



# Zukunftsfähige Tiefbaulösungen

Nachhaltigkeit durch den Einsatz von Beton und Recyclingmaterialien in Infrastrukturprojekten

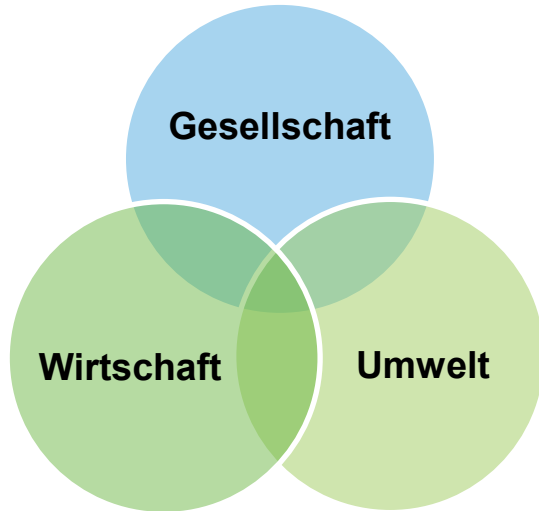
STC 2024, KKL Luzern, Prof. Simone Stürwald



## Inhalt

- Klimaziele und Nachhaltigkeit
- Nachhaltige Betone
  - CO2-Reduzierte Betone
  - Recyclingbetone
  - Alternativen
- Fazit

# Nachhaltigkeit und Lebensdauerprinzip



Ökologische Nachhaltigkeit

=

Summe der Umweltauswirkungen

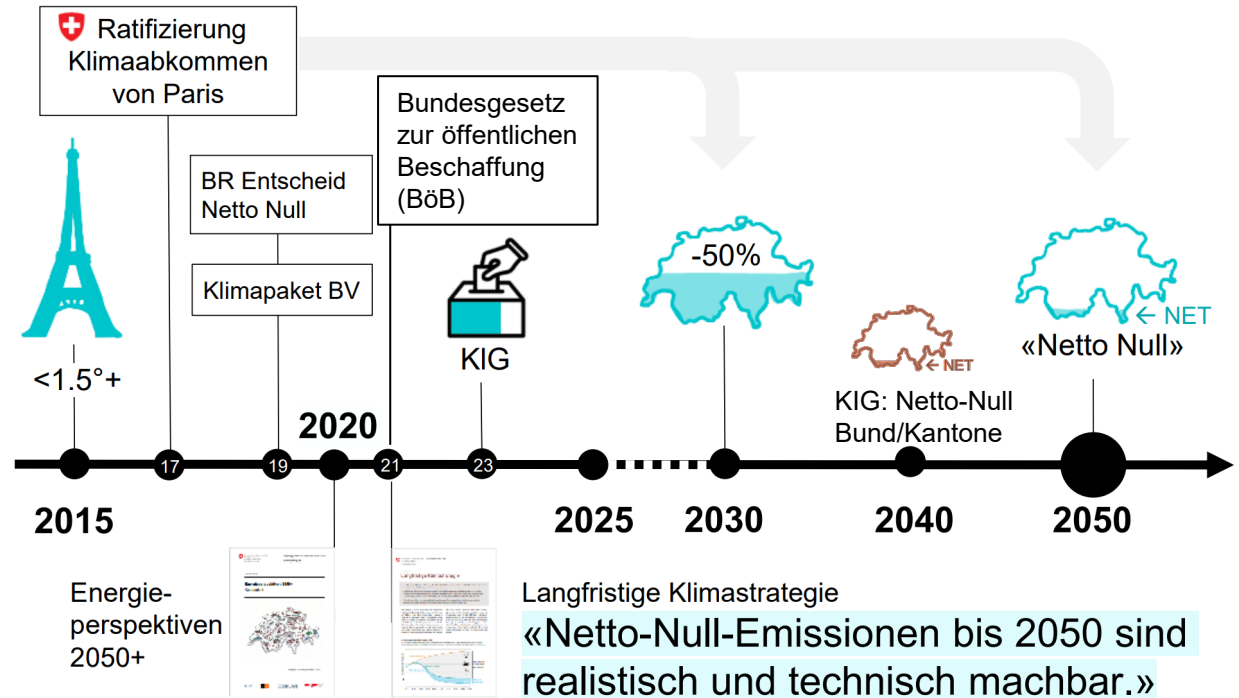
Funktionseinheit x Lebensdauer



# Nachhaltige öffentliche Beschaffung in der Schweiz

## Nachhaltige Beschaffung

- Weniger CO<sub>2</sub>
- Kreislaufwirtschaft
- Qualität
- Innovation



# Nachhaltigkeit im Tief- und Infrastrukturbau SIA 112/2

sia

SIA 112/2:2016 Bauwesen

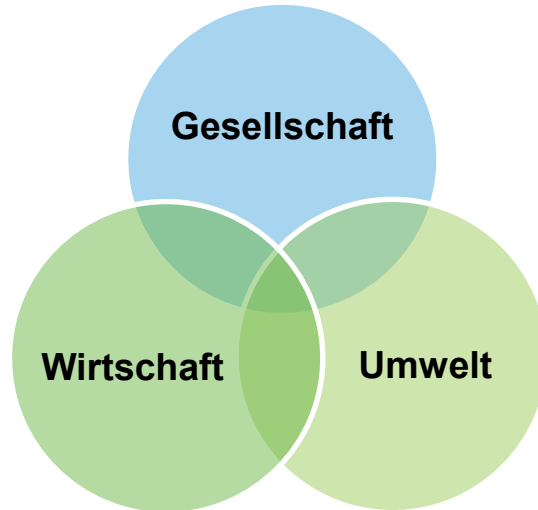
SN Schweizer Norm  
Norma Svizzera  
Norma Svizzera

530 112/2

Construction durable - Génie civil et infrastructures

Nachhaltiges Bauen –  
Tiefbau und Infrastrukturen

112/2



Referenznummer  
SN 530112:2016 de

Gültig ab: 2016-07-01

Herausgeber  
Schweizerischer Ingenieur-  
und Architektenverein  
Postfach, CH-8007 Zürich

Anzahl Seiten: 104

Copyright © 2016 by SIA Zürich

Preisgruppe: 36

## – Übergeordnete Teilziele

- Ue 1: Gesamtbeurteilung (Nachhaltigkeitsbeurteilung)
- Ue 2: Systemabgrenzung

## – Gesellschaft

- G 1: Raumentwicklung und Siedlungen
- G 2: Gemeinschaft (Kommunikation, Partizipation)
- G 3: Gesundheit, Wohlbefinden, Sicherheit

## – Wirtschaft

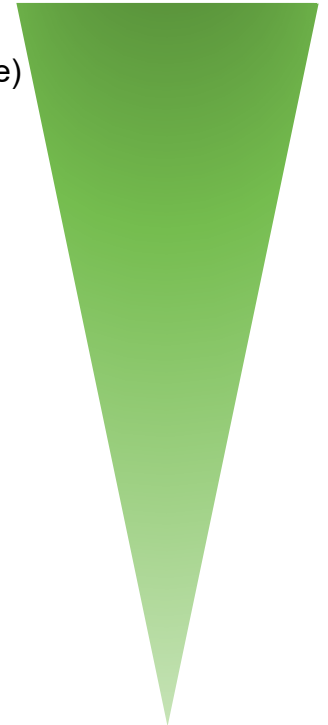
- W 1: Betriebswirtschaftliche Sichtweise
- W 2: Volkswirtschaftliche Sichtweise
- W 3: Finanzierung

## – Umwelt

- U1: Energie- und Bodennutzung
- U 2: Umweltbelastungen
- **U 3: Rohstoffe und Baustoffe**
- U 4: Gefahrenprävention

# Nachhaltigkeit im Tunnelbau

- Massgebend: globale Projektentscheide in der Konzeptphase!
  - Tunnelbau verbessert Nachhaltigkeit (z.B. Entlastung Mensch & Umwelt, kürzere Wegstrecke)
  - Verlauf, Länge, Querschnitt, Verfahren -> Minimierung Kubatur & Aufwand, Landschaft
  - ....
- Projektplanung
  - Hohe Langlebigkeit -> günstiges Life Cycle Assessment (LCA)
  - Verwendung und Ablagerung Ausbruchmaterial -> Landschaftseingriff oder Baustoff
  - Sicherheitskonzept für Bau und Betrieb
  - Logistik, Transporte
  - **Baustoff-Spezifikation**
  - ....





## Aspekte ökologisch nachhaltiger Betone (im Tunnelbau)

- CO<sub>2</sub>-Emissionen
  - Zemente / Bindemittel reduzieren (bei gleicher Dauerhaftigkeit!)
  - Transporte reduzieren
- Ressourcenflüsse, Kreislaufwirtschaft
  - Lokales Material, Ausbruchmaterial
  - Rezyklierte Gesteinskörnung
  - Reduktion der Betonkubatur (z. B. weniger Füllbeton)

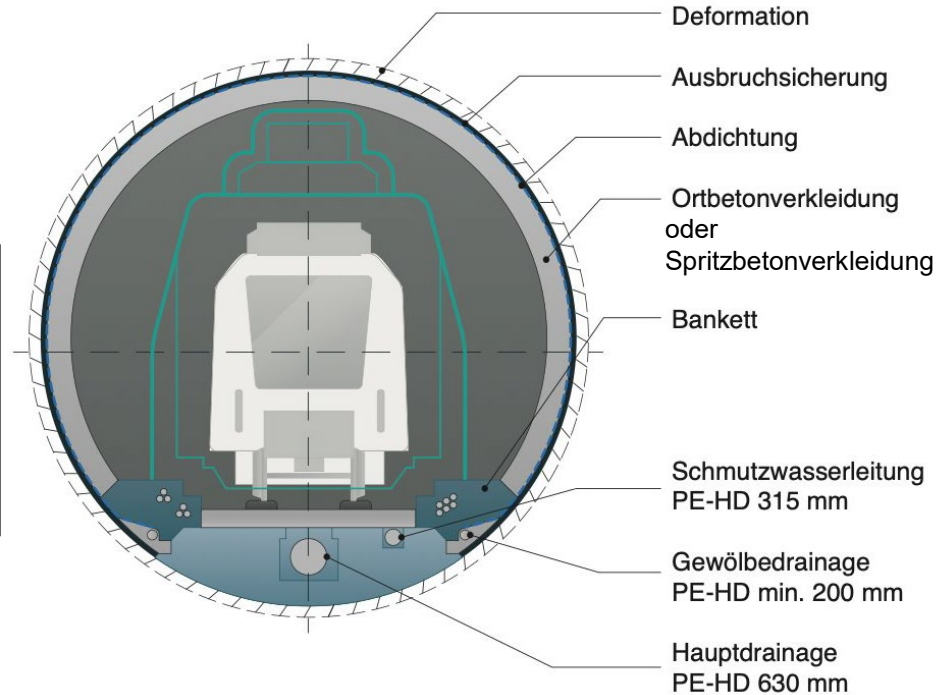
Umwelt

# Betone im Tunnelbau

- Spritzbeton
  - Ausbruchsicherung
  - Verkleidung
- Ortbeton
  - Verkleidung
  - Ausbau
  - Verfüllung
- Fertigteile
  - Tübbinge
  - Rinnen, Bankette, ect

## Expositionen:

- angreifendes Bergwasser
- Karbonatisierung
- ggf. Frost und Chlorid
- Brand
- aus Nutzung



Quelle: BauPraxis – Der Untertagbau, Band 2; Heinz Ehrbar, Olivier Böckli, Christian Ammon

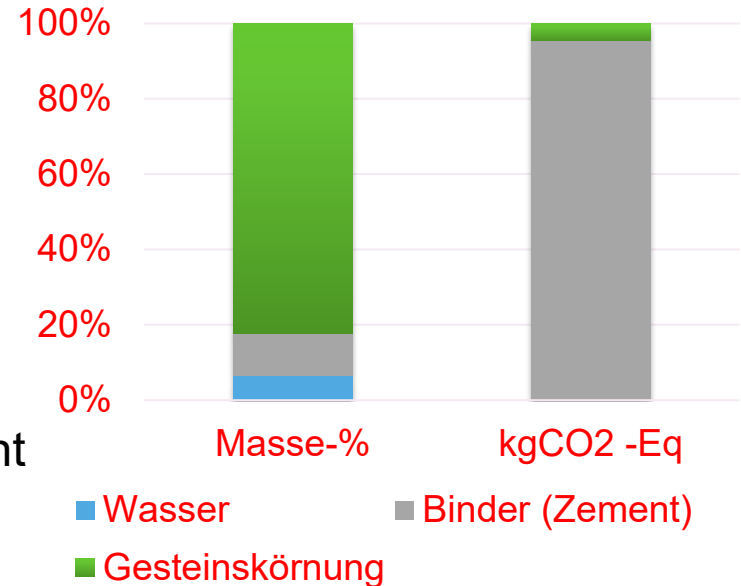




## CO<sub>2</sub>-Reduzierte Betone

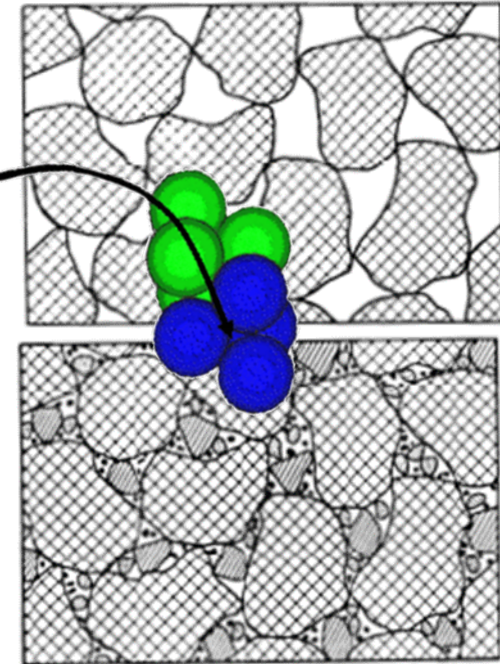
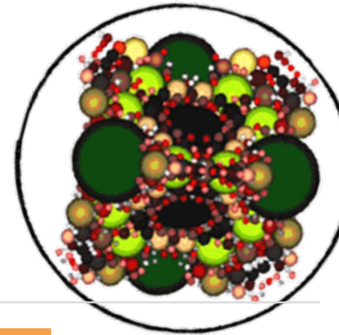
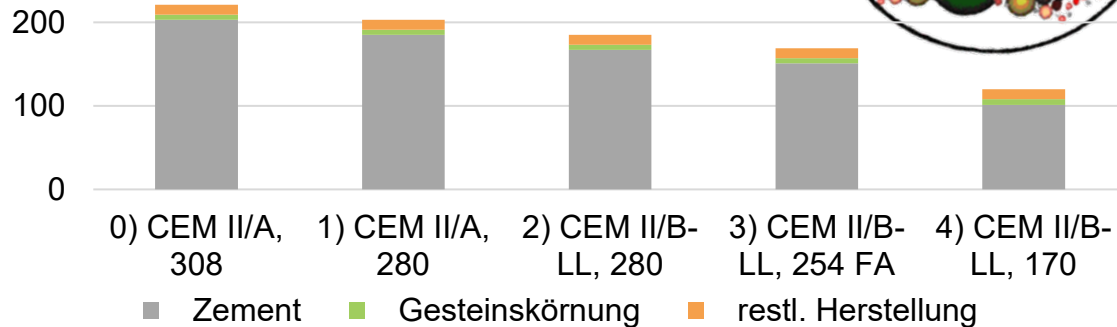
- Zemente nur ca. 12% der Masse
- Zemente liefern > 95% des CO<sub>2</sub>
  
- Nachhaltige Ansätze:
  - Erhöhte Packungsdichte -> weniger Zement
  - Nachhaltigere alternative Bindemittel

### NORMALER BETON



## CO<sub>2</sub>-Reduzierte Betone

- Mit erhöhter Packungsdichte den Hohlraumgehalt reduzieren
  - Bis zu 40 % Zementersparnis
- CO<sub>2</sub>-eq je m<sup>3</sup> Beton





## CO<sub>2</sub>-Reduzierte Betone

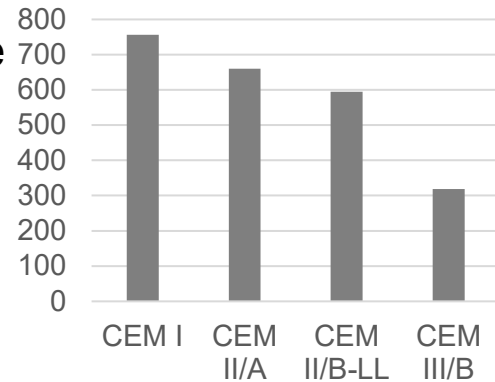
### – Nachhaltige Zemente

- Zemente mit weniger Klinkergehalt, Komposit-Zemente
- Zementanteil reduzieren und mit Zusatzstoffen

### – Eigenschaften CO<sub>2</sub>-reduzierter Betone

- Tendenziell weniger stabil in der Verarbeitbarkeit
- Für unbewehrte Betone, da tendenziell geringere Dauerhaftigkeit  
(Chloridwiderstand, Karbonatisierungswiderstand)

CO<sub>2</sub>-Emissionen je Tonne Zement

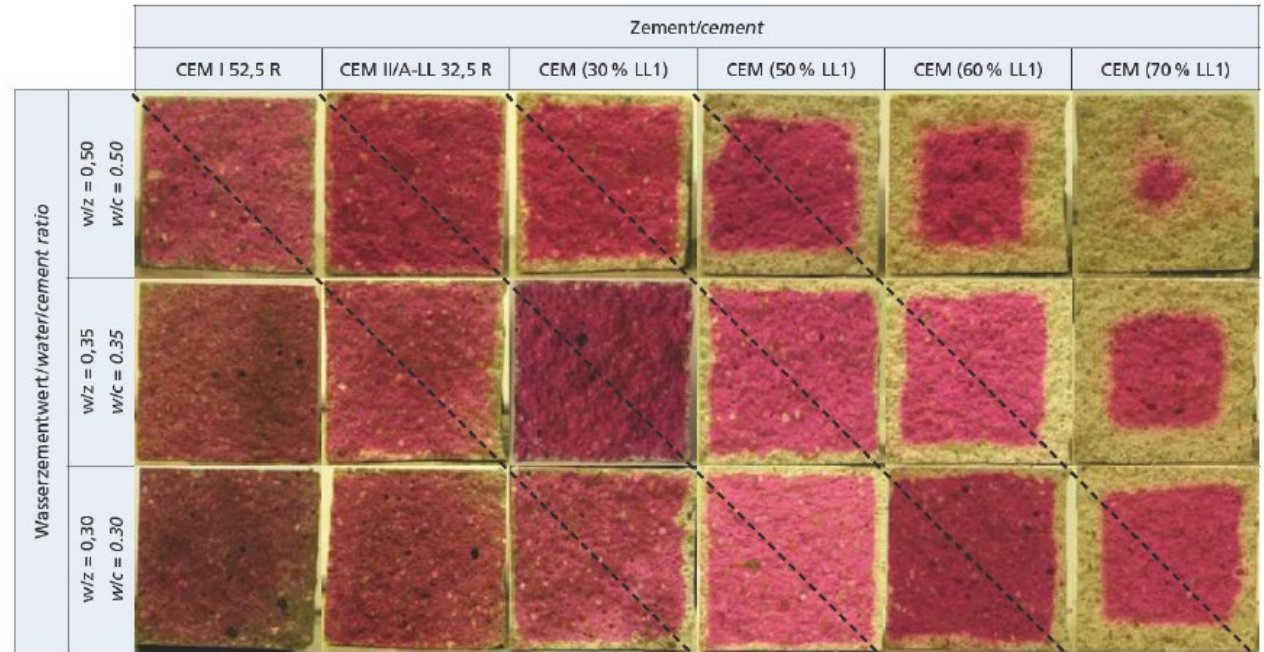


Nach KBOB, aus Betonrechner treeze

# CO<sub>2</sub>-Reduzierte Betone - Karbonatisierungswiderstand

Klinkerarme

Betone

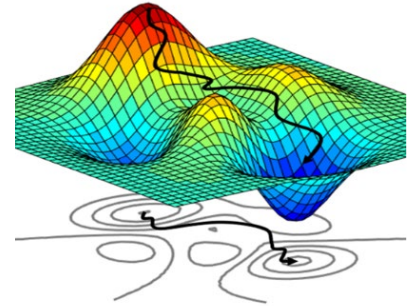


[Ch. Müller et al, 2014]

----- äquivalente Carbonatisierungstiefen

## CO<sub>2</sub>-Reduzierte Betone

- Bessere Rezepturoptimierung mit künstlicher Intelligenz
  - Schnellere Rezepturoptimierung und Anpassung
  - Steuerung von Druckfestigkeit und Konsistenz
- Anwendung im Tunnelbau:
  - für Ortbeton und Fertigteile oder unbewehrte Betone anwendbar
  - Dauerhaftigkeitsanforderungen beachten



## Beton aus rezykliertem Betongranulat

- Eigenschaften und Dauerhaftigkeit
  - Geringere Kornfestigkeit, erhöhte Wasseraufnahme von Betongranulat
    - reduzierter E-Modul des Betons, erhöhtes Schwinden und Kriechen
    - Schlechtere Einstellung der Konsistenz
- Reduzierte Dauerhaftigkeit
  - Chloridwiderstand, Frostwiderstand, AAR-Widerstand -> Tests erforderlich
- CO<sub>2</sub>-Emissionen von RC-Beton sind nicht geringer
  - Tendenziell mehr Zementleim und damit mehr Zement notwendig



## Beton aus rezykliertem Betongranulat – CO<sub>2</sub>-Emissionen

- CO<sub>2</sub>-Uptake durch Karbonatisierung des Betongranulats (BG)
- Uptake hat chemische Grenzen, CaO (Klinker) + CO<sub>2</sub> = CaCO<sub>3</sub>

Zement	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	Zementsteinvolumen [l/m <sup>3</sup> ]	CaO im Klinker [kg/m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2,abs</sub> BG2 [kg/t]	CO <sub>2,abs</sub> BG3 [kg/t]
CEM I	300	0.55	276	185	5.6	11.3
CEM I	290	0.64	288	179	5.1 (-0.5)	10.4 (-0.9)
CEM I	310	0.49	266	191	6.0 (+0.4)	12.1 (+0.8)
CEM II/A-LL	300	0.55	277	160	4.8 (-0.8)	9.7 (-1.6)
CEM I*	300	0.55	276	185	7.0 (+1.4)	14.1 (+2.8)

\* gerechnet mit einer CO<sub>2</sub> Absorption im karbonatisierten Zementstein von 75 anstatt 60%

- Werte der CO<sub>2</sub>-Absorption bezogen auf die Gesamtemission der Betongranulate [Leemann; Karbonatisierungsgrad Betongranulat; Cemsuisse, 2021]

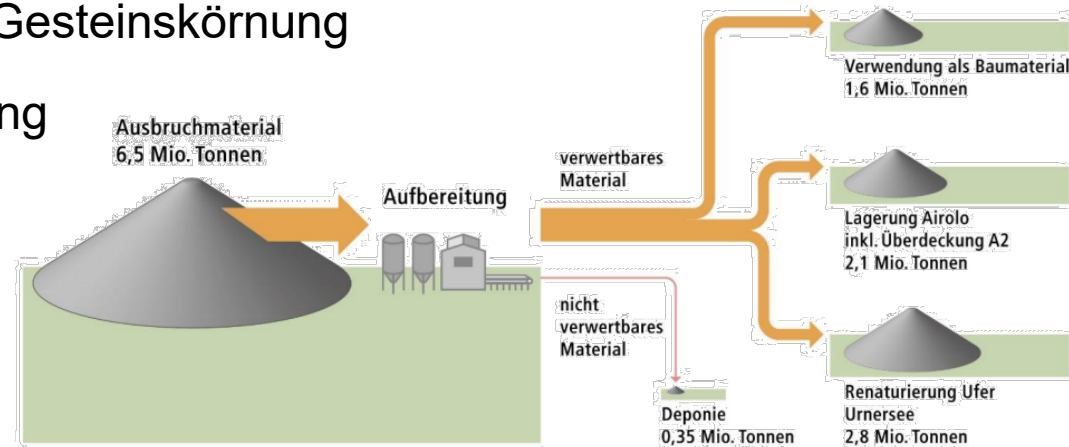
## Beton aus rezykliertem Betongranulat - Materialströme

- Lokale Verfügbarkeit prüfen, Betongranulate sind nicht in allen Regionen in grossen Massen verfügbar; lange Transportwege lohnen sich nicht
- Fazit für den Tunnelbau: RC-Beton ist nachhaltig, wenn
  - Betongranulat lokal verfügbar ist, z.B. Abbruch temporärer Konstruktionen, für Fertigteile
  - die Dauerhaftigkeit nicht negativ beeinflusst wird
  - das Betongranulat vorher karbonatisiert wurde (5 – 14 kg CO<sub>2</sub>/to BG)



## Beton mit Ausbruchmaterial

- Verwendung im Beton und Spritzbeton vor Ort möglich
  - Aufbereitung, Waschanlage für Gestein
  - Nur feste und nicht reaktive Gesteinskörnung
  - Kornabstufung / Fraktionierung



Quelle: ASTRA, Die zweite Gotthard-Strassenröhre, Infodossier



## Möglichkeiten zur Reduktion der Betonkubatur

- Betonkubatur im Tunnelquerschnitt reduzieren, Wahl Trasse
- Möglichst exakter Ausbruch
- Verfüllungen / Hinterfüllungen aus
  - Schüttungen
  - alternativen Füllstoffen (z.B. Flüssigboden aus Ausbruchmaterial prüfen)
  - zementreduzierte Betone

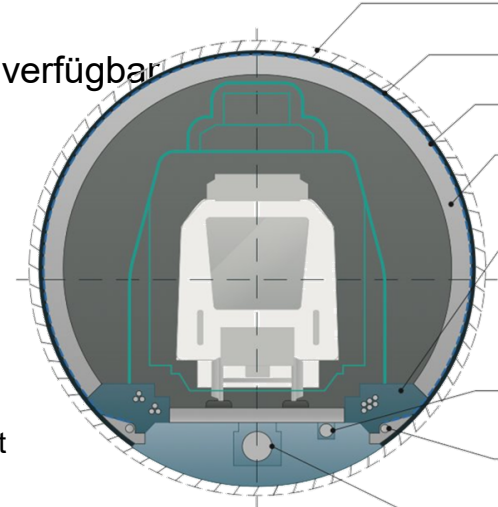


## Fazit

- Entscheidende Faktoren im Tunnelbau sind
  - Konzeptionelle Entscheide zu Trasse und Kubatur
  - Verwendung von Ausbruchmaterial und lokalem Material
  - Lebensdauer und Dauerhaftigkeit
  - Materialwirtschaft und Logistik

## Fazit: Nachhaltige Betone im Tunnelbau

- Spritzbeton -> Spezialbeton, Feinmaterial aus Ausbruch
  - Ausbruchsicherung
  - Verkleidung
- Ortbeton -> Ausbruchmaterial, ggf. Zement reduziert, Betongranulat wenig verfügbar
  - Verkleidung
  - Ausbau
  - Verfüllung, Hinterfüllung -> Alternatives Füllmaterial
- Fertigteile
  - Tübbinge
  - Rinnen, Bankette, ect
  - Weitre untergeordnete Betonprodukte-> ggf. Zement reduzieren und ggf. mit Betongranulat



Quelle: BauPraxis – Der Untertagbau, Band 2; Heinz Ehrbar, Olivier Böckli, Christian Ammon

### ➤ Wichtig ist die Dauerhaftigkeit!

STC 2024; Zukunftsfähige Tiefbaulösungen, Prof. Simone Stürwald



**Simone Stürwald**

Professorin für nachhaltige Konstruktion  
OST – Ostschweizer Fachhochschule

[simone.stuerwald@ost.ch](mailto:simone.stuerwald@ost.ch)