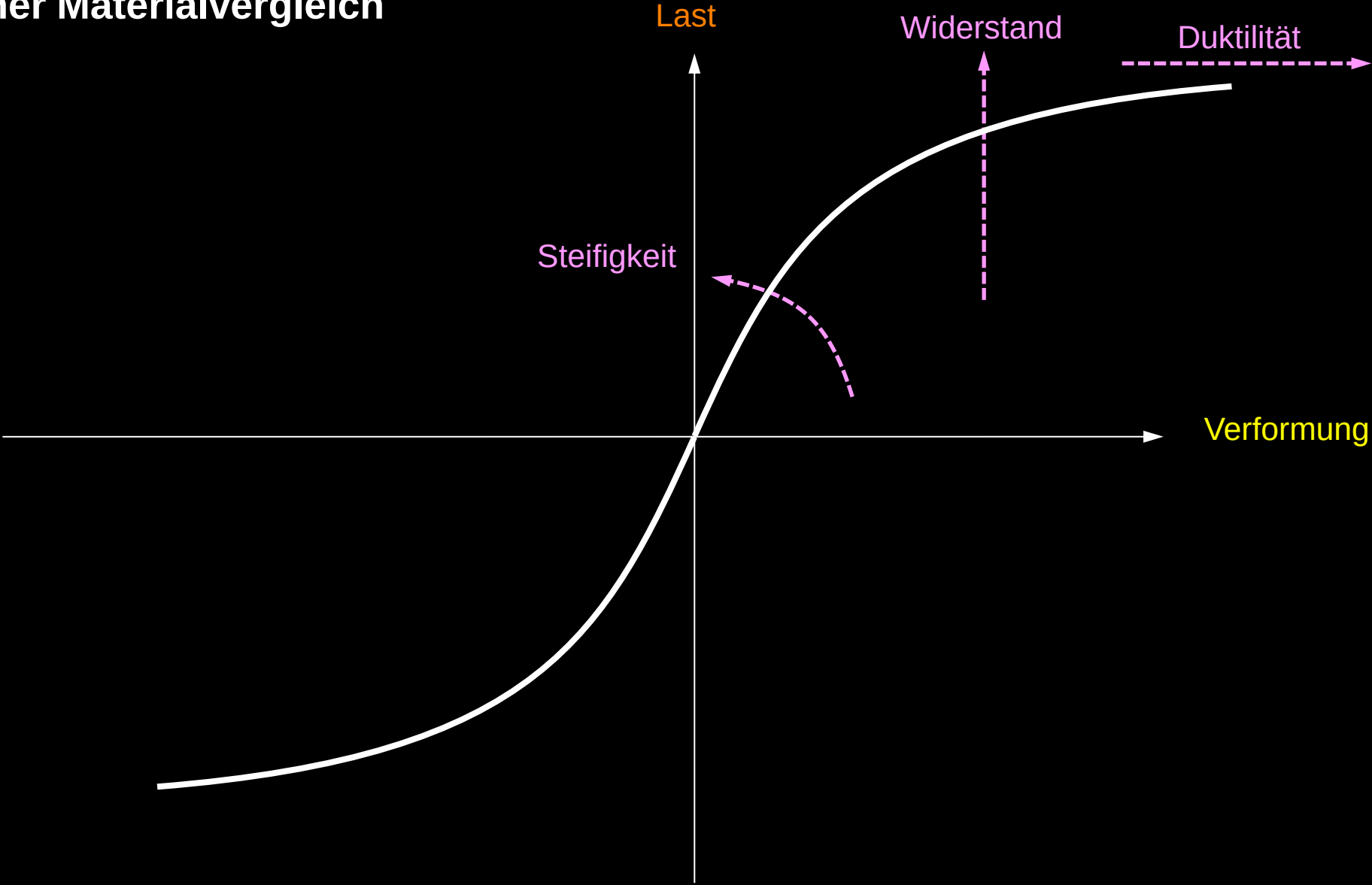
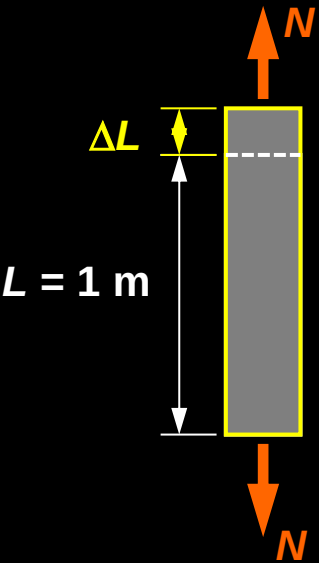
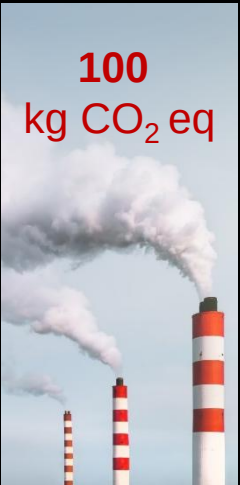
**Sinnvoller Vergleich von Baustoffen für
Tragwerke:**

Zug-/Druckglied
Länge 1 m
100 kg CO₂-eq

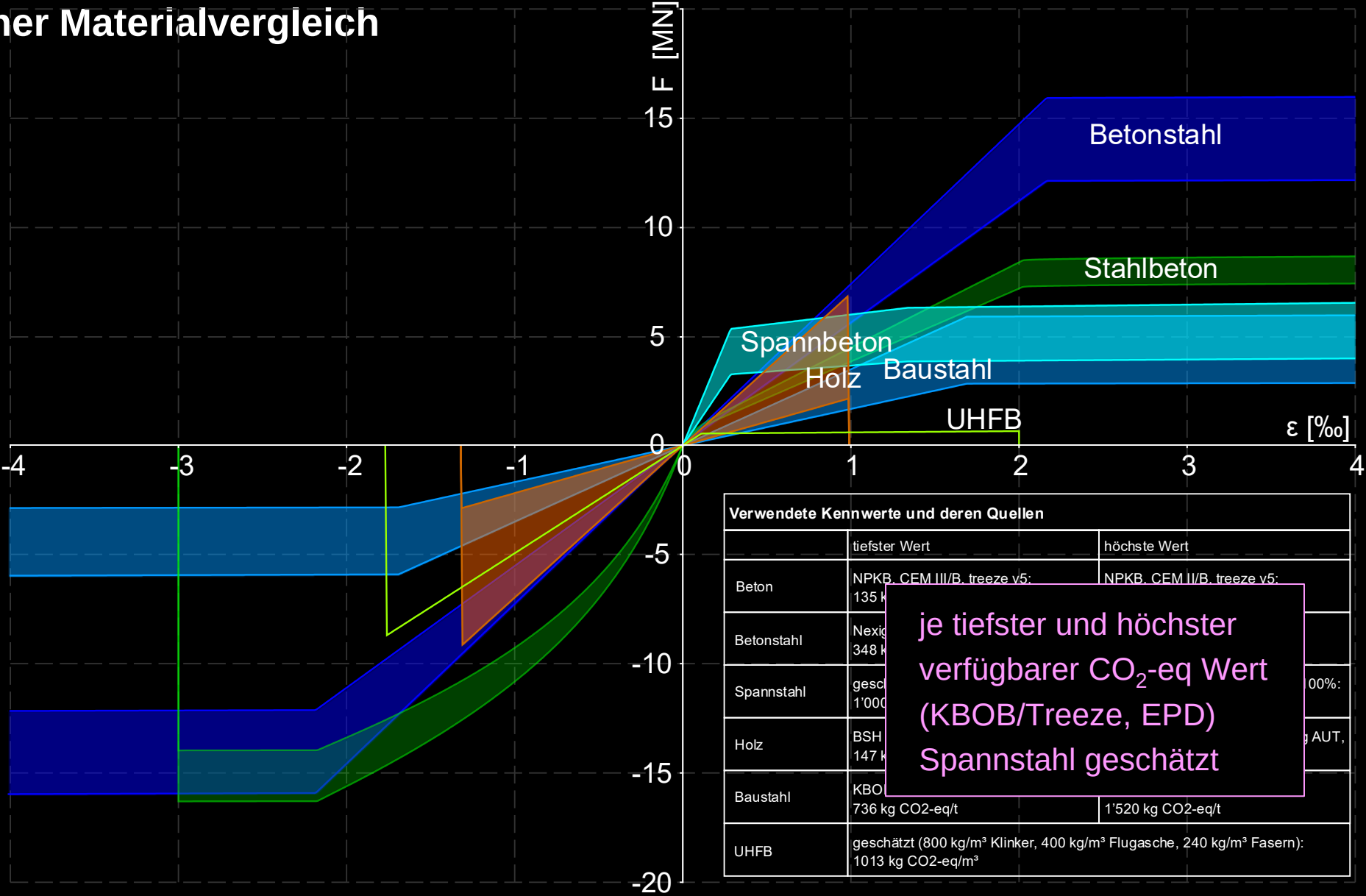
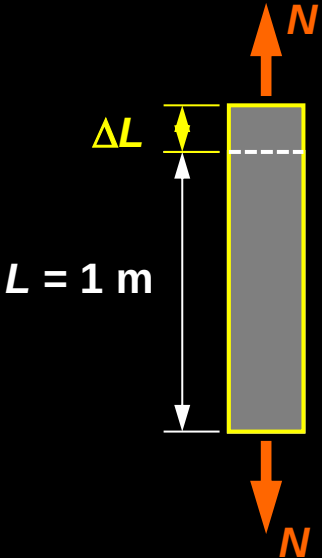
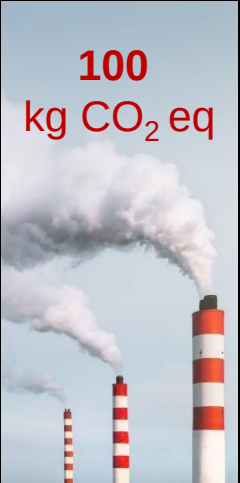
→Last-Verformungsverhalten?



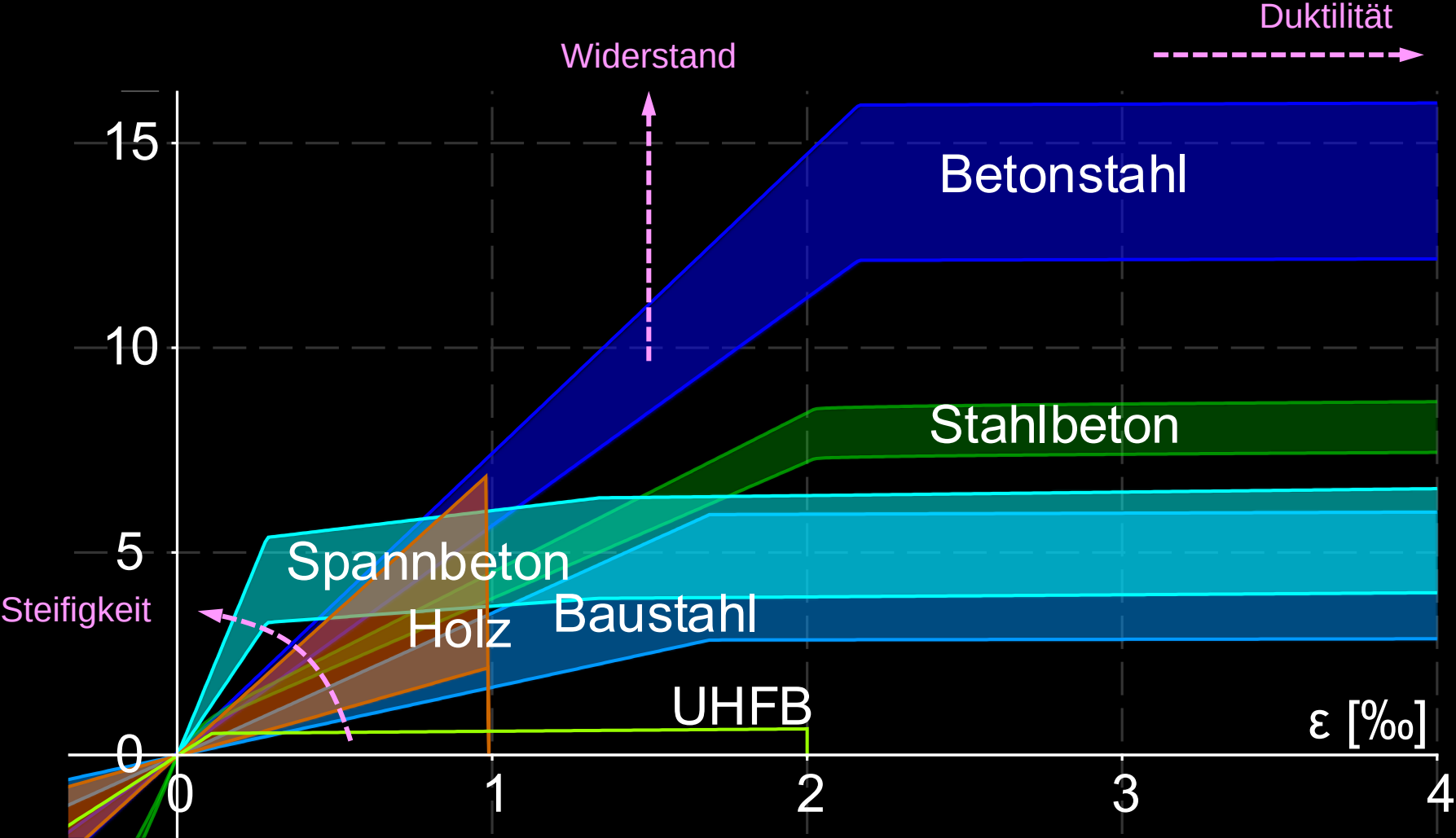
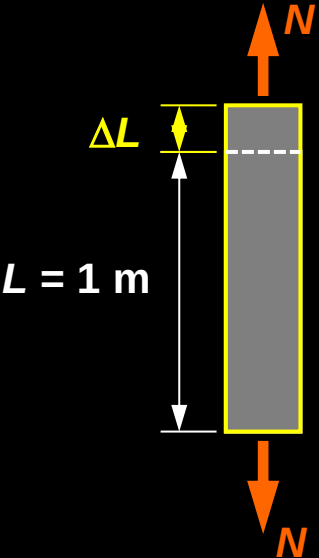
Leistungsbezogener Materialvergleich



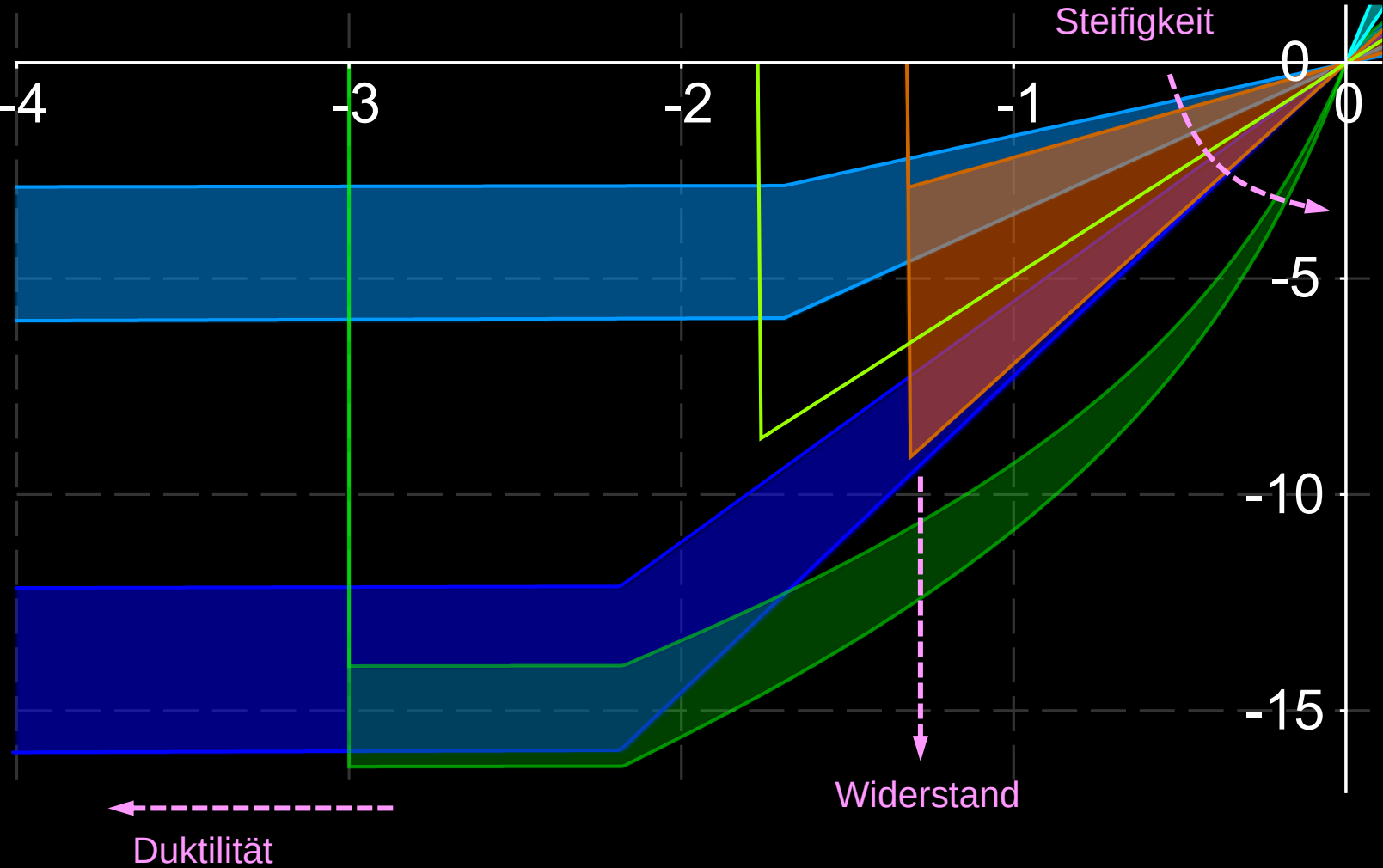
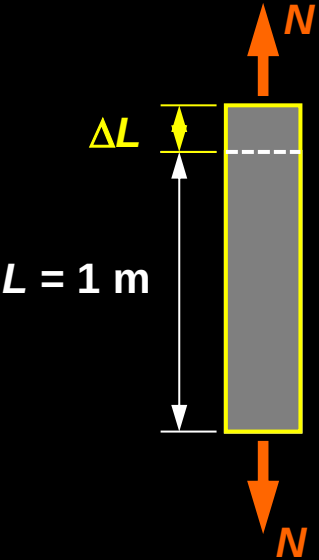
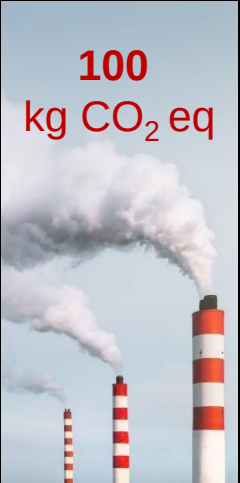
Leistungsbezogener Materialvergleich



Leistungsbezogener Materialvergleich



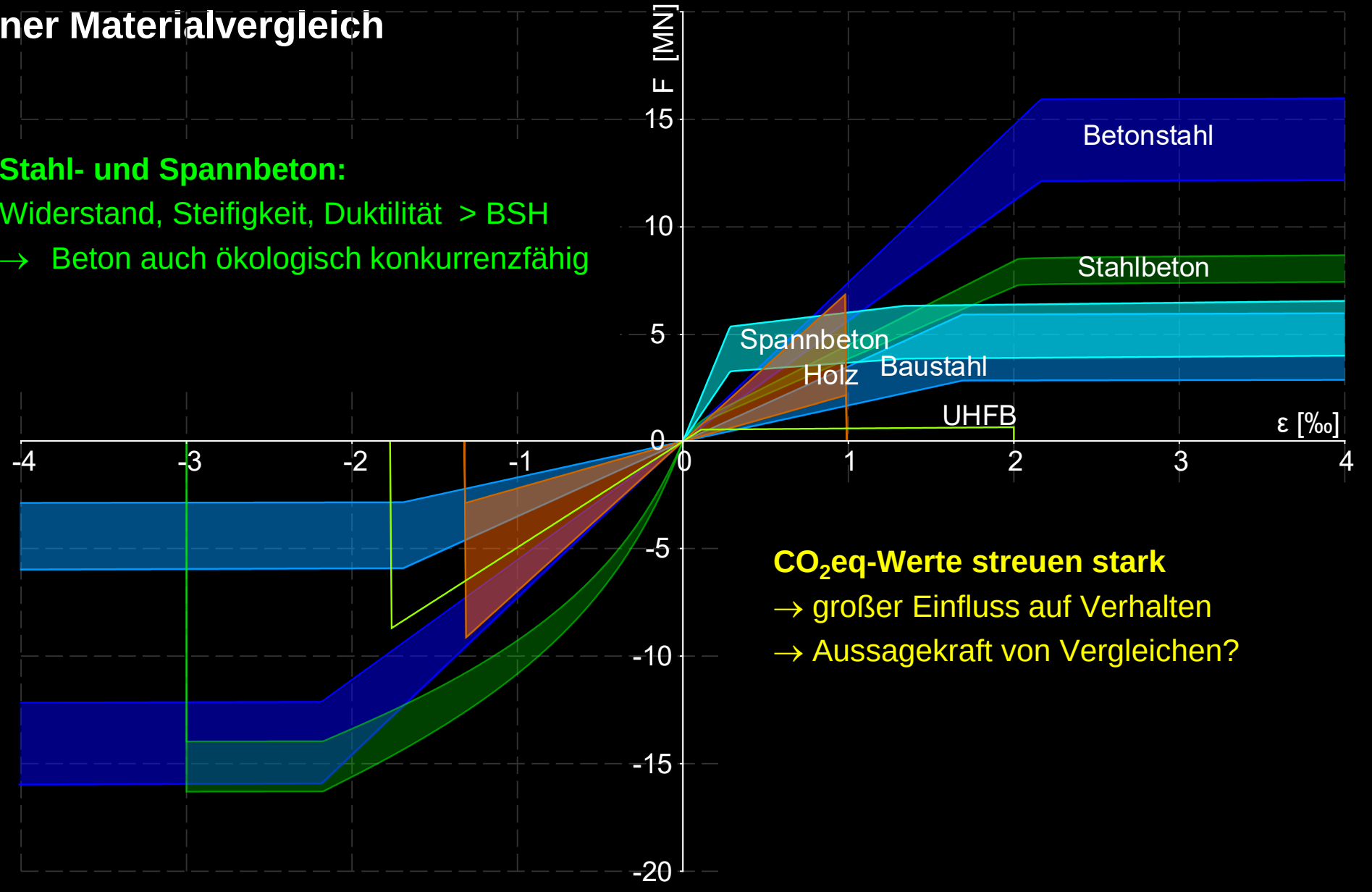
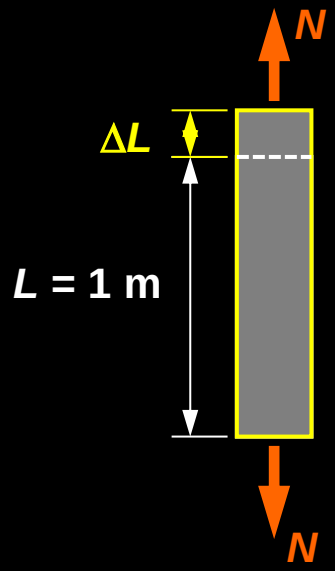
Leistungsbezogener Materialvergleich



Leistungsbezogener Materialvergleich



Stahl- und Spannbeton:
 Widerstand, Steifigkeit, Duktilität > BSH
 → Beton auch ökologisch konkurrenzfähig



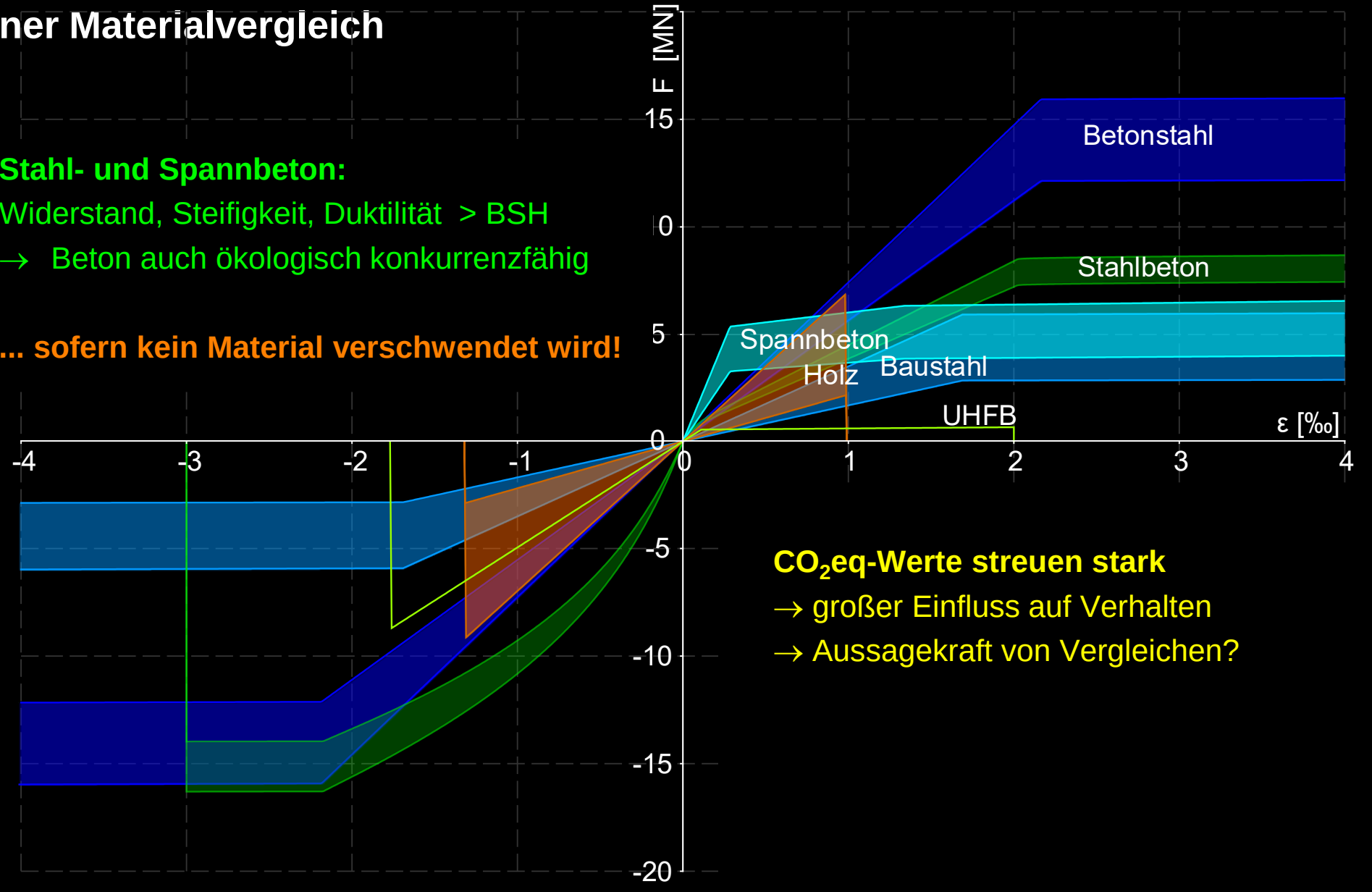
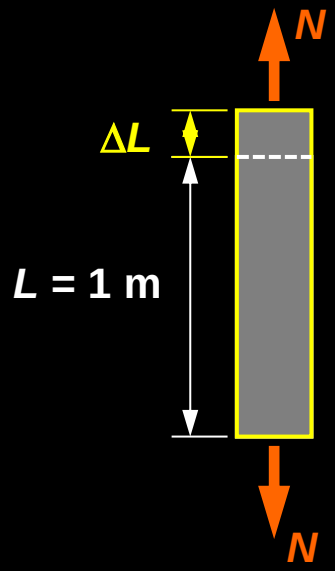
CO₂eq-Werte streuen stark
 → großer Einfluss auf Verhalten
 → Aussagekraft von Vergleichen?

Leistungsbezogener Materialvergleich



Stahl- und Spannbeton:
 Widerstand, Steifigkeit, Duktilität > BSH
 → Beton auch ökologisch konkurrenzfähig

... sofern kein Material verschwendet wird!



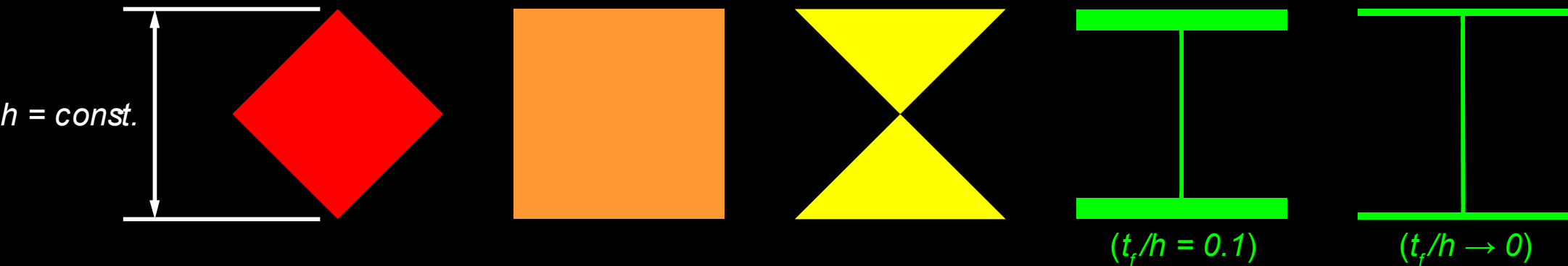
Effizienz Querschnitt

$$\frac{E}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{\text{floor}}} \pm E_{\text{ind}} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}$$

$$\frac{M}{A_{\text{floor}}} = \frac{\rho}{\{f_{d,\text{mat}}, E_{\text{mat}}\}} \cdot \frac{t_m}{\{W, I\}} \cdot \left\{ \alpha_m \cdot l^2, \frac{\alpha_w \cdot l^4}{w_{\text{adm}}} \right\} \cdot (\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k)$$

Effizienz
Querschnitt

Effizienz Querschnitt: Vergleich von Querschnitten mit identischer Masse



(*) $\frac{\text{Steifigkeit}}{\text{Masse}}$

1

$\frac{\text{Biege-widerstand}}{\text{Masse}}$ (**)

1

(*) normiert mit ■ ; (**) plastischer Widerstand, normiert mit ■ (Material linear elastisch-ideal plastisch)

Effizienz Tragsystem

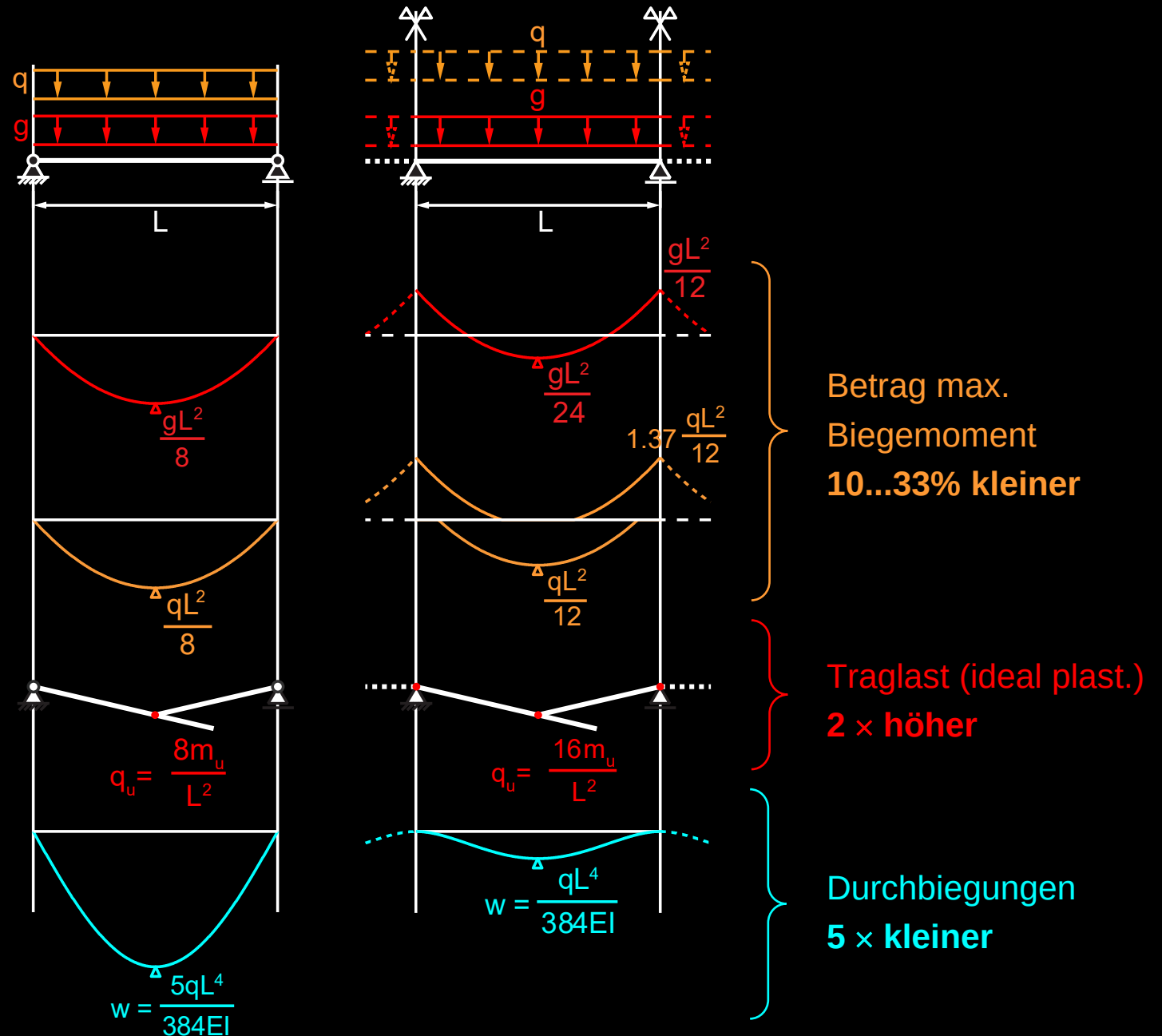
$$\frac{E}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{\text{floor}}} \pm E_{\text{ind}} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}$$

$$\frac{M}{A_{\text{floor}}} = \frac{\rho}{\{f_{d,\text{mat}}, E_{\text{mat}}\}} \cdot \frac{t_m}{\{W, I\}} \cdot \left\{ \alpha_m \cdot l^2, \frac{\alpha_w \cdot l^4}{w_{\text{adm}}} \right\} \cdot (\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k)$$

Effizienz
Tragsystem

Effizienz Tragsystem

Einfeldträger vs. Durchlaufträger
(gleiche Spannweite und Belastung)



Effizienz Querschnitt und Tragsystem kombiniert

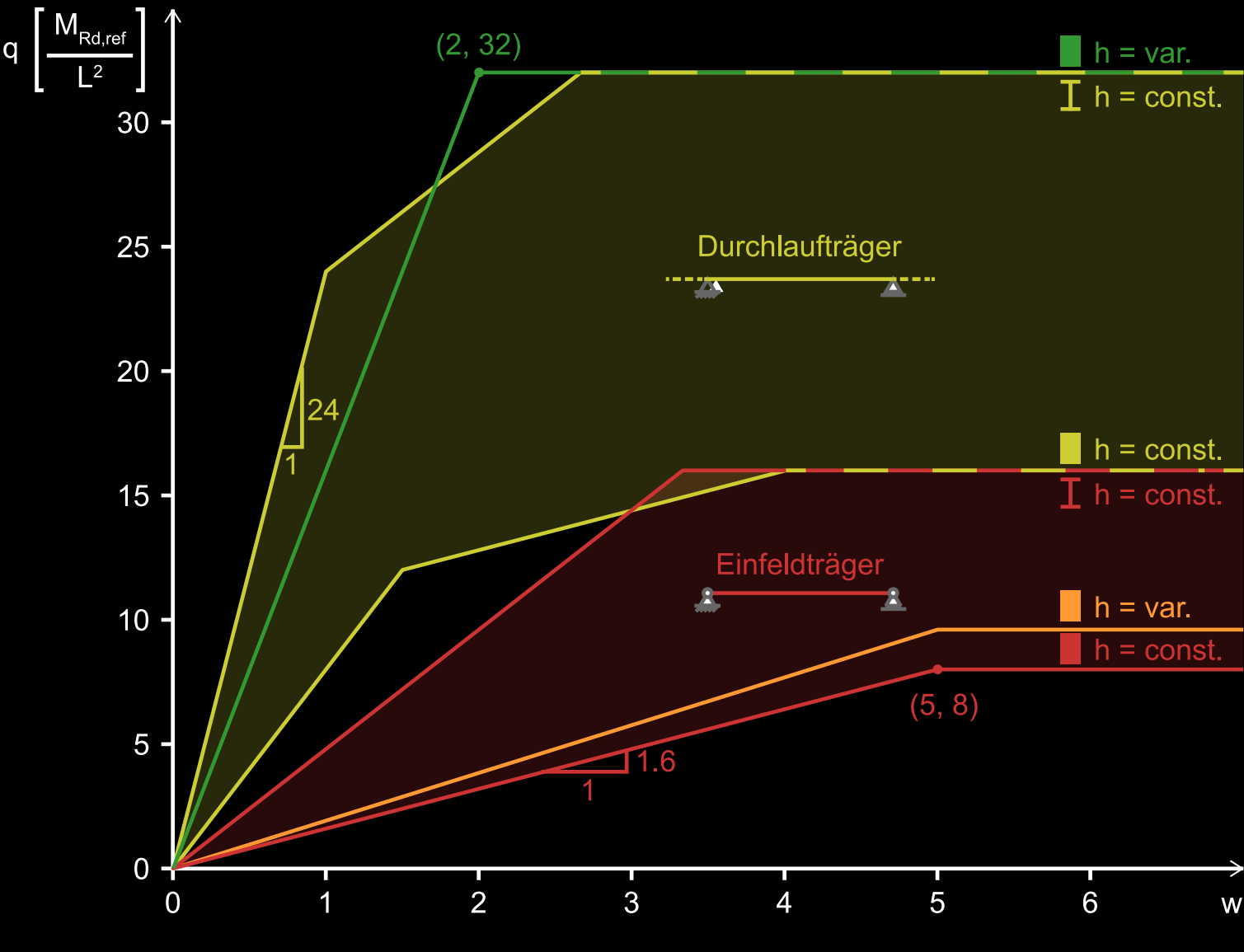
$$\frac{E}{U \cdot T_{service}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$$

$$\frac{M}{A_{floor}} = \frac{\rho}{\{f_{d,mat}, E_{mat}\}} \cdot \frac{t_m}{\{W, I\}} \cdot \left\{ \alpha_m \cdot l^2, \frac{\alpha_w \cdot l^4}{w_{adm}} \right\} \cdot (\gamma_q \cdot q_k + \gamma_g \cdot g_k)$$

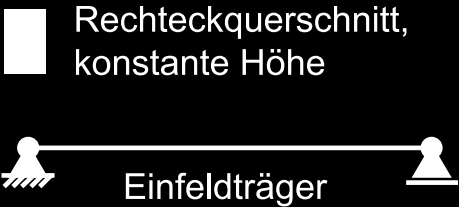
Effizienz
Querschnitt

Effizienz
Tragsystem

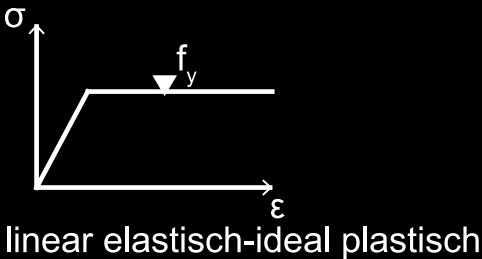
Effizienz Querschnitt und Tragsystem kombiniert



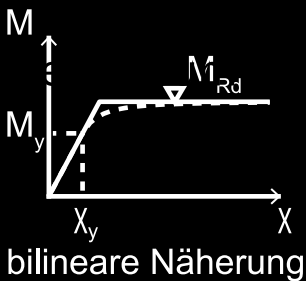
Referenz:



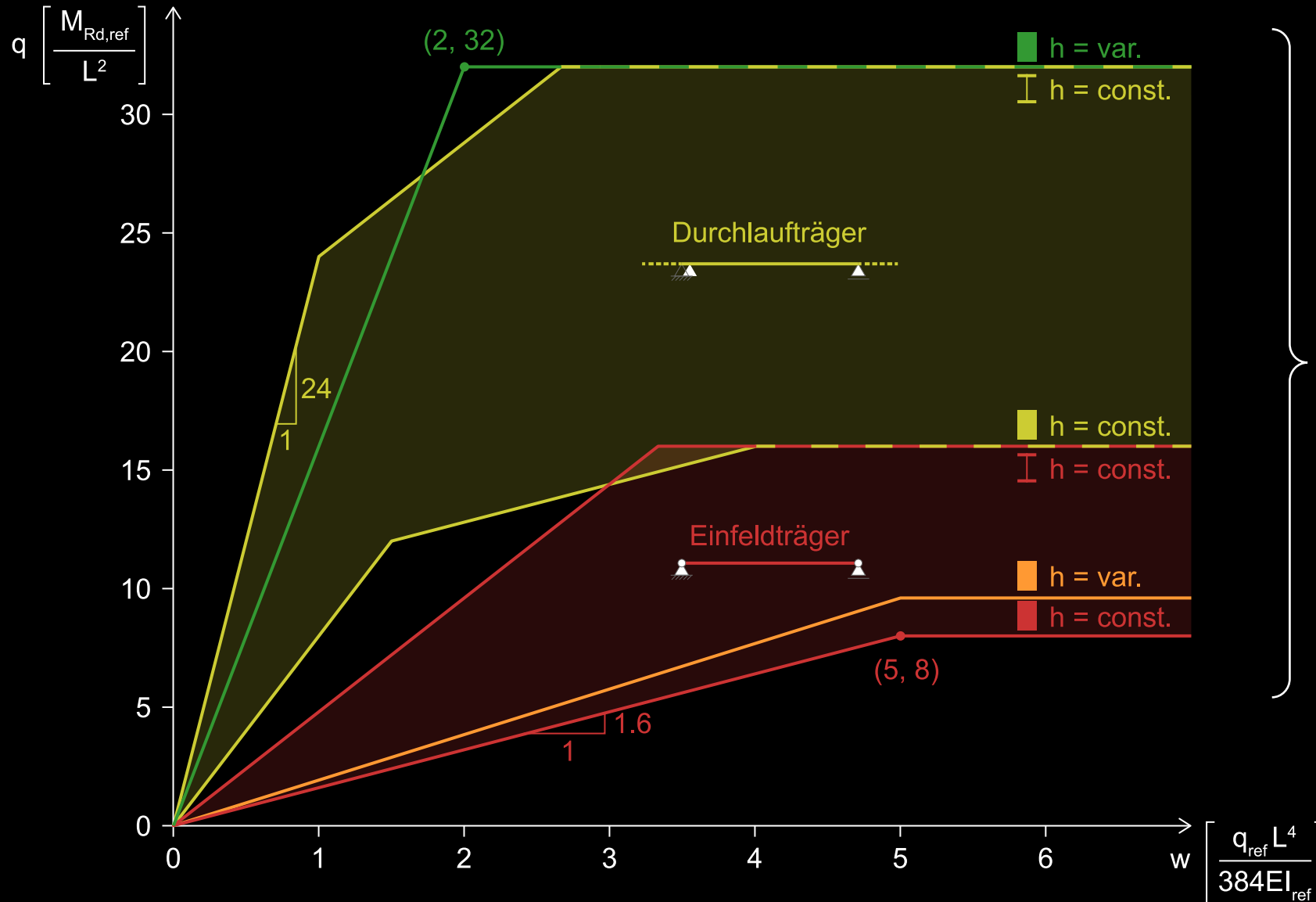
Material:



Momenten-Krümmungs-Beziehung:



Effizienz Querschnitt und Tragsystem kombiniert



Unterschiede:

Widerstand bis **Faktor 4**

Steifigkeit bis **Faktor 15**

bei gleicher Masse

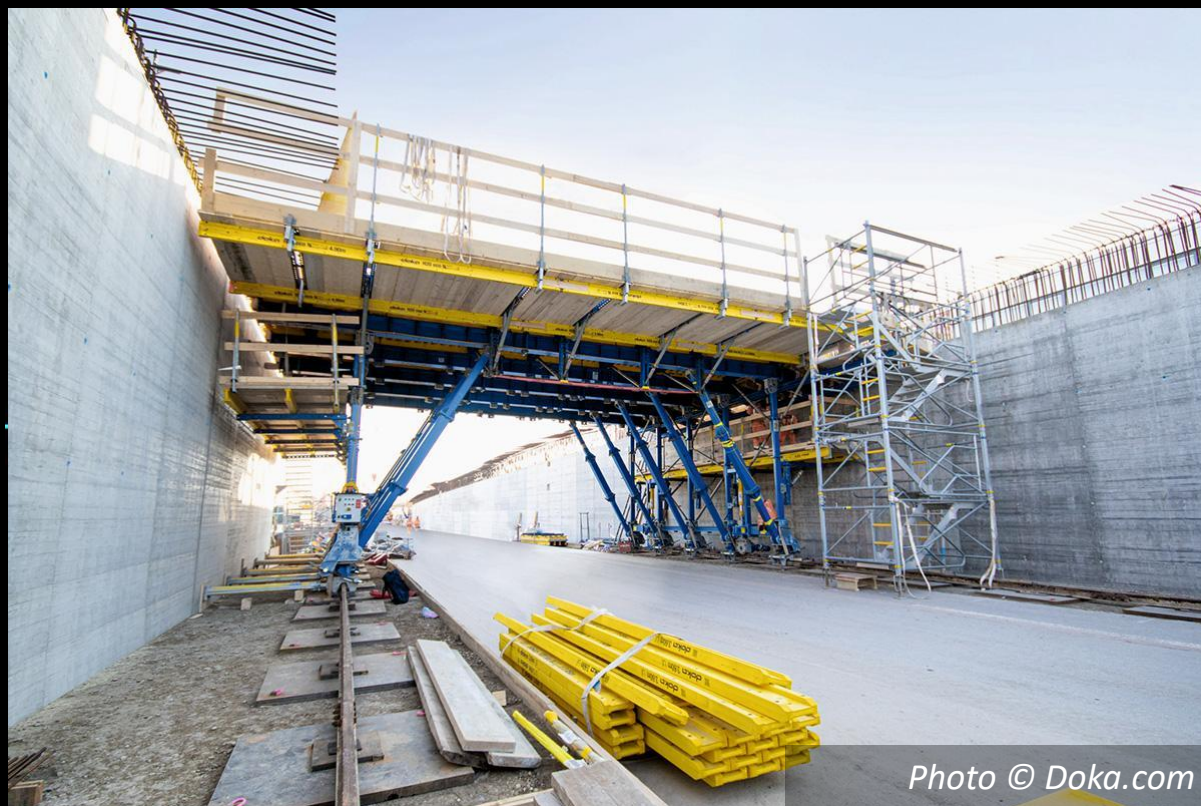
Bei Betontragwerken noch
ausgeprägter, insbesondere
bei **Vorspannung**

Beispiel: Einhausung Schwamendingen (Zürich Nord)

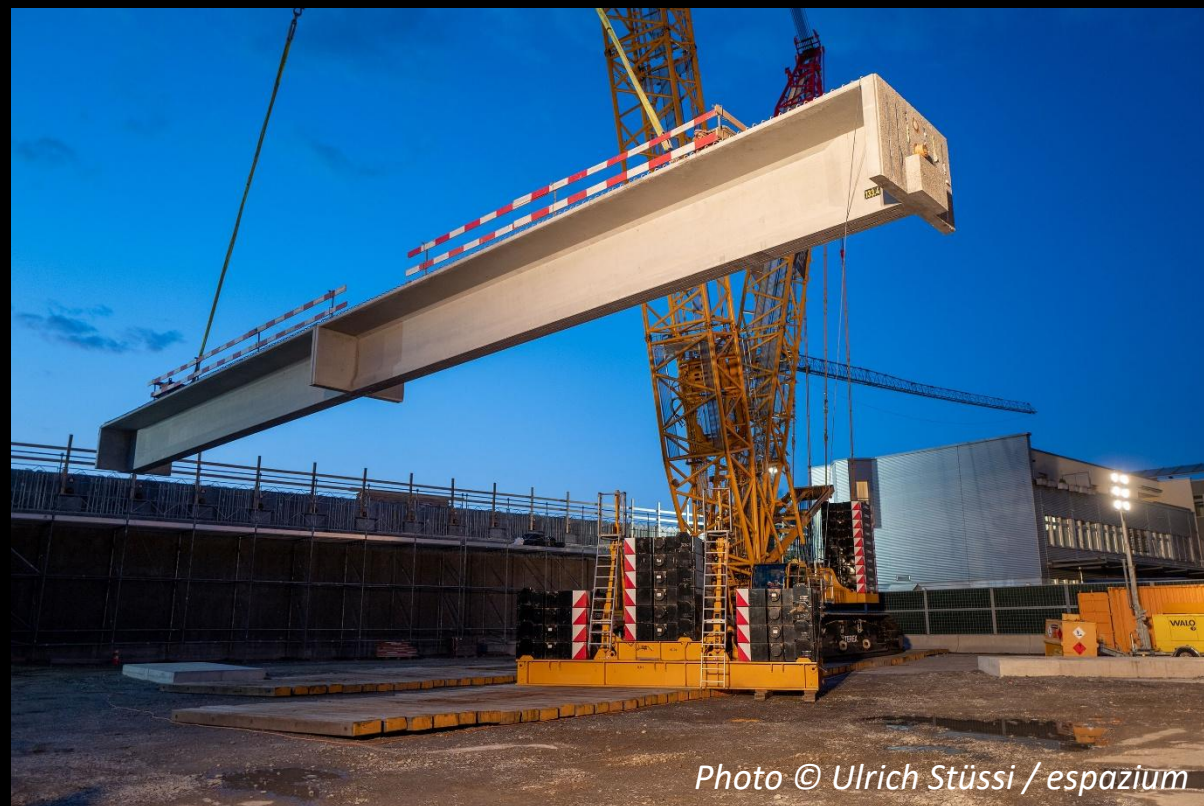


Beispiel: Einhausung Schwamendingen (Zürich Nord)

Abschnitte Saatlen und Aubrugg (ca. 490 m)
Spannweiten 2x14.5 m
Massive Ortbetondecke $t_m = 0.70$ m



Abschnitte Schörli und Waldgarten (ca. 580 m)
Spannweite 29.0 m
Vorgespannte Fertigteilträger $t_m = 0.29 + 0.15$ m Ortbeton

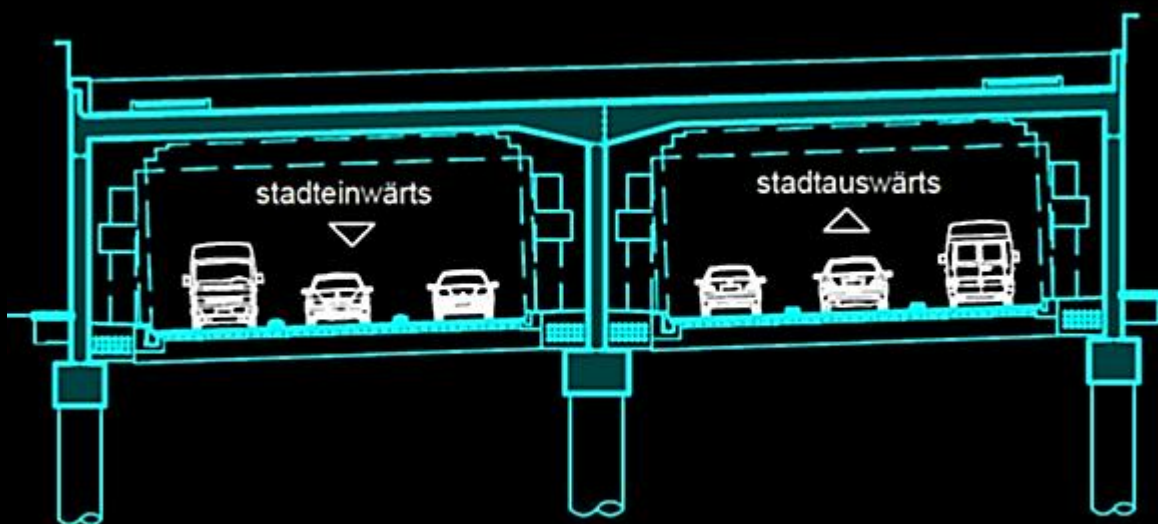


Beispiel: Einhausung Schwamendingen (Zürich Nord)

Abschnitte Saatlen und Aubrugg (ca. 490 m)

Spannweiten 2x14.5 m

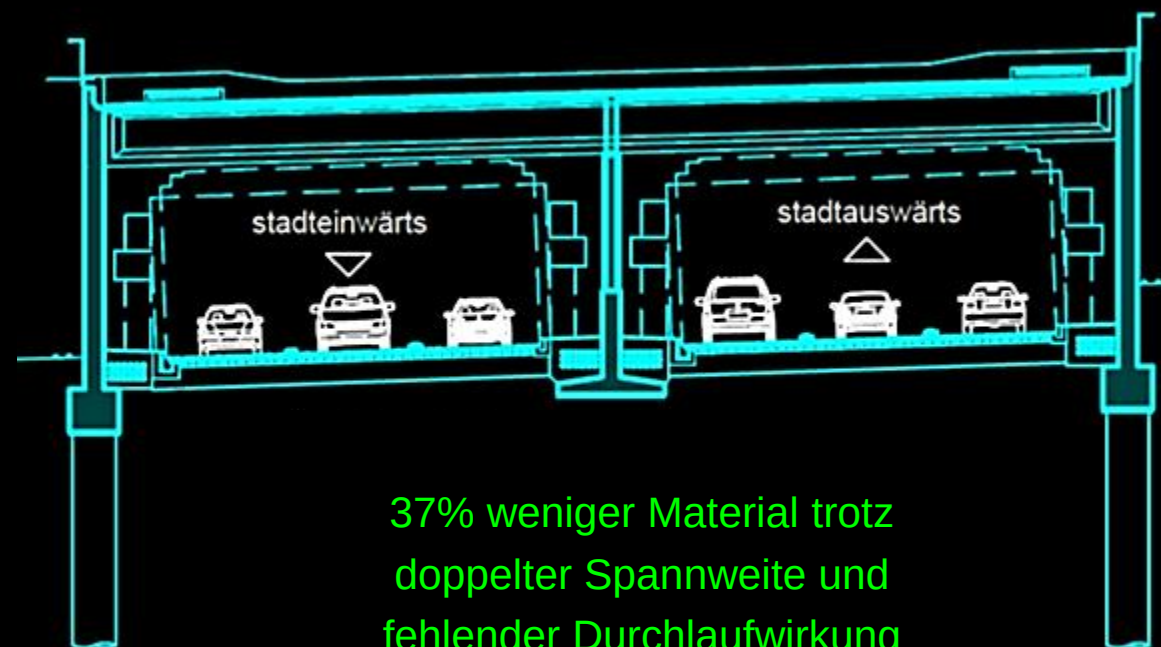
Massive Ortbetondecke $t_m = 0.70$ m



Abschnitte Schörli und Waldgarten (ca. 580 m)

Spannweite 29.0 m

Vorgespannte Fertigteilträger $t_m = 0.29 + 0.15$ m Ortbeton



Indirekte Einflüsse

$$\frac{E}{U \cdot T_{service}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm \overset{\text{Indirekte Einflüsse}}{E_{ind}} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$$

Indirekte Einflüsse – Schalldämmung

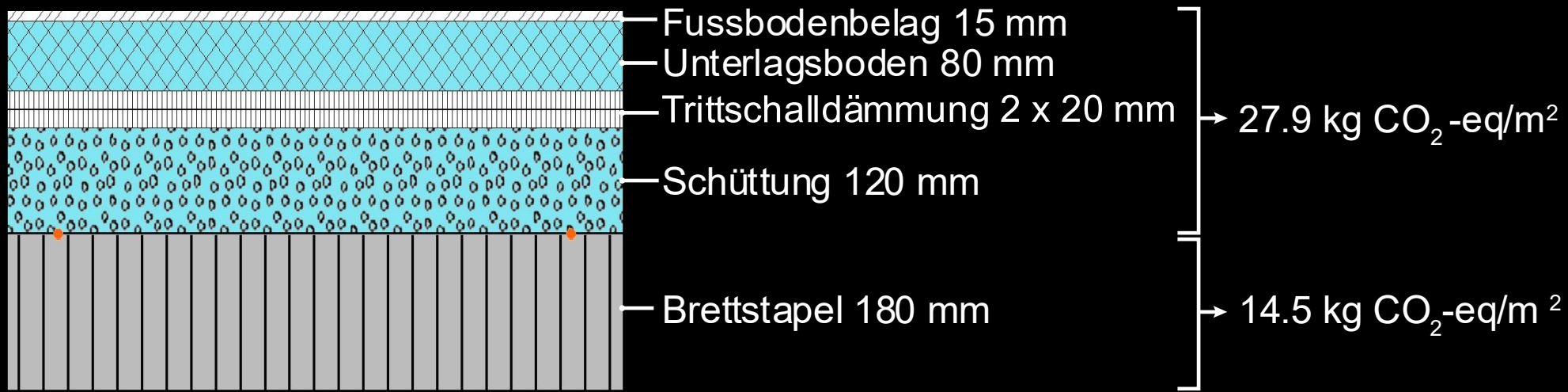
Emissionsarmes Deckensystem
für kleine Spannweiten



Brettstapel 180 mm

→ 14.5 kg CO₂-eq/m²

Indirekte Einflüsse – Schalldämmung



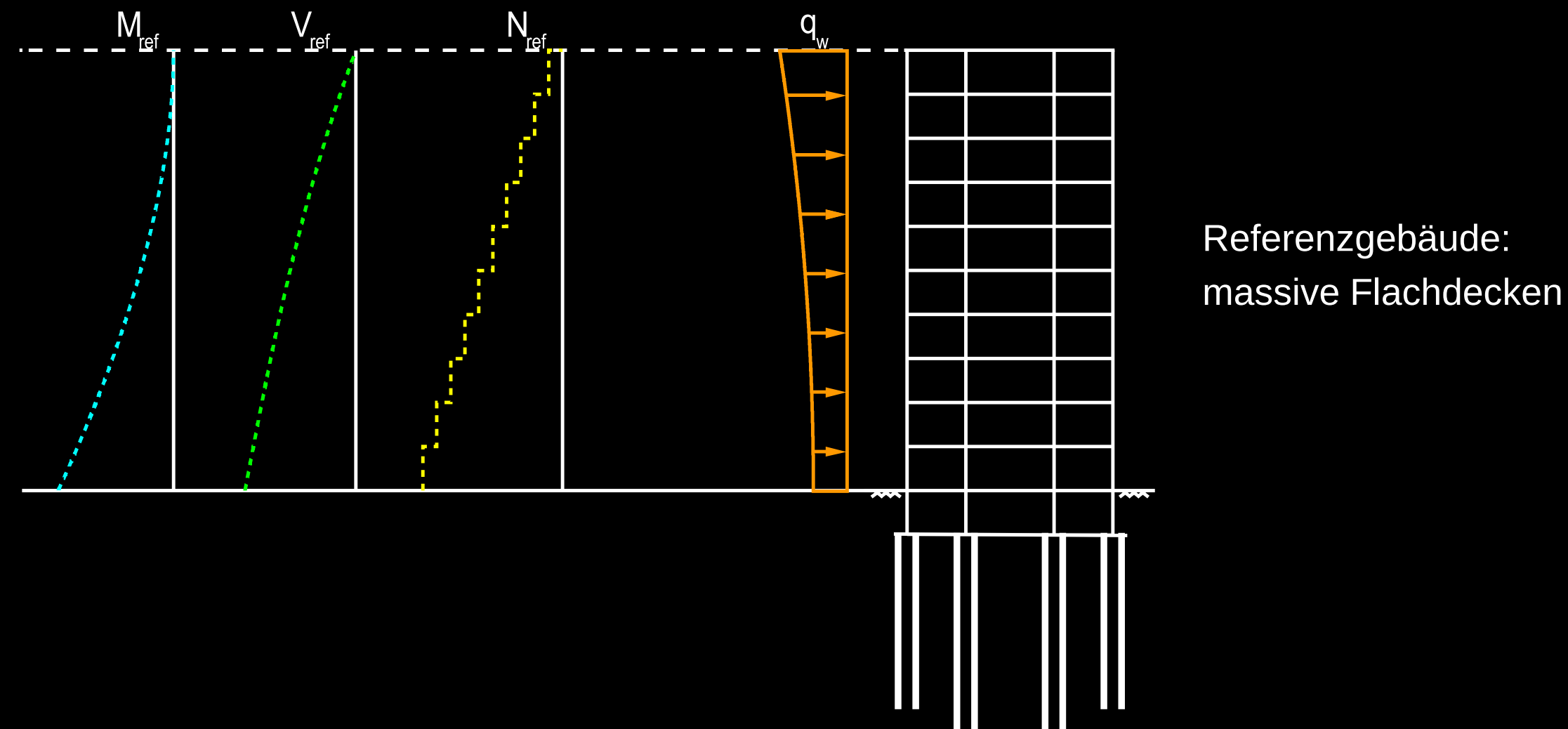
Trittschalldämmung (SIA-Norm):

→ Bauhöhe x 2

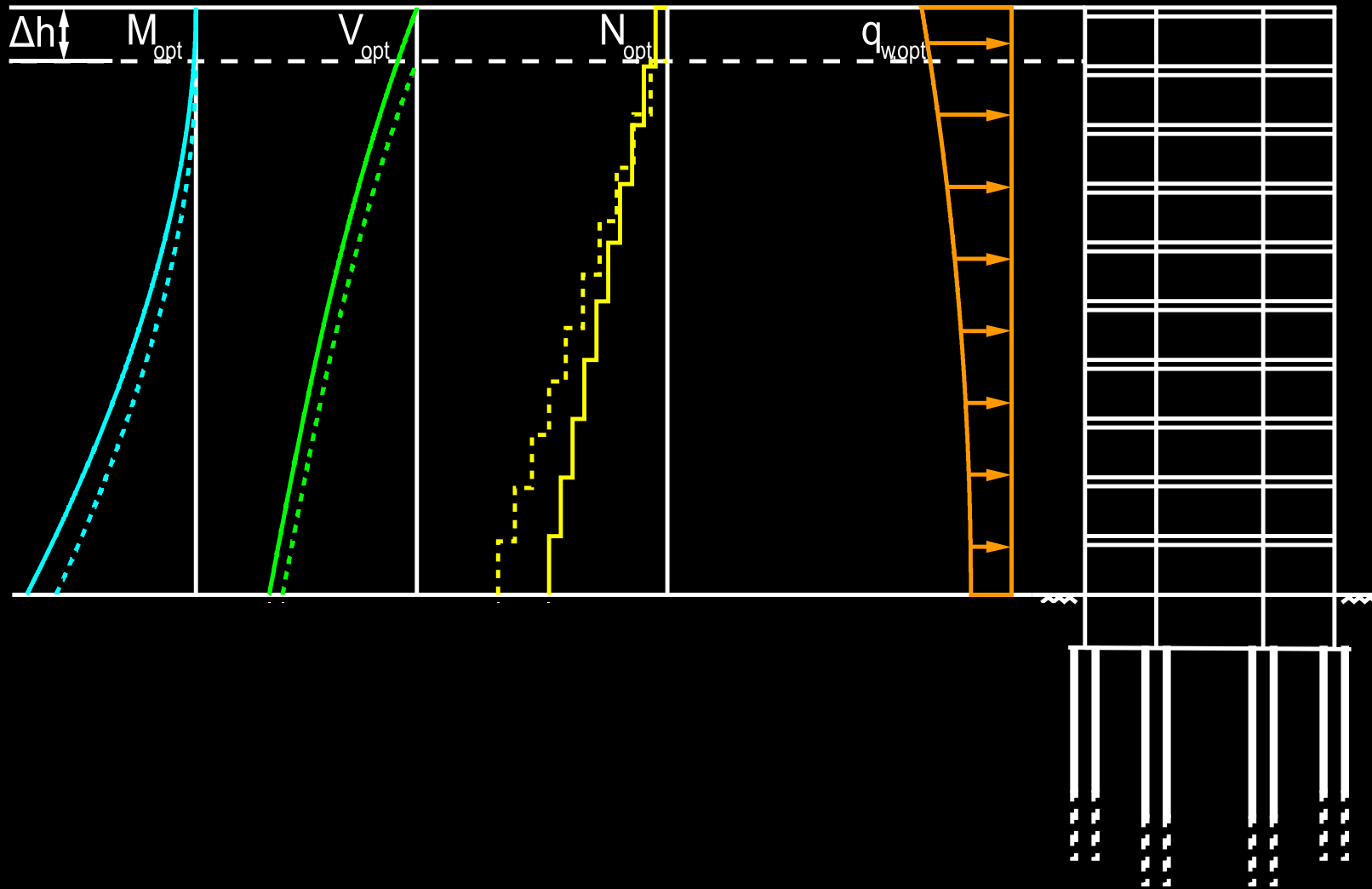
→ Emissionen x 3

(Komfortniveau hinterfragen?)

Indirekte Einflüsse – Leichte Geschossdecken mit grösserer Bauhöhe

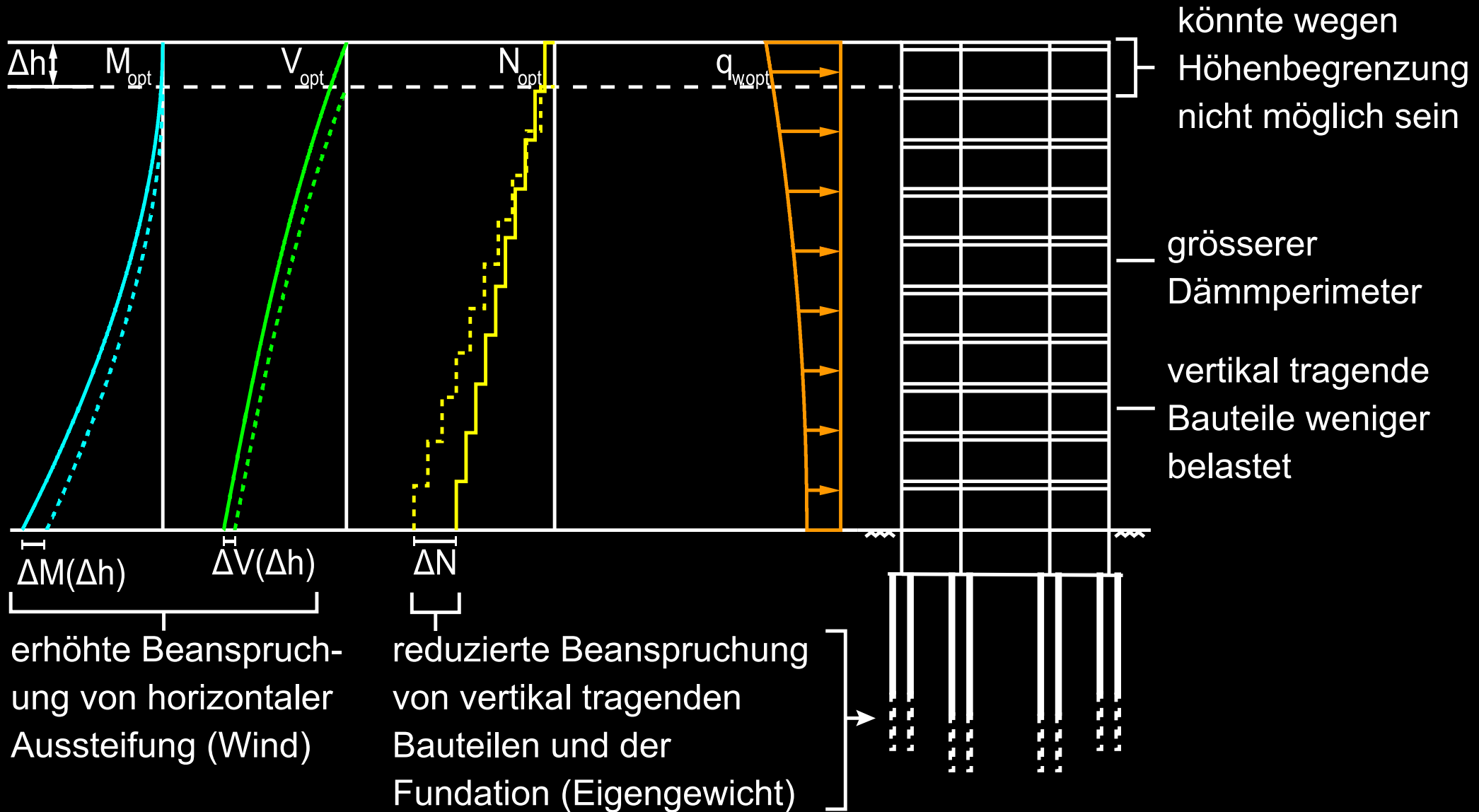


Indirekte Einflüsse – Leichte Geschossdecken mit grösserer Bauhöhe

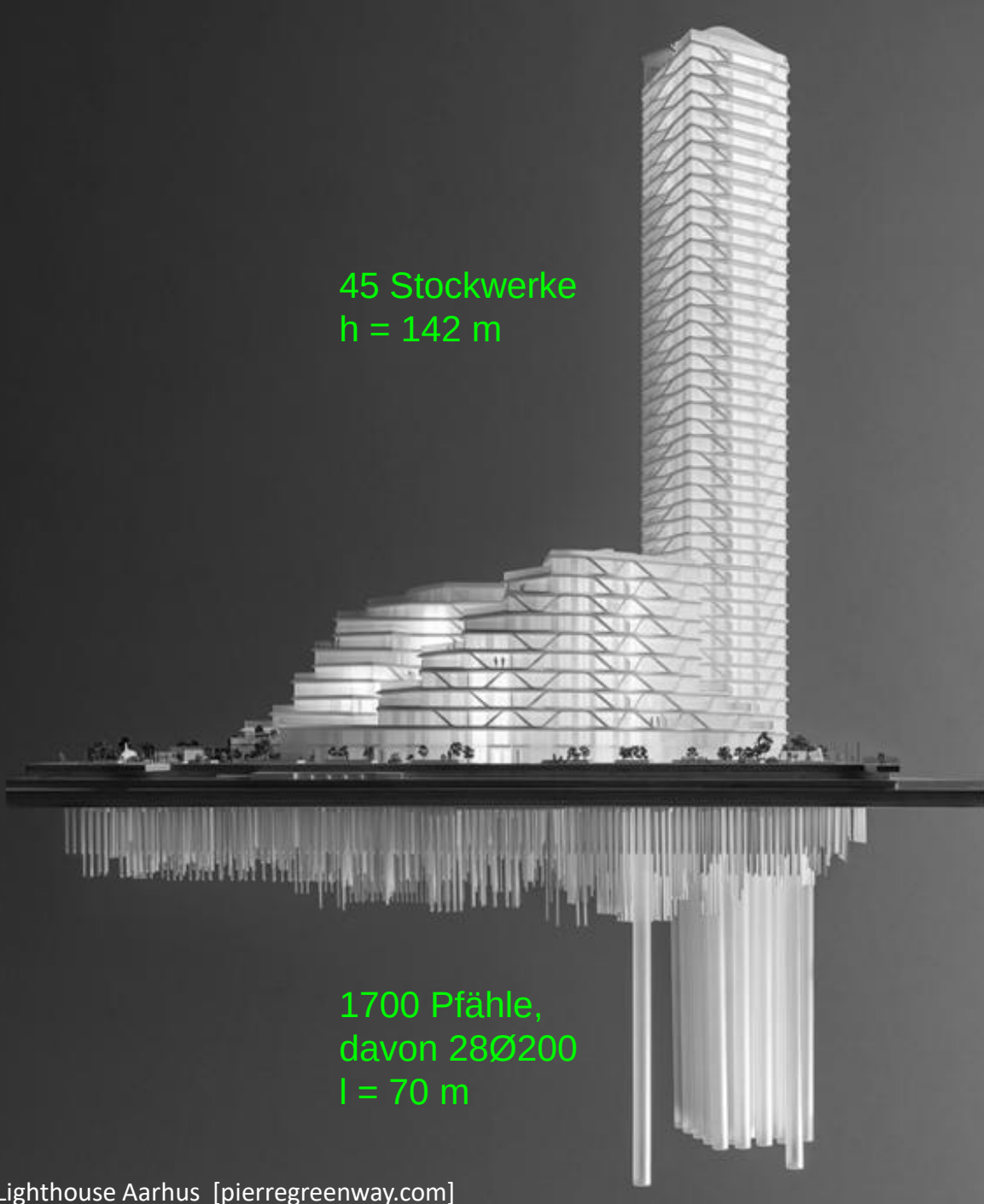


Alternatives Gebäude:
CO₂-optimierte Decken
→ leichter, aber höher

Indirekte Einflüsse – Leichte Geschossdecken mit grösserer Bauhöhe







45 Stockwerke
 $h = 142\text{ m}$

1700 Pfähle,
davon 28Ø200
 $l = 70\text{ m}$



Schlechter Baugrund: Gewichtssparnis
= dominanter indirekter Einfluss

Nachhaltigkeit durch effiziente Tragwerke

Wieso sind so viele Betontragwerke aus den letzten Jahrzehnten (material-)ineffizient?

Tragwerkseffizienz vs. Kosten

		Spezifische Emissionen	Tragwerks- effizienz	Indirekte Einflüsse	Komfort- anspruch
$\frac{E}{U \cdot T_{service}}$	=	$\frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$			
Emissionen pro Nutzung und Zeit		Nutzungsdauer			

Tragwerkseffizienz vs. Kosten

		Spezifische Emissionen	Tragwerks- effizienz	Indirekte Einflüsse	Komfort- anspruch
$\frac{E}{U \cdot T_{service}}$	=	$\frac{\left(\frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg}} \cdot \frac{M}{A_{floor}} \pm E_{ind} \right) \cdot \frac{A_{floor}}{U}}{T_{service}}$			
Emissionen pro Nutzung und Zeit		Nutzungsdauer			

Tragwerkseffizienz vs. Kosten

$$\begin{array}{c}
 \frac{\text{€}}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{M}{A_{\text{floor}}} \pm E_{\text{ind}} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}
 \end{array}$$

Spezifische Kosten Tragwerkseffizienz Indirekte Einflüsse Komfortanspruch

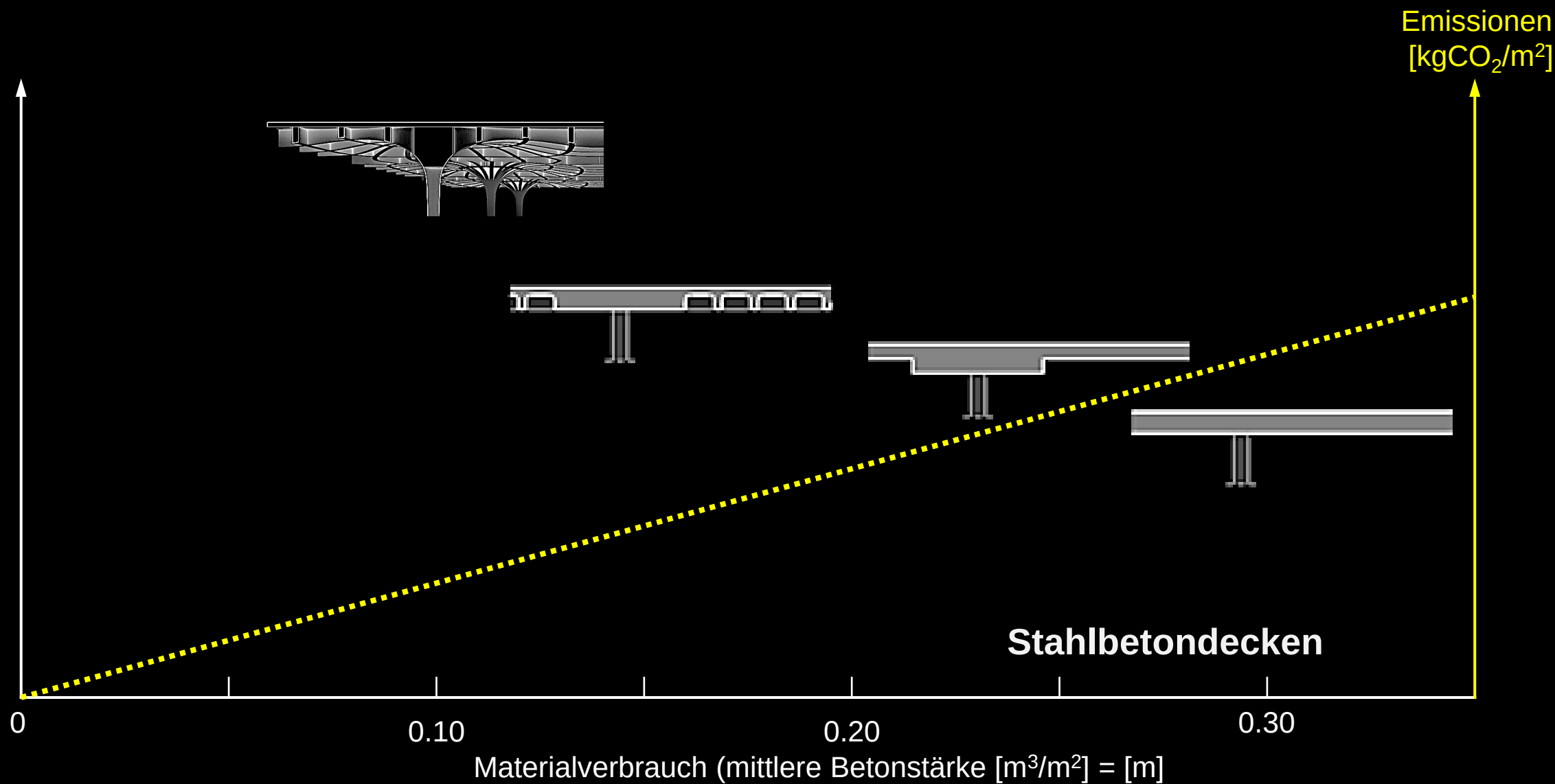
Kosten pro Nutzung und Zeit Nutzungsdauer

Baustoffe (zu billig)

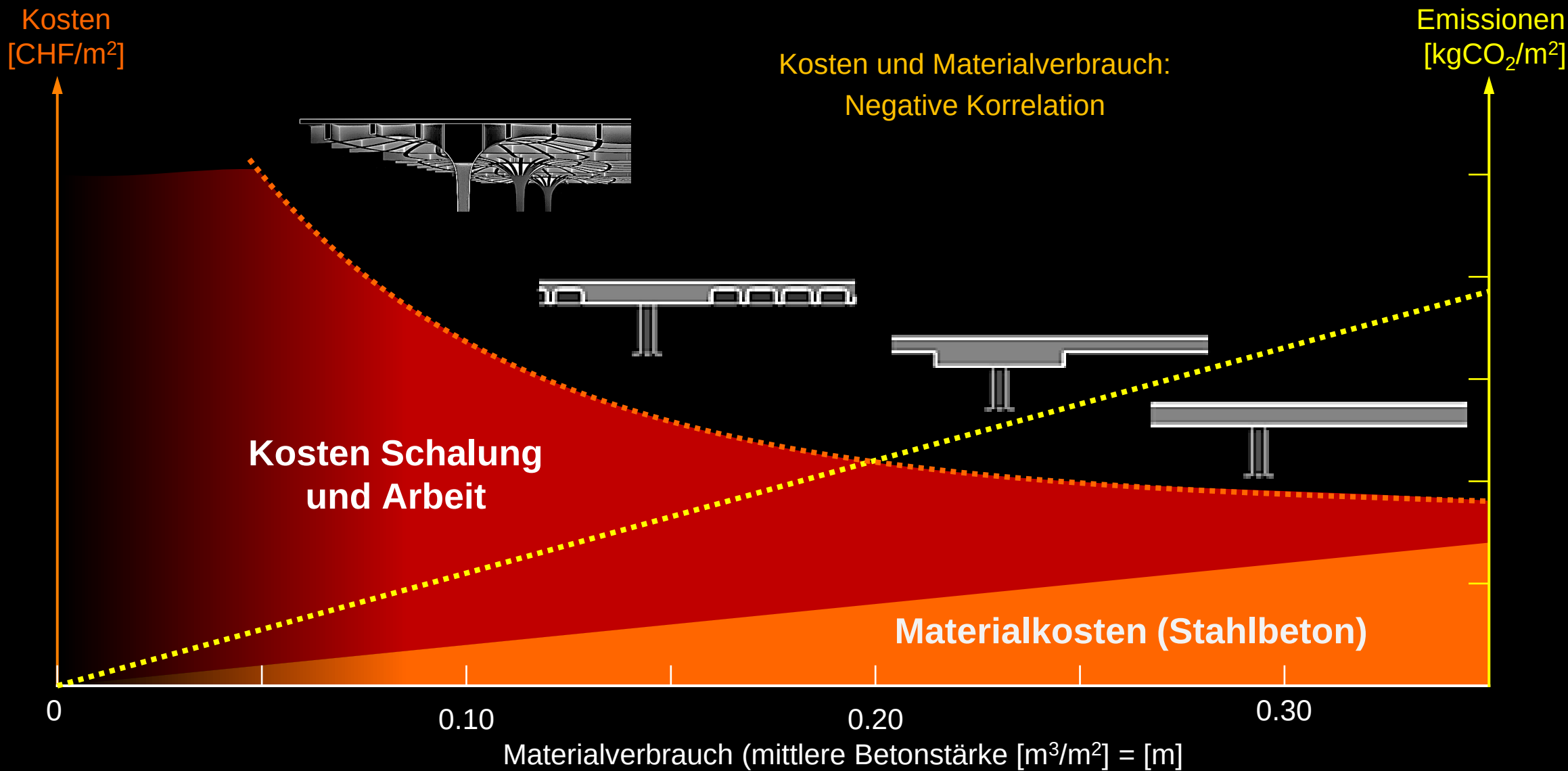
Tragwerkseffizienz vs. Kosten

	Spezifische Materialkosten	Tragwerks- effizienz	Spezifische Arbeitskosten	Indirekte Einflüsse	Komfort- anspruch
$\frac{\text{€}}{U \cdot T_{\text{service}}}$	$= \frac{\left(\frac{\text{€}}{\text{kg}} \cdot \frac{M}{A_{\text{floor}}} + \frac{\text{€}_{\text{labour}}}{A_{\text{floor}}} \pm E_{\text{ind}} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}$				
Kosten pro Nutzung und Zeit	Nutzungsdauer				
	Baustoffe (zu billig)		Arbeitskosten (sehr hoch)		

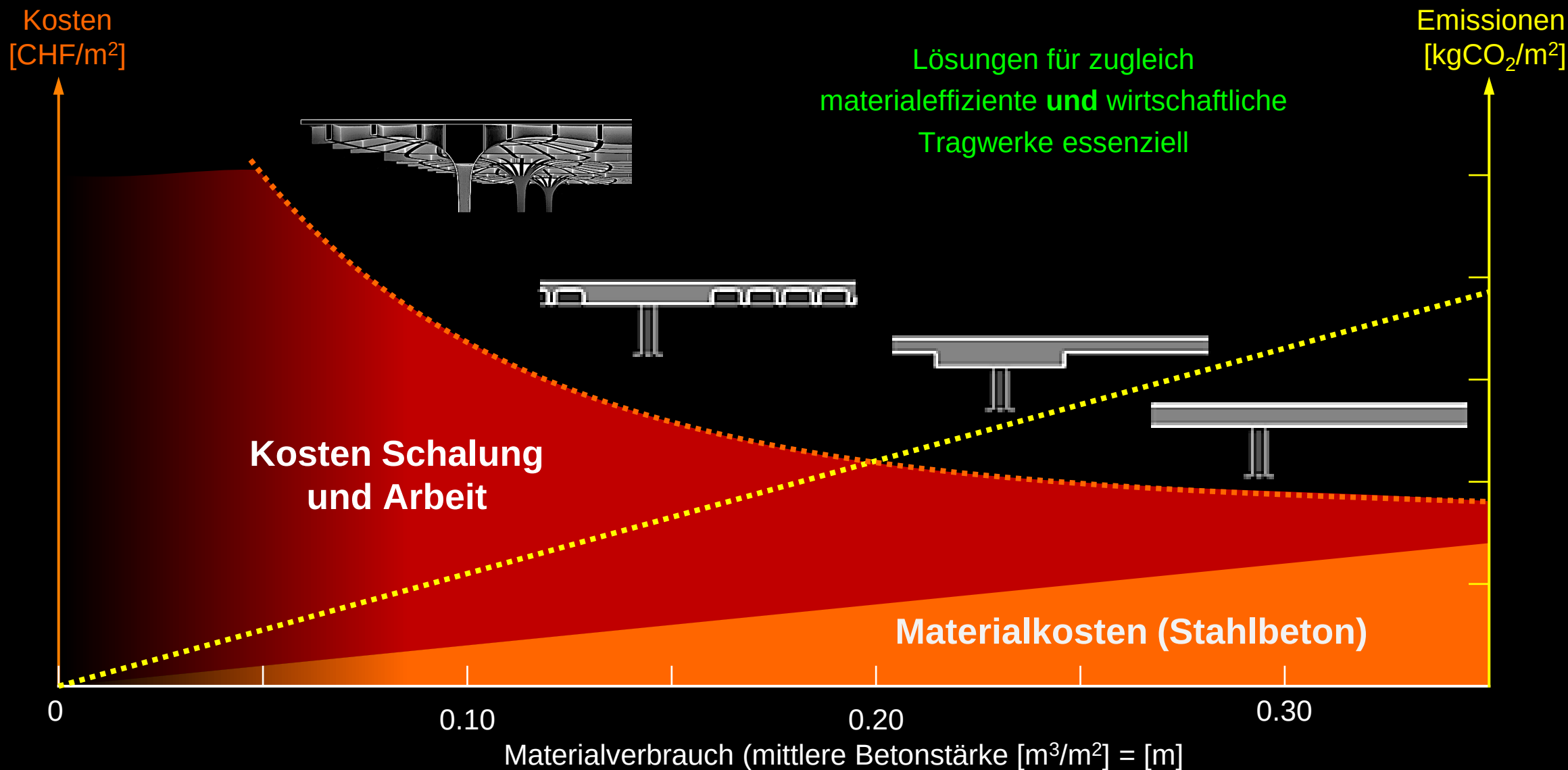
Tragwerkseffizienz vs. Kosten



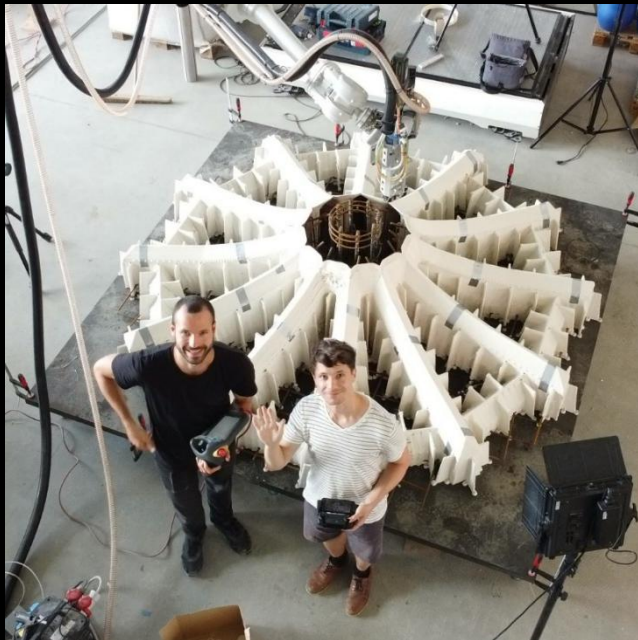
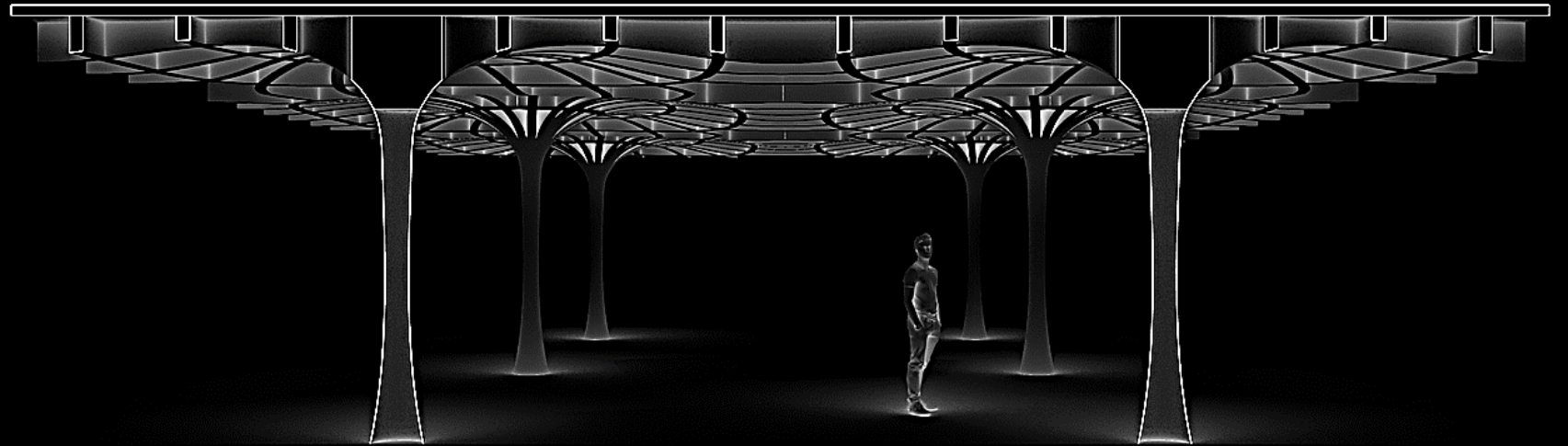
Tragwerkseffizienz vs. Kosten



Tragwerkseffizienz vs. Kosten



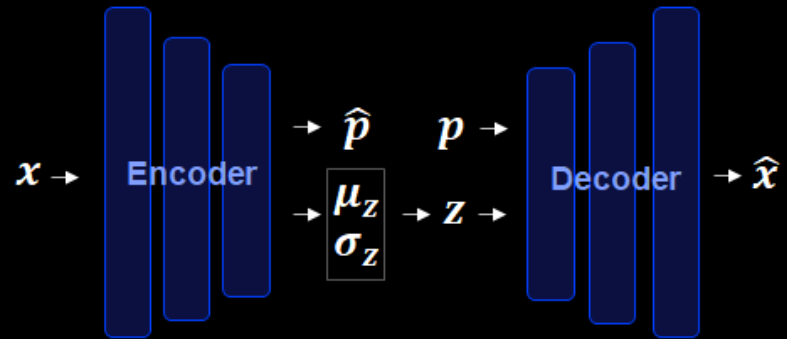
Rippendecke mit 3D- gedruckter Schalung



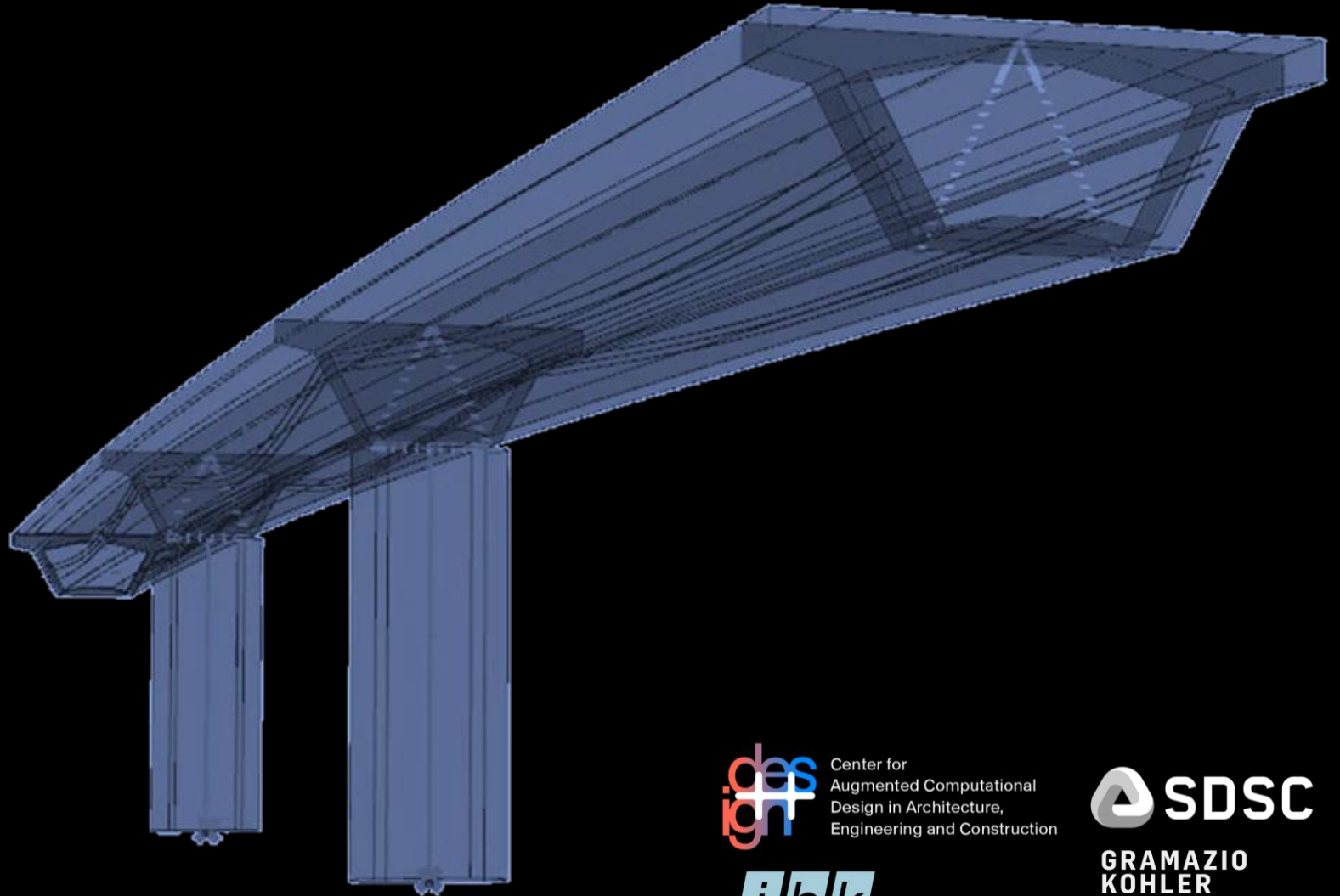
KI-gestützter Tragwerksentwurf und Bemessung

Forward Model
(Surrogate Model)

Inverse Model
(Generative Model)



Conditional Variational Autoencoder



AIXD Toolkit installation
instruction and user
guide:

<https://aixd.ethz.ch/>



Center for
Augmented Computational
Design in Architecture,
Engineering and Construction



Institut für Baustatik und Konstruktion



GRAMAZIO
KOHLER
RESEARCH
E EA



ein neues Chicago
alle zwei Wochen

Betonbau

Teil der Lösung

$$\frac{E}{U \cdot T_{\text{service}}} = \frac{\left(\text{CO}_2\text{-eq} \cdot \frac{M}{A_{\text{floor}}} \pm E_{\text{ind}} \right) \cdot \frac{A_{\text{floor}}}{U}}{T_{\text{service}}}$$

Spezifische Emissionen Tragwerks-effizienz Indirekte Einflüsse Komfort-anspruch

Emissionen pro Nutzung und Zeit Nutzungsdauer

CO₂-eq einer von vielen Faktoren

Tragwerkseffizienz entscheidend

Nutzungsdauer ebenso wichtig

Ganzheitliche Betrachtung nötig



Beitrag von Bauingenieuren

Materialeffiziente Neubauten planen

Minimierung Emissionen
/ Ressourcenverbrauch

Tragreserven im Bestand ausschöpfen

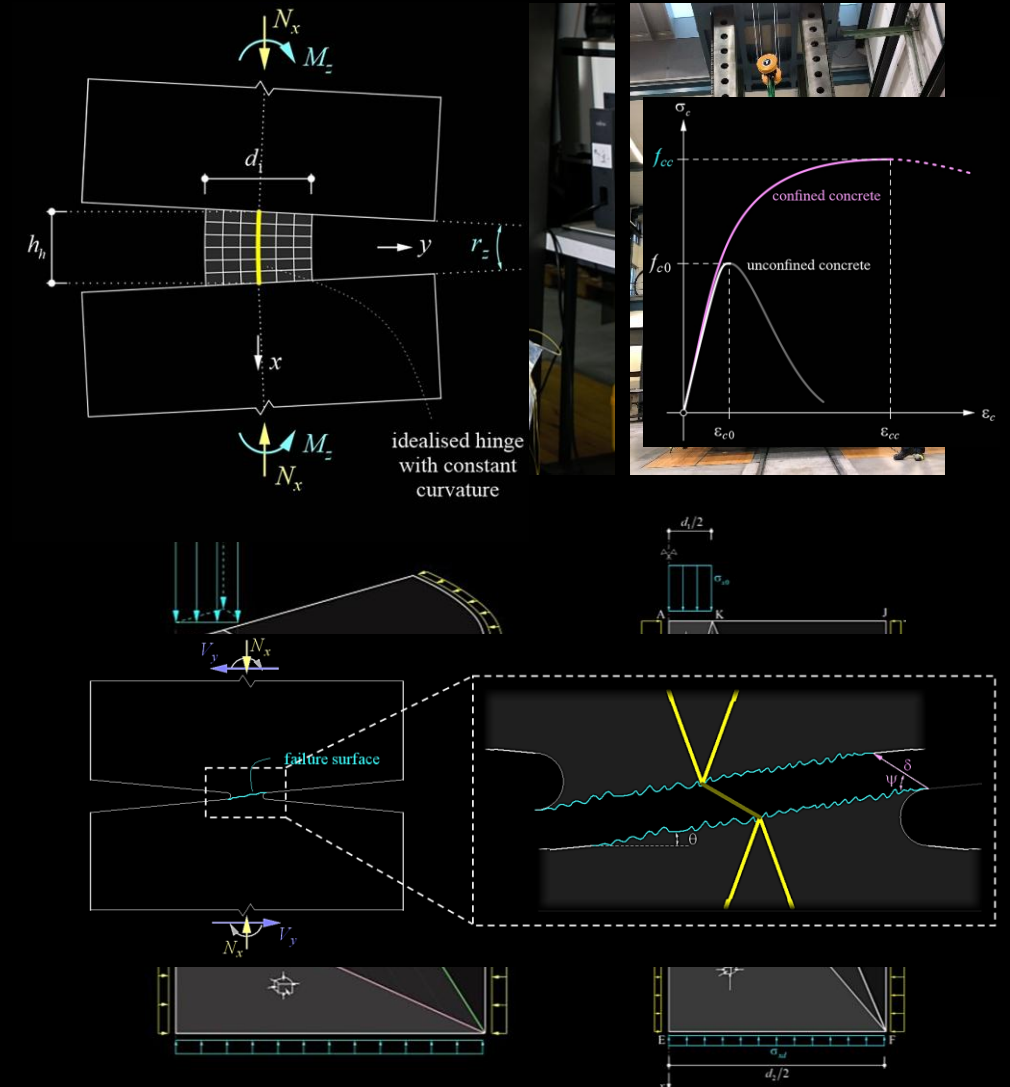
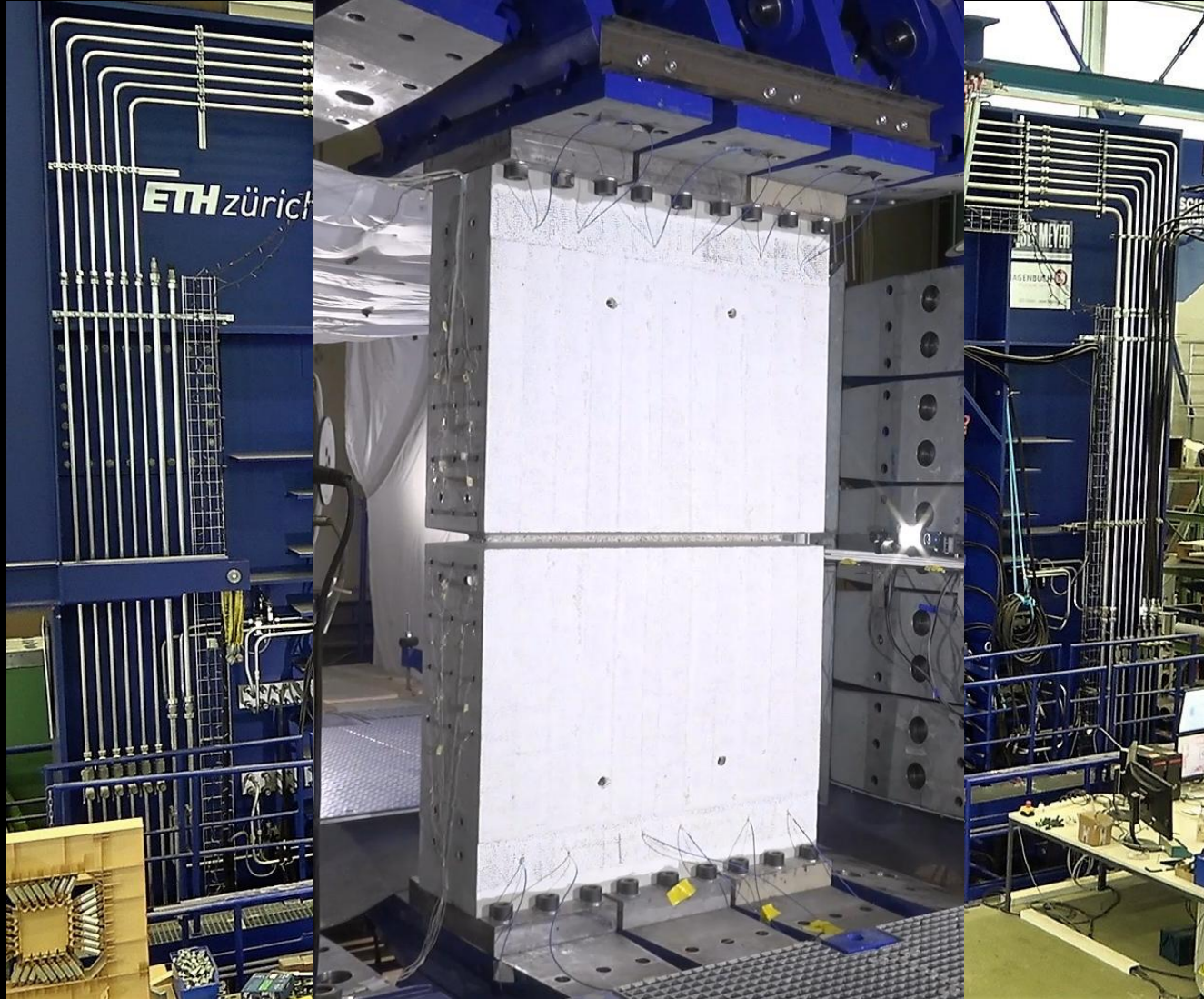
Maximierung der Lebensdauer

Besseres Verständnis des Tragverhaltens

als Grundlage für obige Punkte

Beitrag von Forschung und Lehre

Betongelenke (und Teilflächenpressung)





**Vielen Dank für die
Aufmerksamkeit**

kaufmann.ibk.ethz.ch



concrete.ethz.ch



LinkedIn: kfmResearch