

8 Nachhaltige* Betonbauten

8.1 Bedeutung des Bauwesens

*Fokus: Treibhausgasemissionen & Ressourcenverbrauch

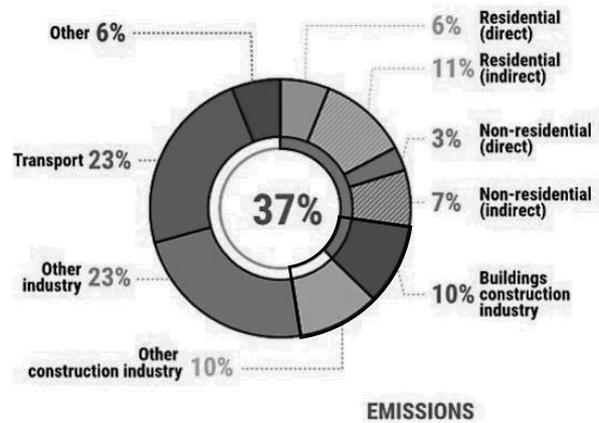
Bedeutung des Bauwesens

Die Bauindustrie ist je nach Quelle für ca. 20 % der globalen Treibhausgasemissionen direkt verantwortlich. Dies ist mit den durch Mobilität verursachten Treibhausgasemissionen vergleichbar.

Auch bezüglich Ressourcenverbrauch, Energieverbrauch und Abfallproduktion spielt das Bauwesen eine gewichtige Rolle.

Erschwerend kommt hinzu, dass davon ausgegangen wird, dass sich die benötigte Nutzfläche bis 2060 aufgrund des steigenden Lebensstandards (vor allem in Afrika und Asien) verdoppeln wird.

Das Bauwesen muss also bei steigendem Bedarf an Nutzfläche und Infrastruktur Treibhausgasemissionen und Ressourcenverbrauch signifikant reduzieren.



Quelle: UN environment programme, Global Alliance for Buildings and Construction - 2021 Global Status Report for Buildings and Construction

Bedeutung des Bauwesens

Die immense Bedeutung des Bauwesens (und damit einhergehend die Verantwortung, die man als Tragwerksplanende:r trägt), kann mit folgender Statistik verdeutlicht werden, welche den möglichen Einfluss von Tragwerksplanenden zeigt:



Quelle: The Institution of Structural Engineers – How to calculate embodied carbon

8 Nachhaltige Betonbauten

8.2 Bedeutung von Stahlbeton

Bedeutung von Stahlbeton

Beton ist (nach Wasser) das weltweit meistverwendete Material:

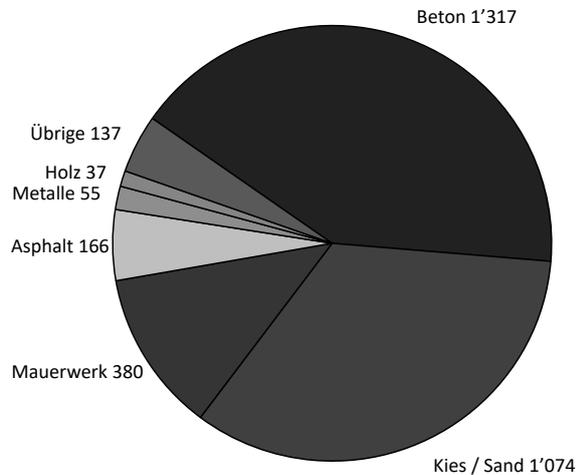
- Weltweiter Betonverbrauch 2009 ca. $15 \cdot 10^9 \text{ m}^3$
- CH Betonverbrauch 2018 ca. $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 - pro Kopf Betonverbrauch ca. $2 \dots 3 \text{ m}^3/\text{a}$
($7.7 \cdot 10^9$ resp. $8.6 \cdot 10^6$ Bewohner)

Pro m^3 Beton werden ca. 100 kg Betonstahl verwendet:

- CH Bewehrungsverbrauch 2018 ca. $1.6 \cdot 10^6 \text{ t/a}$
 - pro Kopf Betonstahlverbrauch ca. 200 kg/a

Stahlbeton ist die mit Abstand am meisten verbreitete Bauweise für tragende Bauteile.

Bauwerksbestand Schweiz in Mio. t
(Stand 2015)



Die Betonbauweise ist die mit Abstand am weitesten verbreitete Bauweise, sowohl im Hoch- als auch im Brücken- und Ingenieurbau.

Auch Studierende, welche nicht die Vertiefungsrichtung Konstruktion wählen, benötigen daher mit hoher Wahrscheinlichkeit in ihrer zukünftigen Tätigkeit mindestens grundlegende Kenntnisse.

Quellenangabe Bauwerksbestand:

- P. Lunk, «Beton und Nachhaltigkeit in der Praxis» / Bundesamt für Statistik: Materialflussrechnung für die Schweiz.

Quellenangaben Betonverbrauch:

- <https://www.fskb.ch/beton/daten-und-fakten/> (15 Mio. Kubikmeter Transportbeton pro Jahr, geschätzter Anteil Transportbeton ca. 75%)
- World Business Council for Sustainable Development, The Cement Sustainability Initiative (Zementverbrauch, Betonverbrauch hochgerechnet)

Bedeutung von Stahlbeton

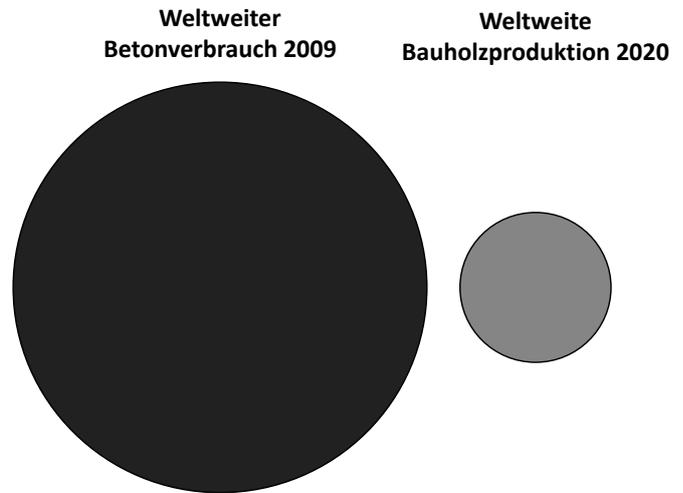
Beton ist (nach Wasser) das weltweit meistverwendete Material:

- Weltweiter Betonverbrauch 2009 ca. $15 \cdot 10^9 \text{ m}^3$
- CH Betonverbrauch 2018 ca. $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 - pro Kopf Betonverbrauch ca. $2 \dots 3 \text{ m}^3/\text{a}$
($7.7 \cdot 10^9$ resp. $8.6 \cdot 10^6$ Bewohner)

Zum Vergleich

- Weltweite Bauholzproduktion 2020 ca. $2 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$

Durch die grosse Verbreitung von Beton ist es zumindest kurzfristig kaum möglich (und auch nicht sinnvoll), Beton komplett durch alternative Baustoffe zu ersetzen.



Die Betonbauweise ist die mit Abstand am weitesten verbreitete Bauweise, sowohl im Hoch- als auch im Brücken- und Ingenieurbau.

Auch Studierende, welche nicht die Vertiefungsrichtung Konstruktion wählen, benötigen daher mit hoher Wahrscheinlichkeit in ihrer zukünftigen Tätigkeit mindestens grundlegende Kenntnisse.

Quellenangaben Betonverbrauch:

- <https://www.fskb.ch/beton/daten-und-fakten/> (15 Mio. Kubikmeter Transportbeton pro Jahr, geschätzter Anteil Transportbeton ca. 75%)
- World Business Council for Sustainable Development, The Cement Sustainability Initiative (Zementverbrauch, Betonverbrauch hochgerechnet)

Quellenangabe Globale Bauholzproduktion:

- <https://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en/>

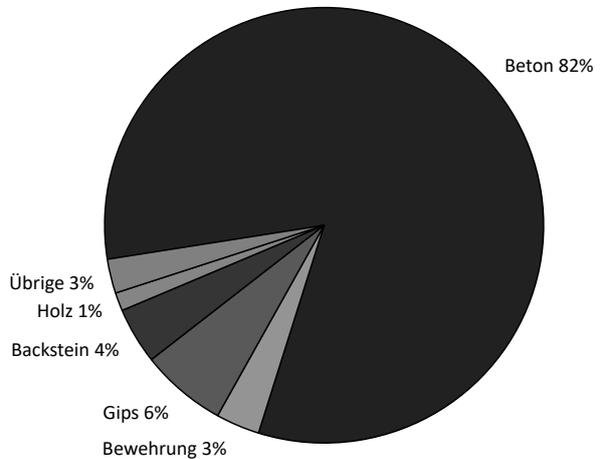
Bedeutung von Stahlbeton

Die Zementproduktion ist (je nach Quelle) für bis zu 8% der weltweiten Treibhausgasemissionen (primär CO₂) verantwortlich.

Für die hohen Treibhausgasemissionen der Betonbauweise ist primär ihre grosse Verbreitung verantwortlich.

Der Vergleich von Massen- und CO₂-Bilanz (Abbildungen auf dieser und nächster Folie) zeigt, dass die Emissionen von Stahlbeton pro Massen- oder Volumeneinheit effektiv kleiner sind als bei den meisten anderen Baustoffen.

Massenbilanz Typisches Gebäude
(Zürich, 2018)



Quellenangabe Abbildung (Daten): Armin Grieder, Michael Pöll: „Was muss der Beton der Zukunft können? Dauerhaftigkeit «trotz» Nachhaltigkeit,“ Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Holcim Betontagung 2018.

Quellenangabe Treibhausgasemissionen: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: Trends in global CO₂ emissions: 2016 Report

Bedeutung von Stahlbeton

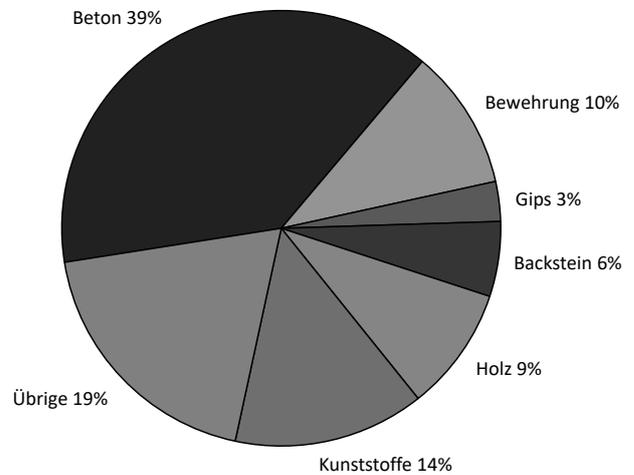
Die Zementproduktion ist (je nach Quelle) für bis zu 8% der weltweiten Treibhausgasemissionen (primär CO₂) verantwortlich.

Für die hohen Treibhausgasemissionen der Betonbauweise ist primär ihre grosse Verbreitung verantwortlich.

Der Vergleich von Massen- und CO₂-Bilanz (Abbildungen auf dieser und letzter Folie) zeigt, dass die Emissionen von Stahlbeton pro Massen- oder Volumeneinheit effektiv kleiner sind als bei den meisten anderen Baustoffen.

Erfolgsversprechender als alternative Bauweisen sind daher Lösungsansätze zur Reduktion der Emissionen der Stahlbetonbauweise.

CO₂-Bilanz Typisches Gebäude
(Zürich, 2018)



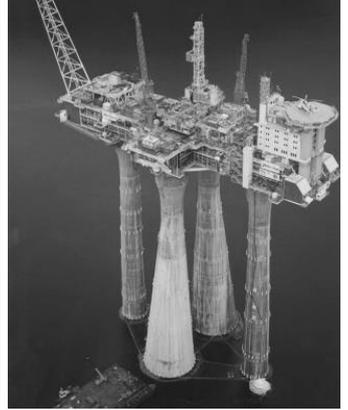
Quellenangabe Abbildung (Daten): Armin Grieder, Michael Pöll: „Was muss der Beton der Zukunft können? Dauerhaftigkeit «trotz» Nachhaltigkeit,“ Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Holcim Betontagung 2018.

Quellenangabe Treibhausgasemissionen: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency: Trends in global CO₂ emissions: 2016 Report

Bedeutung von Stahlbeton

Gründe für die grosse Verbreitung von Stahlbeton:

- Aufgrund seiner Vorteile (Wirtschaftlichkeit, Dauerhaftigkeit, freie Formbarkeit, ...) ist Beton der bevorzugte Baustoff für viele Bauten
- Alternative Baustoffe für viele Anwendungen ungeeignet



8 Nachhaltige Betonbauten

8.3 Konzepte

Konzepte

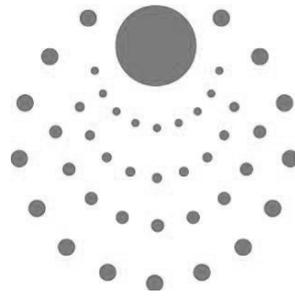
Da alternative Baustoffe nur ein beschränktes Potential haben, muss Beton Teil der Lösung sein.

Dazu müssen die Emissionen der Betonbauweise reduziert werden.

Ein etablierter Ansatz dazu ist der «5C Approach» des Cembureau (siehe Abbildung).

Dieser stellt die Baustoffe ins Zentrum. Der ebenso wichtige Punkt «effiziente und dauerhafte Tragwerke» ist darin zu wenig prominent.

Auf den folgenden Folien wird ein ganzheitlicher Ansatz gezeigt, der beide Aspekte gleich behandelt und zusätzlich den Komfortanspruch berücksichtigt.

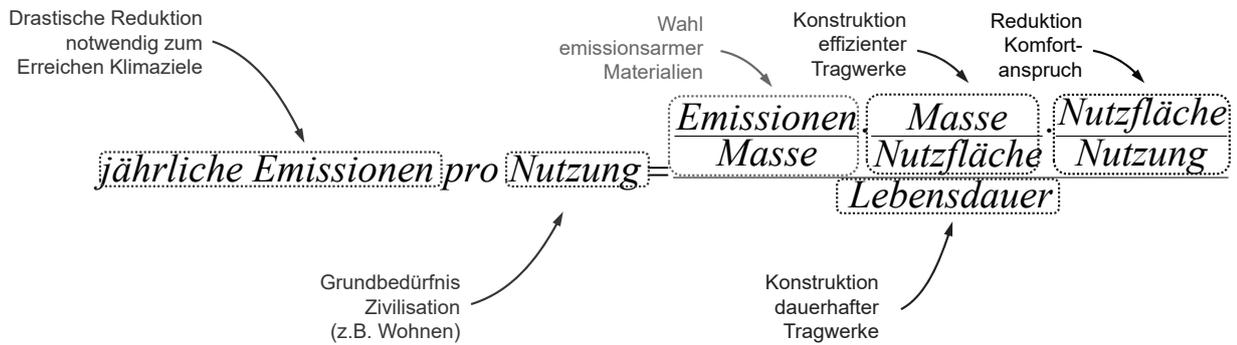


CLINKER
CEMENT
CONCRETE
CONSTRUCTION
CARBONATION

CLINKER	Alternative Brennstoffe zur Klinkerproduktion CO ₂ -Abscheidung im Zementwerk Alternative Klinkertypen
CEMENT	Einsatz klinkerarmer Zemente
CONCRETE	Reduktion Zementgehalt Rezyklierte Gesteinskörnung
CONSTRUCTION	Effiziente und dauerhafte Bauwerke
CARBONATION	Maximierung CO ₂ -Aufnahme durch Beton

Konzepte

Die jährlichen Emissionen pro Nutzung lassen sich mit folgendem Zusammenhang ausdrücken:



Quelle: Gebhard, L., *Reinforcement strategies for digital fabrication with concrete*. Doctoral dissertation, ETH Zurich, 2023 (in press).

Adaptiert von Flatt, Wangler 2022

Konzepte

Die jährlichen Emissionen pro Nutzung lassen sich mit folgendem Zusammenhang ausdrücken:

CLINKER
CEMENT
CONCRETE
CARBONATION
Wahl alternative Baustoffe (Holz, Lehm, ...)

$$\text{jährliche Emissionen pro Nutzung} = \frac{\text{Emissionen} \cdot \text{Masse} \cdot \text{Nutzfläche}}{\text{Masse} \cdot \text{Nutzfläche} \cdot \text{Nutzung} \cdot \text{Lebensdauer}}$$

Viele populäre Massnahmen zielen auf den Einsatz von emissionsarmen Materialien. Neben der Wahl von alternativen Baustoffen ist auch der Einsatz von Recyclingbeton eine populäre und sinnvolle Massnahme (Reduktion Abfall aus Bautätigkeit, reduzierte Steifigkeit ist zu beachten).

Quelle: Gebhard, L., *Reinforcement strategies for digital fabrication with concrete*. Doctoral dissertation, ETH Zurich, 2023 (in press).

Adaptiert von Flatt, Wangler 2022

Konzepte

Die jährlichen Emissionen pro Nutzung lassen sich mit folgendem Zusammenhang ausdrücken:

$$\text{jährliche Emissionen pro Nutzung} = \frac{\text{Emissionen}}{\text{Masse}} \cdot \frac{\text{Masse}}{\text{Nutzfläche}} \cdot \frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Nutzung}}$$

CONSTRUCTION ↘
CONSTRUCTION ↗

Effiziente und dauerhafte Bauwerke (CONSTRUCTION) können massgebend zur Reduktion der Emissionen beitragen. Hier haben Tragwerksplanende im Allgemeinen den grössten Einfluss.

Quelle: Gebhard, L., *Reinforcement strategies for digital fabrication with concrete*. Doctoral dissertation, ETH Zurich, 2023 (in press).

Adaptiert von Flatt, Wangler 2022

8 Nachhaltige Betonbauten

8.4 Lösungsansätze für Tragwerksplanende

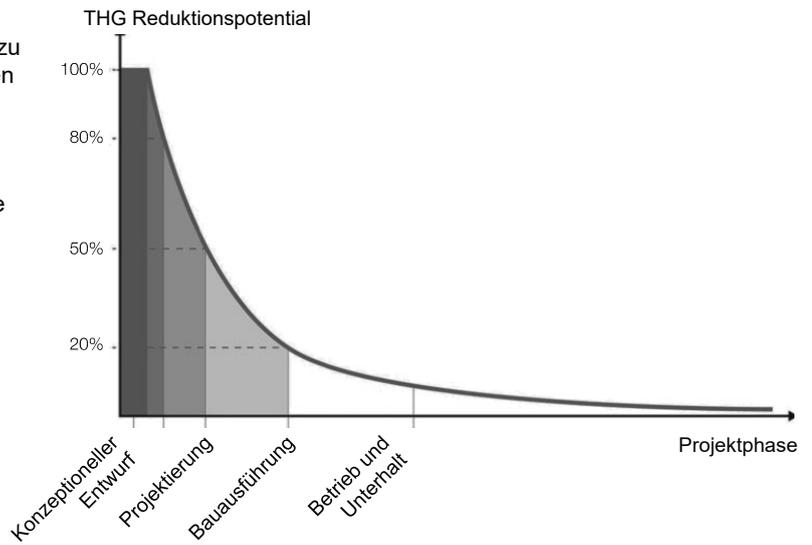
Lösungsansätze für Tragwerksplanende

Das Potential zur Reduktion von Emissionen ist in frühen Projektphasen am grössten.

Nachhaltigkeitsüberlegungen müssen daher schon zu Beginn eines Entwurfsprozesses einbezogen werden (auch wenn später ebenfalls noch erhebliche Potentiale bestehen).

Mit folgenden effizienten und praxistauglichen Ansätzen können (und müssen) Tragwerksplanende dazu beitragen, Emissionen zu verringern:

- Vermeidung von baulichen Massnahmen durch Nachrechnen
- Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau
- Wahl effizienter Tragwerke
- Optimieren von Abmessungen und Bewehrungsgehalten
- Konstruktion von dauerhaften Tragwerken



Quellenangabe Bild:

- The Institution of Structural Engineers – How to calculate embodied carbon

Vermeidung von baulichen Massnahmen durch Nachrechnen

Stützmauern mit korrodierter Bewehrung

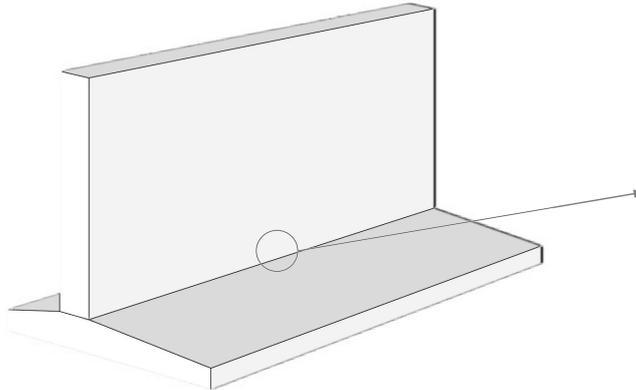
Dissertation Dr. Severin Haefliger an Professur für Massiv- und Brückenbau mit grossmassstäblichen Hybridversuchen und Entwicklung «korrodiertes Zuggurtmodell»

- Verformungsvermögen für Annahme aktiver Erddruck?
- Tragwiderstand bei reduziertem Querschnitt?

Motivation:

- (i) Einsturz einer Stützmauer an Brennerautobahn 2012
- (ii) ASTRA (2014): 38/56 untersuchten Stützmauern aus den Jahren 1960...70 mit schweren Korrosionsschäden
→ Instandsetzungskosten: 150 MCHF

Bestand ASTRA: über 2500 Stützmauern → Instandsetzungskosten in nächsten 15 a: 800 MCHF



25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

17

Quellenangabe:

-ASTRA, "Evaluation de l'état des murs de soutènement béton à semelle. Etude pilote. Rapport de synthèse des phases 1 et 2 » Technical Report, UVEK, Swiss Federal Roads Office FEDRO, 2014.

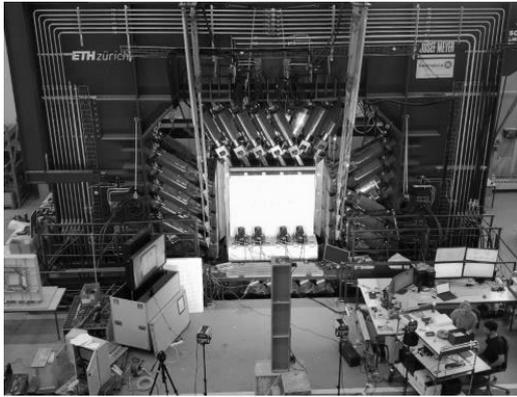
-Tec21 (2016)

Vermeidung von baulichen Massnahmen durch Nachrechnen

Stützmauern mit korrodierter Bewehrung

Dissertation Dr. Severin Haefliger an Professur für Massiv- und Brückenbau mit grossmassstäblichen Hybridversuchen und Entwicklung «korrodiertes Zuggurtmodell»

- Verformungsvermögen für Annahme aktiver Erddruck?
- Tragwiderstand bei reduziertem Querschnitt?

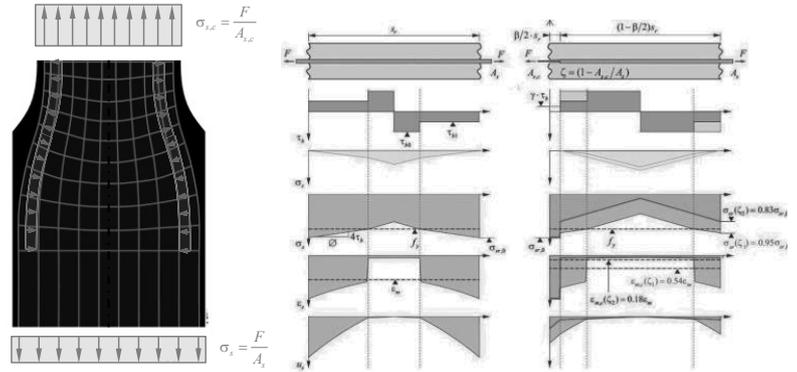


25.05.2023

Motivation:

- (i) Einsturz einer Stützmauer an Brennerautobahn 2012
- (ii) ASTRA (2014): 38/56 untersuchten Stützmauern aus den Jahren 1960...70 mit schweren Korrosionsschäden
→ Instandsetzungskosten: 150 MCHF

Bestand ASTRA: über 2500 Stützmauern → Instandsetzungskosten in nächsten 15 a: 800 MCHF



ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

18

Quellenangabe:

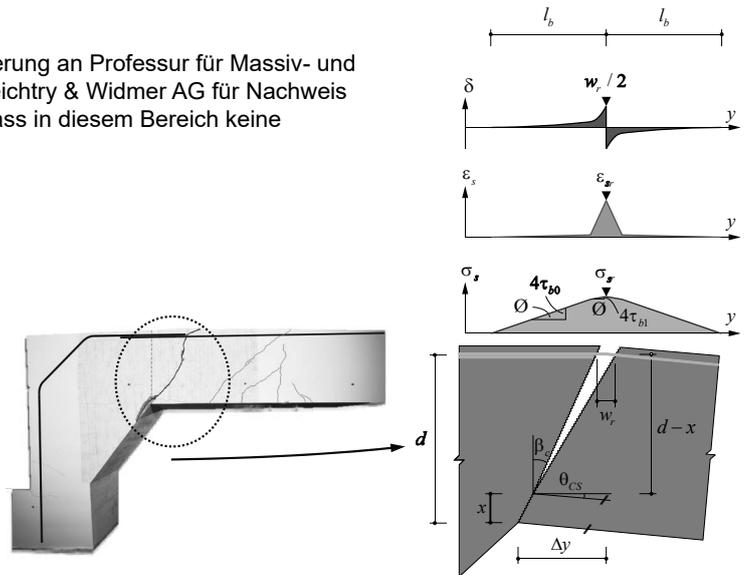
-ASTRA, "Evaluation de l'état des murs de soutènement béton à semelle. Etude pilote. Rapport de synthèse des phases 1 et 2 » Technical Report, UVEK, Swiss Federal Roads Office FEDRO, 2014.

-Tec21 (2016)

Vermeidung von baulichen Massnahmen durch Nachrechnen

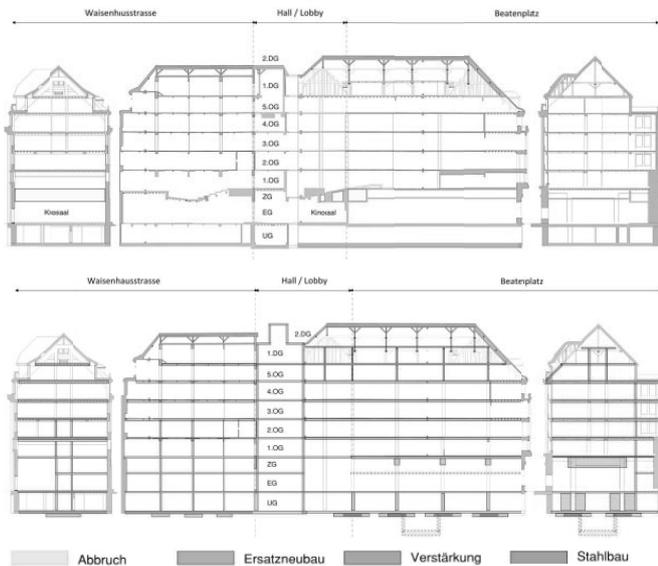
Bahn-Tagbautunnel

Versuche (Massstab 1:1) und nichtlineare FE-Modellierung an Professur für Massiv- und Brückenbau in Zusammenarbeit mit Ingenieurbüro Meichtry & Widmer AG für Nachweis Schubtragfähigkeit von Rahmeneck und Nachweis, dass in diesem Bereich keine Sanierungsmassnahmen notwendig sind.



Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umnutzung / Ertüchtigung Geschäftshaus Du Pont Zürich



25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

Tragwerk: Dr. Lüchinger + Meyer
Bauingenieure AG
Bauherrschaft: PSP Properties, Zürich
Architektur: monoplan, Zürich
Planung: 2017-2019
Realisierung: 2019-2020
Bausumme: 8.7 Mio. CHF (Konstruktion)



Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

20

Beim Geschäftshaus Du Pont am Beatenplatz in Zürich handelt es sich um ein zweiflügeliges historisches Gebäude aus den Jahren 1912/1913 mit neun Geschossen, welches im Zuge einer Umnutzung zu einem Hotel ertüchtigt und verstärkt wurde. Das Gebäude ist im Inventar der kunst- und kulturhistorischen Schutzobjekte eingetragen.

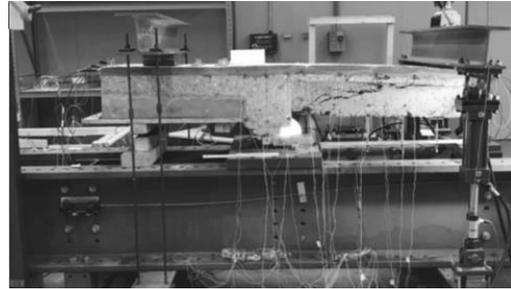
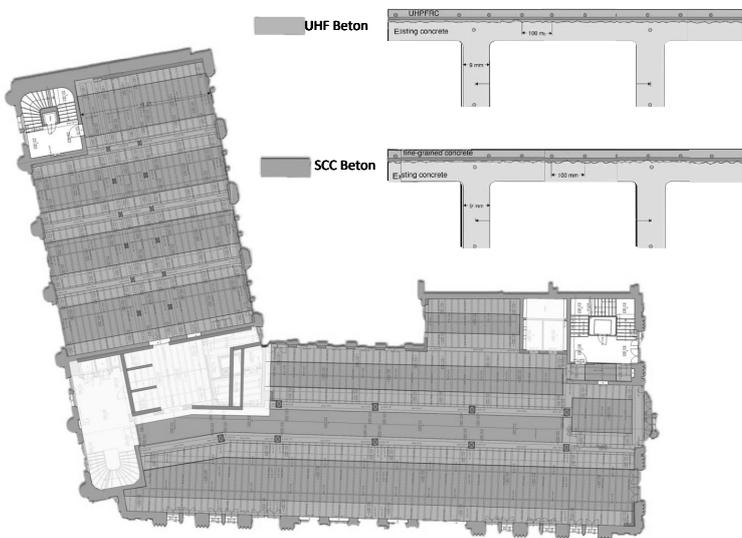
Die Eingriffe am Tragwerk umfassten:

- Verstärkung Bestandesdecken (siehe folgende Folie)
- Erstellen neues Zwischengeschoss
- Erstellen zusätzliches Dachgeschoss
- Abbruch und Ersatzneubau Bodenplatte, Erschliessungszonen und Decken über EG, UG und 5. OG
- Diverse Abfangungen
- Erdbeben- und Brandschutzertüchtigung

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umnutzung / Ertüchtigung Geschäftshaus Du Pont Zürich
Verstärkung Bestandesrippendecken

Tragfähigkeitsversuche an Professur für
Strukturmechanik



25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

21

Das Tragwerk besteht hauptsächlich aus Stahlbetonrippendecken, welche auf Unterzügen gelagert sind und auf einem Stützenraster aufliegen.

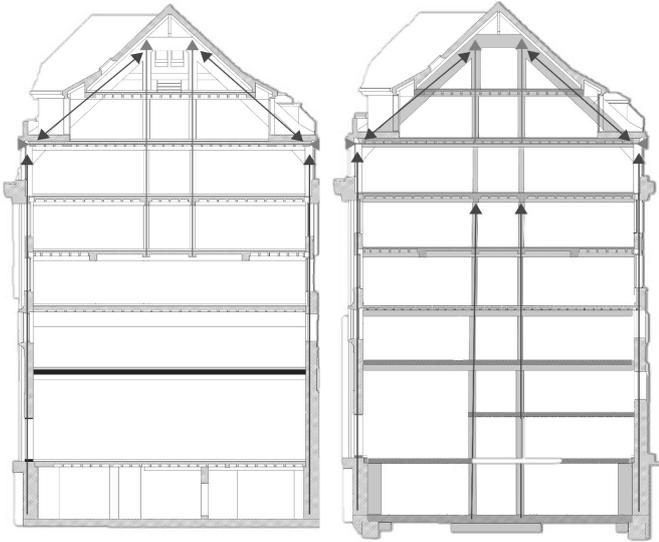
Die schlanken Ribbendecken wurden wo statisch erforderlich durch eine dünne 40 mm bewehrte UHFB-Schicht (Ultrahochfester Beton) auf der bestehenden Decke verstärkt. Die Zwischenbereiche in den Deckenfeldern wurden mit konventionellem selbstverdichtendem Feinbeton (SCC) erstellt.

Die Eignung dieses Verstärkungskonzepts wurde mittels Tragfähigkeitsversuchen am IBK an der ETH Zürich bestätigt.

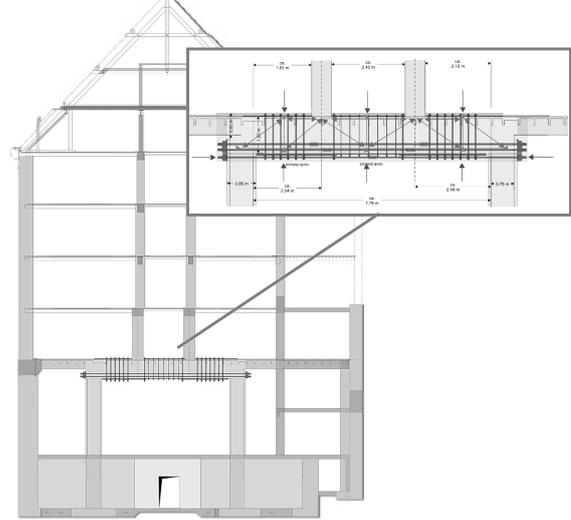
Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umnutzung / Ertüchtigung Geschäftshaus Du Pont Zürich

Verstärkungsmassnahmen Waisenhausstrasse



Verstärkungsmassnahmen Beatenplatz



Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

22

Im Flügel Waisenhausstrasse wurde der bestehende Kinosaal durch eine neue Geschossdecke und ein Zwischengeschoss ersetzt. Damit an dieser Konstruktion nur geringe Ertüchtigungsmassnahmen ausgeführt werden mussten und die Fassadenstützen nicht verstärkt werden mussten, wurden die Hängesäulen im 4. OG geschnitten. Dadurch wird die Zahl der aufgehängten Geschosse auf zwei reduziert. Die übrigen Geschosse wurden auf neue Stützen abgestützt und direkt (ohne Abfangungen) in die Foundation geleitet.

Im Flügel Beatenplatz wurde der Abfangträger mit externer Bewehrung verstärkt. Gewindestangen wurden als externes Zugband und auch als Querkraftbewehrung verwendet.

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umnutzung / Ertüchtigung Geschäftshaus Du Pont Zürich



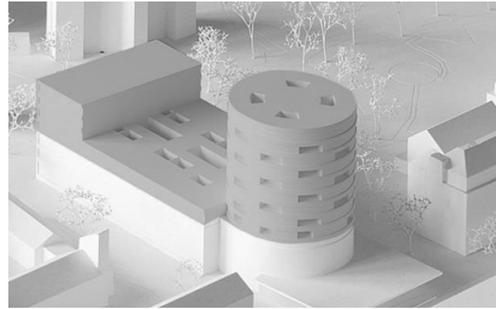
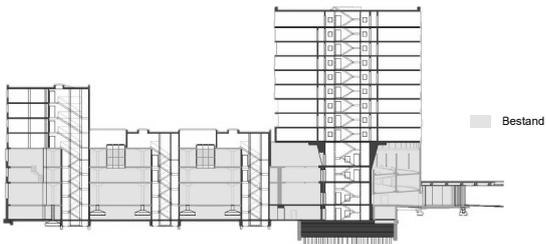
Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umbau und Erweiterung Schlotterbeck-Areal, Zürich



Tragwerk: Dr. Lüchinger + Meyer
Bauingenieure AG
Bauherrschaft: Schlotterbeck-Areal AG, Zürich
Architektur: Giuliani Hönger Architekten, Zürich
Planung: 2012-2014
Realisierung: 2014-2017
Bausumme: ca. 95 Mio. CHF



Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

29

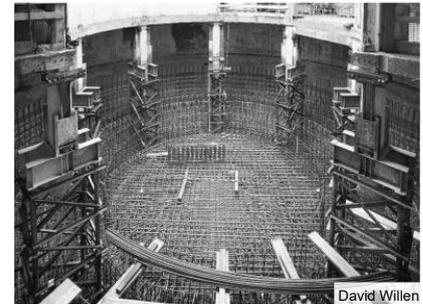
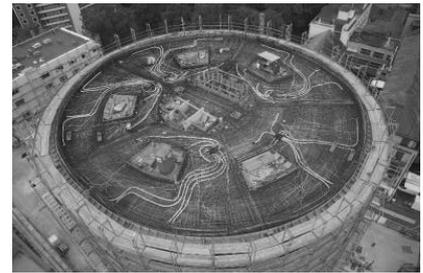
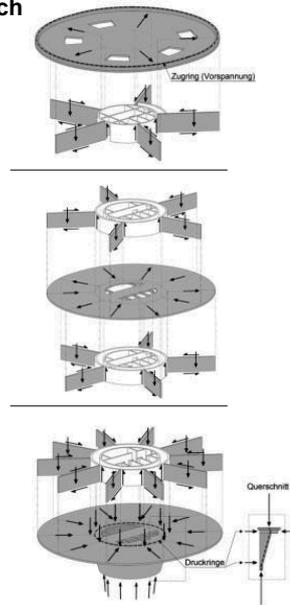
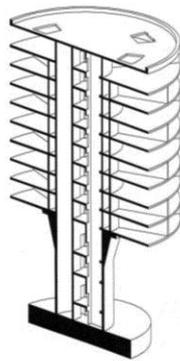
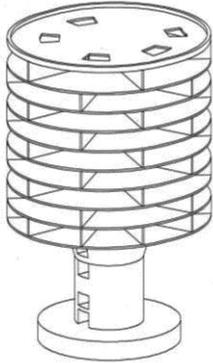
Das in den Jahren 1949/50 und 1960/61 erstellte, ursprünglich als Autogarage genutzte und denkmalgeschützte Gebäude wurde im Rahmen einer Umnutzung zu Wohnungen und Gewerbeflächen umgebaut und erweitert.

Der kompakte Umbau-Entwurf stellte einen neunstöckigen Wohnturm auf den Rundbau des Bestands, stockte das bestehende Werkstattgebäude um ein bzw. vier zusätzliche Stockwerke auf und erweiterte das Untergeschoss. Während der aufgesetzte Turm vom bestehenden Rundbau konsequent getrennt wurde, wurden im Hauptbau diverse Abfangungen und Verstärkungen ausgeführt.

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umbau und Erweiterung Schlotterbeck-Areal, Zürich

Tragwerk Wohnturm



David Willen

Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

30

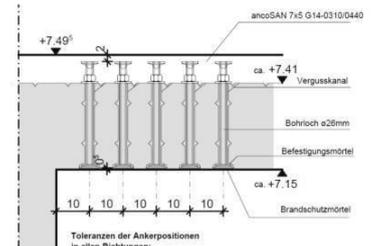
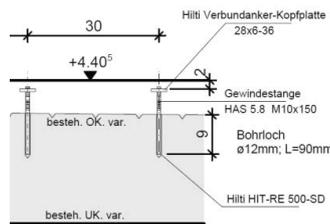
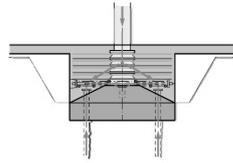
Der neungeschossige neue Turm überragt den bestehenden Rundbau bis auf eine Höhe von 40 m. Er lagert auf einem zylindrischen Schaft, der die Lasten durch das Auge einer denkmalgeschützten Rampe in die Foundation ableitet. Um auf eine Abfangdecke über dem Bestand verzichten zu können, wurden die je fünf radial angeordneten Wohneinheiten geschossweise jeweils um 36° versetzt, wodurch aufgrund der Aufhängung bzw. Abstützung der Decken an den Wohnungstrennwänden in Stahlbetonbauweise ein wirtschaftliches Deckentragwerk mit maximalen Spannweiten von rund 9 m resultierte. Die als Krag­scheiben konzipierten Radialwände lagern hierbei auf der äusseren Kernwand des Wohnzylinders auf, wobei das Gleichgewicht über die als Scheibe wirkenden Decken hergestellt wird. Am Turmkopf erfolgt der Kurzschluss der Ablenkkkräfte über einen Zugring in der Deckenscheibe, und am Plattenrand dient ein vorgespannter Überzug als Auflager der obersten Decke. Am unteren Ende des Turmkörpers wurde die Anzahl der Wohnungstrennwände verdoppelt, um eine ausreichende Lagerung der Decke zu erzielen.

Aufgrund der anstehenden, gering tragfähigen Seeablagerungen wurde eine kombinierte Mikropfahl-Plattengründung eingesetzt, um die Lasten in tiefer liegende Schotter- und Moräneschichten einzutragen. Für die Erstellung der 2.8 m dicken Fundationsplatte mussten die inneren Stützen der Rampeanlage vorgängig über Stahlhilfskonstruktionen mit Mikropfählen abgefangen werden.

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umbau und Erweiterung Schlotterbeck-Areal, Zürich

Tragwerk Hauptbau



David Willen

David Willen

Alle Unterlagen Dr. Lüchinger + Meyer Bauingenieure AG

Neben der vertikalen Erweiterung erfuhr der Hauptbau insbesondere im Untergeschoss signifikante räumliche Eingriffe. Zur Anbindung der zentralen Erschliessungskerne mussten Erweiterungen des Untergeschosses inner- und ausserhalb des Gebäudegrundrisses realisiert werden. Aus der Überprüfung des Bestands resultierten eine ungenügende Tragsicherheit der Einzelfundamente und folglich die Notwendigkeit von Verstärkungsmassnahmen.

Im Bereich ohne bestehendes Untergeschoss galt es, die höherliegenden Einzelfundamente zu ertüchtigen und zusätzlich jene, die unmittelbar an die Erweiterung angrenzen, zu unterfangen. Zu diesem Zweck wurden über den bestehenden Einzelfundamenten Pfahlbankette errichtet, welche sich bis zur Bodenplattenoberkante erstrecken und die Lasten in neue Mikropfahlgründungen eintragen. Den Lastübertrag ermöglichen mit HDW in den Bestand geschnittene Verzahnungen, horizontal verlaufende Spannstangen nehmen die Ablenkräfte auf.

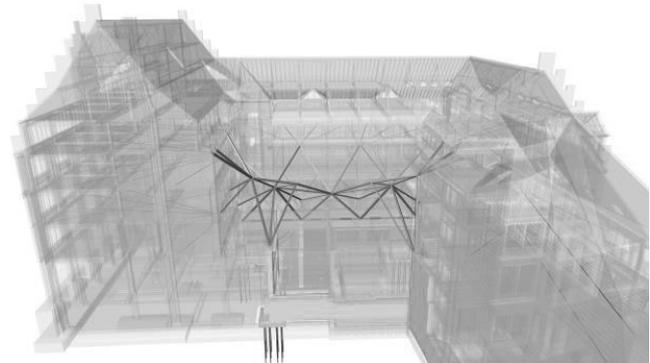
Die weit gespannten Betonpilzdecken der oberen Geschosse erfuhr trotz Minimierung der Ausbaulasten eine Zusatzbelastung sowie Schwächungen infolge neuer Deckenöffnungen. Hierauf wurde mit umfangreichen Verstärkungsmassnahmen in Form einer Kombination aus verdübelten Aufbetonzonen und deckenunterseitigen Stahlklebelamellen reagiert.

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Umbau Leuenhof, Bahnhofstrasse 32, Zürich Denkmalgerechte Sanierung

Tragwerk: WaltGalmarini
Bauherrschaft: Swiss Prime Anlagestiftung
Architektur: Tilla Theus und Partner
Realisierung: 2018-2020

Erdbebenertüchtigung im Innenhof mittels Stahlstruktur
→ Minimale Eingriffe in denkmalgeschützte Bereiche



Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

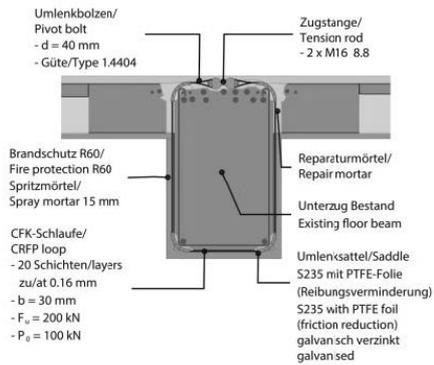
Beim Leuenhof handelt es sich um einen frühen Eisenbetonbau aus den Jahren 1913/14.

Die Erdbebenertüchtigung des denkmalgeschützten Bauwerks stellte Architektin und Bauingenieure vor eine besondere Herausforderung. Mit einer aussenliegenden Stahlskulptur, quasi als «Kunst am Bau», wurden die Erdbebenkräfte aus den Geschossdecken gebündelt und in den Baugrund abgeleitet, ohne Beeinträchtigung der historisch wertvollen Innenräume.

Umnutzung / Instandsetzung / Ertüchtigung statt Neubau

Stahlbetonträger aus dem Jahr 1914 mit Querkraftdefizit / Hourdisdecken

- Spannweite 7.2 m / 4.2 m
 - Ertüchtigung mittels vorgespannten CFK-Schlaufe als externe Bügel / Ertüchtigung mittels Faserbeton
 - Verifizierung ertüchtigter Stahlbetonträger mittels Bruchversuchen im Gebäude
 - Reduktion Treibhausgase im Vergleich zu einem Neubau um ca. 45% (Neubau: Betondecke d = 26 cm, ca. 110 kgCO₂eq/m²)
- THGE infolge Einsatz Faserbeton, Chromstahlteile, CFK und Brandschutzmörtel trotz geringem Materialverbrauch hoch



Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton I

33

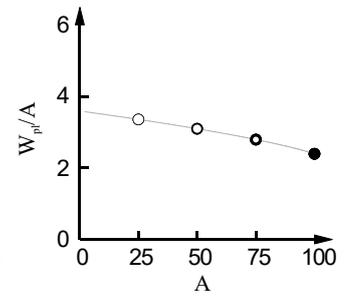
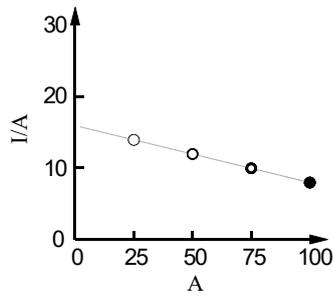
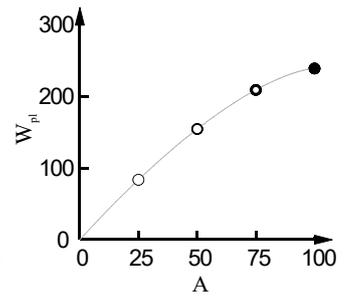
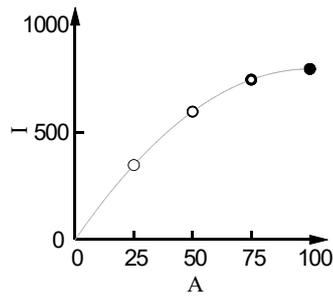
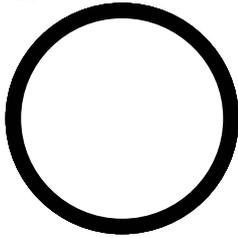
Die schlanken schwach bewehrten Unterzugsdecken aus der Frühzeit des Stahlbetonbaus wurden mit vorgespannten CFK-Schlaufen ertüchtigt. Die Wirksamkeit der neu entwickelten Verstärkungsmassnahme wurde mit einem in Situ Grossversuch verifiziert und bestätigt. Mit dem Verstärkungskonzept wurden Durchbrüche in den Unterzügen für die komplett neue Gebäudetechnik und zudem eine Erhöhung der zulässigen Nutzlast ermöglicht.

Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

Bei einem runden Hohlquerschnitt (mit konstantem Aussendurchmesser) steigen das Verhältnis I/A zwischen Steifigkeit und Fläche (und folglich dem Eigengewicht) und das Verhältnis W_{pl}/A zwischen plastischen Widerstandsmoment und Fläche mit zunehmendem Innenradius.

→ Hohlquerschnitte sind effizienter als Vollquerschnitte

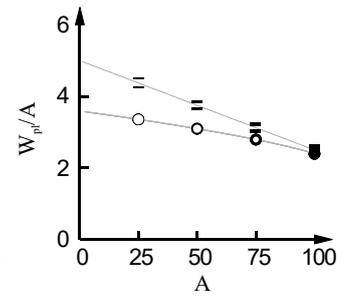
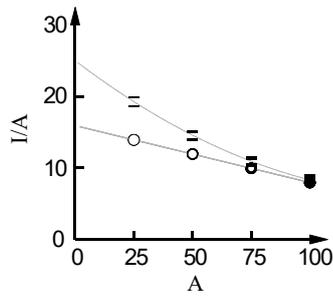
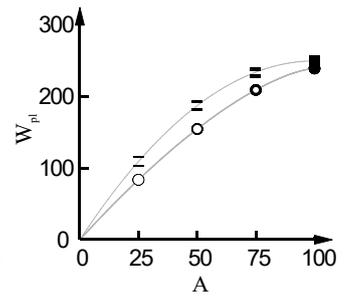
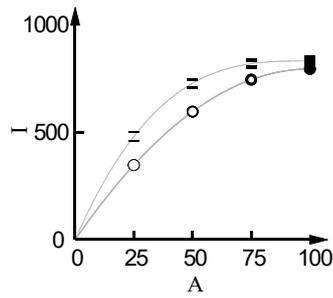


Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

Bei einem Flanschquerschnitt (mit konstanter Höhe) steigen die Verhältnisse I/A und W_{pl}/A mit abnehmender Flanschstärke noch ausgeprägter.

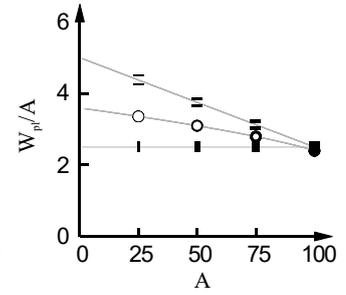
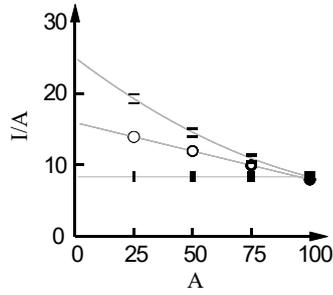
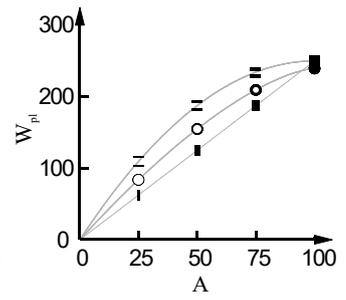
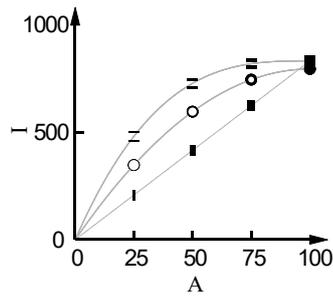
- Quadratische Querschnitte sind bei gleicher Fläche effizienter als runde Querschnitte.
- Flanschquerschnitte sind effizienter als Vollquerschnitte



Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

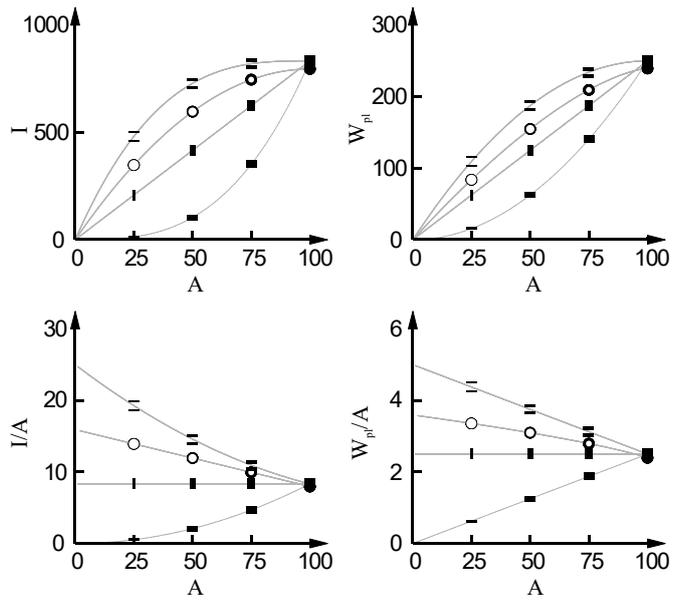
→ Wenn bei einem Rechteckquerschnitt die Breite verändert wird, bleiben I/A und W_{pl}/A konstant.



Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

- Wenn bei einem Rechteckquerschnitt die Breite verkleinert wird, bleiben I/A und W_{pl}/A konstant.
- Wenn bei einem Rechteckquerschnitt die Höhe verkleinert wird, sinken I/A und W_{pl}/A stark.



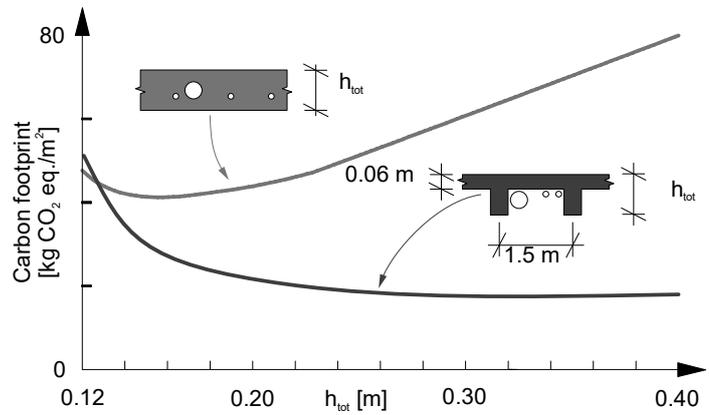
Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

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: $h_{solid} \geq 6$ cm (R30 ok, aber Trittschalldämmung erforderlich).



Wahl Effizienter Tragwerke

Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

Rippenplatten sind viel effizienter als Vollplatten.

Frühe Betonbauten waren in der Regel wirtschaftlich und statisch effizient, da die Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Materialkosten direkt mit der Materialeffizienz verknüpft war.

Tiefe Material- und hohe Lohnkosten führten seither dazu, dass einfache Geometrien, die mit wenig Arbeitsaufwand hergestellt werden können (z.B. Flachdecke), wirtschaftlich sind, selbst wenn unnötig viel Beton und Bewehrung verbraucht wird.



Lanificio Gatti, Pier Luigi Nervi, 1951

Wahl Effizienter Tragwerke

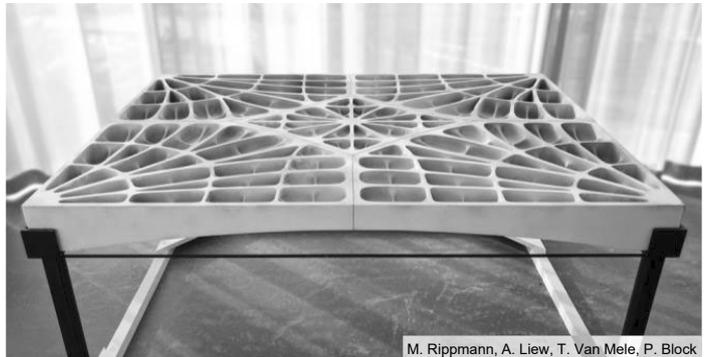
Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

Rippenplatten sind viel effizienter als Vollplatten.

Frühe Betonbauten waren in der Regel wirtschaftlich und statisch effizient, da die Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Materialkosten direkt mit der Materialeffizienz verknüpft war.

Tiefe Material- und hohe Lohnkosten führten seither dazu, dass einfache Geometrien, die mit wenig Arbeitsaufwand hergestellt werden können (z.B. Flachdecke), wirtschaftlich sind, selbst wenn unnötig viel Beton und Bewehrung verbraucht wird.

Mit digitaler Fertigung besteht das Potential, effiziente Tragwerke wirtschaftlich herzustellen.



M. Rippmann, A. Liew, T. Van Mele, P. Block

Wahl Effizienter Tragwerke

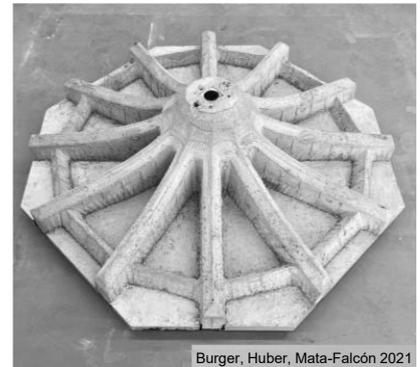
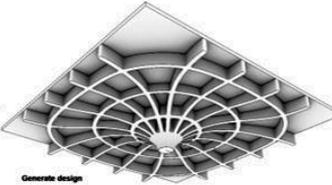
Statisch effiziente Tragwerke ermöglichen erhebliche Materialeinsparungen

Rippenplatten sind viel effizienter als Vollplatten.

Frühe Betonbauten waren in der Regel wirtschaftlich und statisch effizient, da die Wirtschaftlichkeit aufgrund der hohen Materialkosten direkt mit der Materialeffizienz verknüpft war.

Tiefe Material- und hohe Lohnkosten führten seither dazu, dass einfache Geometrien, die mit wenig Arbeitsaufwand hergestellt werden können (z.B. Flachdecke), wirtschaftlich sind, selbst wenn unnötig viel Beton und Bewehrung verbraucht wird.

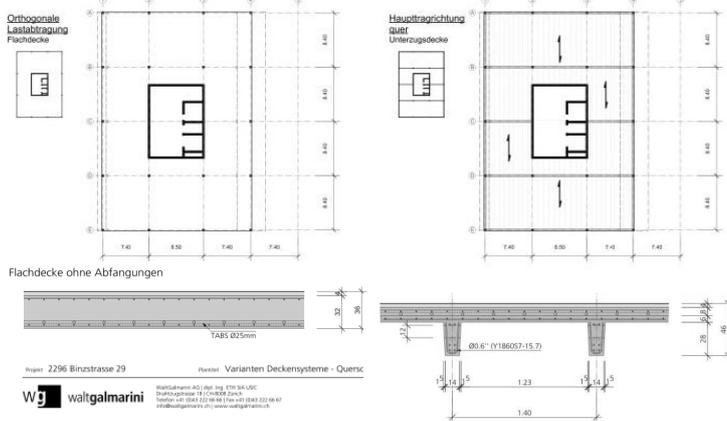
Mit digitaler Fertigung besteht das Potential, effiziente Tragwerke wirtschaftlich herzustellen.



Wahl Effizienter Tragwerke

Neubau Büro- und Gewerbehaus, Binzstrasse 29, Zürich
 Variantenvergleich Deckentragwerk

Tragwerk: WaltGalmarini
 Bauherrschaft: Swiss Life AG, Zürich
 Architektur: EM2N Architekten AG, Zürich
 Realisierung: 2021-2022



Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

42

Im Zuge der Projektierung des Büro- und Gewerbehauses an der Binzstrasse 29 in Zürich wurde ein Variantenvergleich des Deckentragwerkes durchgeführt, wobei eine Flachdecke (ohne Abfangungen) und eine vorgefertigte Rippendecke (mit Aussparungen) verglichen wurden. Ausgeführt wurde die Variante der Rippendecke, wobei die Rippendecken über 8.4 m spannen und auf Ortbetonunterzügen aufliegen.

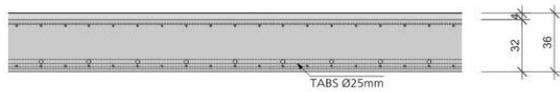
Wahl Effizienter Tragwerke

Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

Neubau Büro- und Gewerbehaus, Binzstrasse 29, Zürich

Variantenvergleich Deckentragwerk

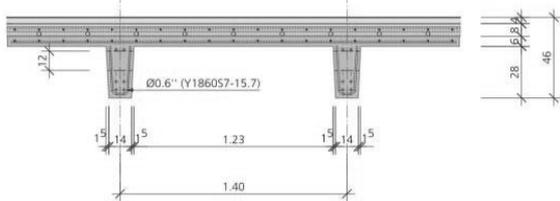
Flachdecke ohne Abfangungen



Ausmass: 1'045 m³ / 2'900 m²
 THGE: 471'913 kgCO₂eq
 163 kgCO₂eq/m²

(KBOB 2009/1:2022)

Rippendecke vorgefertigt mit Aussparungen



Ausmass: 483 m³ / 2'900 m²
 THGE: 365'384 kgCO₂eq
 126 kgCO₂eq/m² (-22 %)

(KBOB 2009/1:2022)



Massgebliche Reduktion der Treibhausgasemissionen (THGE; -22%) durch Reduktion des Betonvolumens (-53%) gegenüber einer konventionellen Flachdecke.

THGE infolge Einsatz frühfester, hochfester Betone in der Vorfabrikation sowie des Transports trotz Materialreduktion hoch (Potential zur weiteren Reduktion).

25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

43

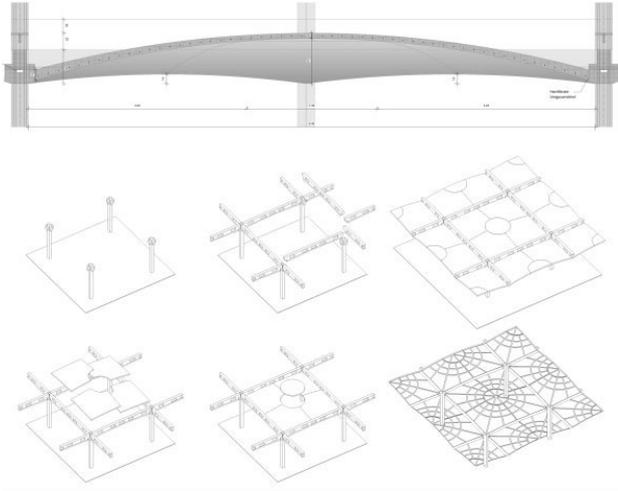
Im Variantenvergleich zeigt sich die enorme Materialeinsparnis (-53%), welche durch die Wahl eines effizienten Tragwerks möglich ist.

Auch bezüglich der Treibhausgasemissionen ergibt sich eine erhebliche Einsparung (-22%).

Wahl Effizienter Tragwerke

Projekt: Neubau CreaTower I in Zug

Vorfabrizierte Gewölbefläche 6 m x 6 m für 40 m Hochhaus
/ Variantenvergleich Deckentragwerk



Tragwerk: WaltGalmarini AG
Bauherrschaft: Urban Assets ZUG AG
Architektur: Gigon / Guyer Architekten AG
Realisierung: 2025 – 2026



Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

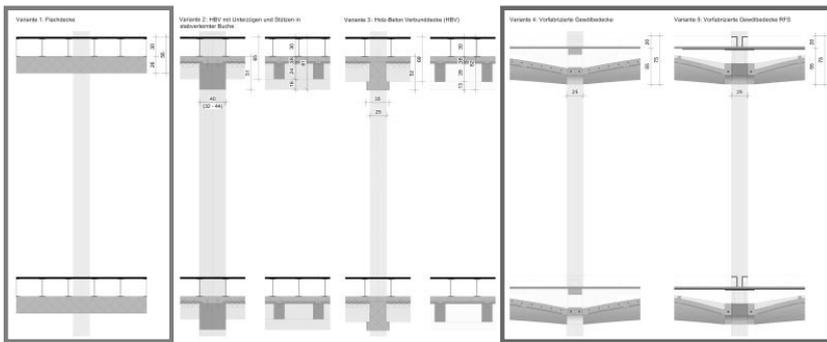
25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton I

44

Im Wettbewerb für den Neubau des CreaTower I in Zug wurden verschiedene Varianten für das Deckentragwerk untersucht.

Wahl Effizienter Tragwerke



Konsequente Reduktion des Gewichts durch gezielten Materialeinsatz

- optimierte Geschossdecken im Vergleich zu einer konventionellen Flachdecke: Masse -66%, THGE -69%
- Gesamtgebäude als Folge des massenreduzierten Deckensystems: Masse -33%, THGE -35%

Durch gezielten Einsatz des Baustoffs Beton liegen die Emissionen in der ähnlichen Grössenordnung wie bei einem konventionellen Holzbau (je nach Berechnung auch tiefer).

Bauteil	Masse [Tonnen]			CO ₂ -Emissionen [kg CO ₂ -eq]		
	Konventionell	Optimiert	Reduktion	Konventionell	Optimiert	Reduktion
Decken Hochhaus	4'986	1'688	-66%	631'852	196'576	-69%
Kerne Hochhaus	2'396	1'598	-33%	391'942	243'062	-38%
Stützen	651	394	-40%	152'880	91'516	-40%
Decken Untergeschosse	4'921	4'921	0%	670'662	670'662	0%
Kerne Untergeschosse	501	438	-13%	86'739	69'916	-19%
Aussenwände Untergeschosse	768	768	0%	107'743	107'743	0%
Bodenplatte	4'251	2'125	-50%	643'046	298'331	-54%
Fundation	5'146	3'935	-24%	665'214	503'630	-24%
Total	23'620	15'867	-33%	3'350'079	2'182'237	-35%

Bei sichtbaren Oberflächen kann Beton zudem als Speichermasse für den Tag-Nacht-Temperaturausgleich aktiviert werden.

Alle Unterlagen WaltGalmarini AG

Untersucht wurden eine konventionelle Flachdecke mit einer Stärke von 26 cm, eine Holzbetonverbunddecke mit Unterzügen und Stützen in stabverleimter Buche, eine Holzbetonverbunddecke und zwei Varianten von vorfabrizierten Gewölbedecken. Mittels den Gewölbedecken sind signifikante Einsparungen bezüglich der verbauten Masse (-33%) und bezüglich den resultierenden Treibhausgasemissionen (-35%) möglich.

Optimieren von Bauteilabmessungen und Bewehrungsgehalten

Optimierung Deckenstärke (theoretisches Beispiel)

Reduktion Deckenstärke um 2 cm (z.B. von 26 cm auf 24 cm) bei Hochbau mit Grundriss 20 m x 20 m mit 5 Decken

Annahme keine Veränderung verbaute Bewehrung (Reduktion Mindestbewehrung kompensiert für zusätzlich notwendige statische Bewehrung)

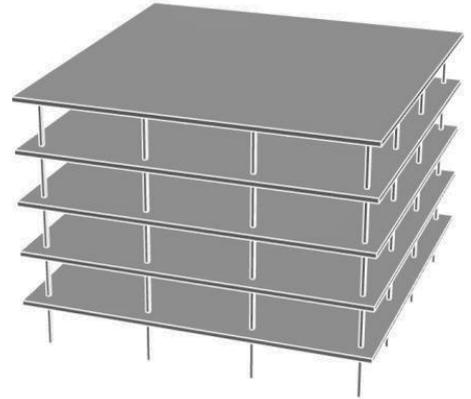
Erzielte Einsparung an Emissionen:

$$5 \cdot 0.02 \text{ m} \cdot 20 \text{ m} \cdot 20 \text{ m} \cdot 230 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3 = 9200 \text{ kgCO}_2\text{eq}$$

Zum Vergleich: Ausstoss Emissionen bei Flug auf New York für eine Person Hin- und Rückweg:

2000 kgCO₂eq

→ Eingesparte Emissionen durch Optimieren Decke 4-5 mal so gross wie durch Flug ausgestossene Emissionen



Quelle für Ausstoss Flugemissionen: myclimate.org

Quelle für Emissionen Beton: Ökobilanzdaten im Baubereich, KBOB

Optimieren von Bauteilabmessungen und Bewehrungsgehalten

Optimierung Abwasserspeicherkanal

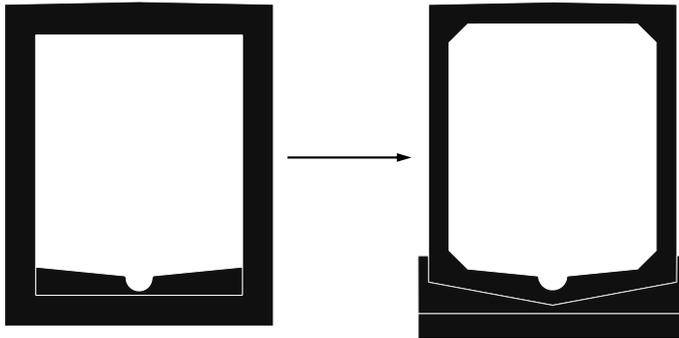
Kanal "Moränenstrasse", geplant und produziert durch DSE systems

Diverse Projektoptimierungen inkl. Wahl Vorfabrikation statt Ortsbeton ermöglichen Reduktion für Erstellung nötige Mindeststärke und Reduktion Mindestbewehrung durch segmentierte Bauweise

→ 5% weniger Beton (Potential noch viel grösser)

→ 35% weniger Bewehrung

→ Beschleunigung Baustelle um 6 Monate

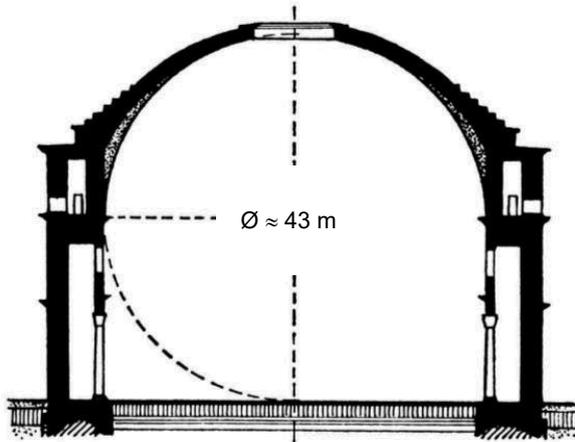


DSE systems

Alle Unterlagen DSE systems

Konstruktion von dauerhaften Tragwerken

Unbewehrter Beton ist sehr dauerhaft, wie beispielsweise das Pantheon in Rom zeigt – seit bald 2000 Jahren.



25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

48

Wohl der herausragendste Zeuge des römischen Betonbaus ist das Pantheon in Rom. Es wurde ursprünglich etwa im Jahr 25 n. Chr. gebaut, brannte dann aber zweimal ab; das heutige Pantheon stammt aus dem Jahr 120 n. Chr..

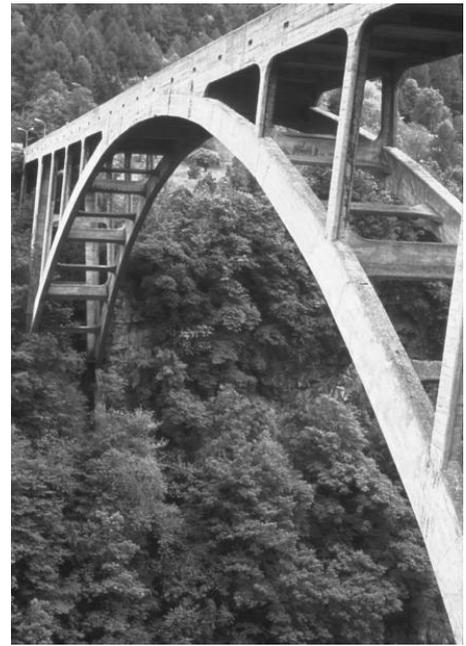
Die Kuppel mit einem Durchmesser von über 43 m ist imposant und wurde hinsichtlich Spannweite erst Anfang des 20. Jahrhunderts von der Kuppel der Breslauer Jahrhunderthalle übertroffen.

Konstruktion von dauerhaften Tragwerken

Auch Stahlbeton ist grundsätzlich sehr dauerhaft, insbesondere im Vergleich mit alternativen Bauweisen (Holz, Stahl, ...) und bei starker Exposition (Wasser, Erdreich, ...).

Viele Brücken aus der Anfangszeit des Stahlbetonbaus sind noch heute in Betrieb (während der Lebensdauer nur wenige Male instandgesetzt).

Wird der Unterhalt vernachlässigt, können die Folgen jedoch dramatisch sein (Schäden sind nicht immer visuell erkennbar).



25.05.2023

ETH Zürich | Prof. Dr. W. Kaufmann | Vorlesung Stahlbeton II

49

8 Nachhaltige Betonbauten

8.5 Abschätzungen Umwelteinwirkung von Bauten

Abschätzungen Umwelteinwirkung von Bauten

Auf folgende Datenbanken kann zurückgegriffen werden um mit überschaubarem Aufwand verschiedene Baustoffe / Varianten bezüglich ihrer Umweltauswirkung zu vergleichen:

- EPD (Environmental Product Declaration) von jeweiligen Herstellern
- [Excel-Liste zu Ökobilanzdaten im Baubereich](#), herausgegeben von der Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB, publiziert über admin.ch

Dabei können erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Quellen bestehen. Beispielsweise wurde in der KBOB-Datenbank ein Treibhausgaspotential von ca. 1140 kg CO₂eq/t für Armierungsstahl angegeben*, während in einer EPD von Stahl Gerlafingen ein Treibhausgaspotential von 457 kg CO₂eq/t ausgewiesen wird.

Für den Vergleich verschiedener Betonsorten wird von KBOB auf folgendes Tool verwiesen:

- Online-Betonrechner von treeze.ch

Dabei ist insbesondere der Zementtyp entscheidend für die Treibhausgasemissionen. Beispielsweise kann durch die Wahl von einem Zementtyp CEM III/B anstatt einem CEM II/A dieser Wert gemäss dem treeze-Online-Betonrechner für einen Hochbaubeton NPK B von 222 kg CO₂eq/m³ auf 126 kg CO₂eq/m³ reduziert werden.

*In der Version vom 31.05.2021 wurde ein Treibhausgaspotential von 1520 kg CO₂eq/t für Armierungsstahl ausgewiesen. In der Version vom 10.03.2023 wird kein Wert angegeben, aber es steht, dass die ausgewiesenen Werte «aufgrund eines Fehlers in den Daten zu Armierungsstahl» um ca. 25% zu hoch waren.