

# Nachhaltigkeitsbewertung von Großbauprojekten der Deutschen Bahn im Bereich des Tunnelbaus



Fachtagung Umweltschutz in Projekten - Fulda, 17. Januar 2024

Prof. Dr-Ing. Danièle Waldmann-Diederich

Dr.-Ing. Christian Herget



## Das Bauwesen verursacht in Deutschland

- ... ca. 35% der CO<sub>2,eq.</sub>-Emissionen
- ... ca. 50% des Abfallaufkommens
- ... ca. 40% des Endenergieverbrauchs
- ... und benötigt dabei ca. 50% der natürlichen Ressourcen



1. Grundlagen der Nachhaltigkeitsbilanzierung
2. Vorstellung von Beispielprojekten
3. Optimierungsvorschläge zur ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit
4. Fazit

# 1. Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen

## Erstellung einer Ökobilanz (Sachbilanz)

Nach DIN EN ISO 14040:2021 und DIN EN ISO 14044:2021

Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen  
Sachbilanz  
Wirkungsabschätzung  
Auswertung

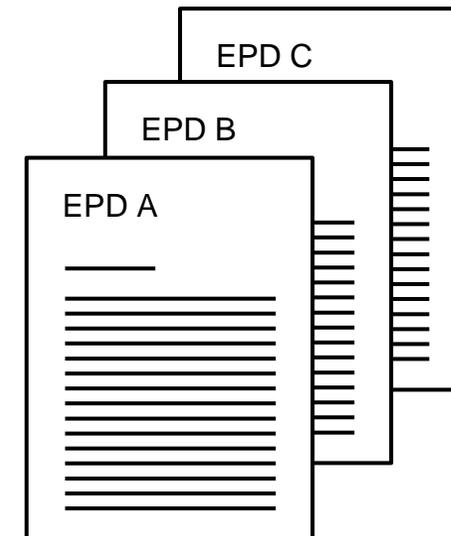
z.B. Tunnel  
z.B. Mengenermittlung  
z.B. EPD  
z.B. Ökobilanzierung

$$CO_2 - Emissionen = \sum_h f_h \cdot \chi_h + \sum_k q_k \cdot \varphi_k$$

dabei ist:

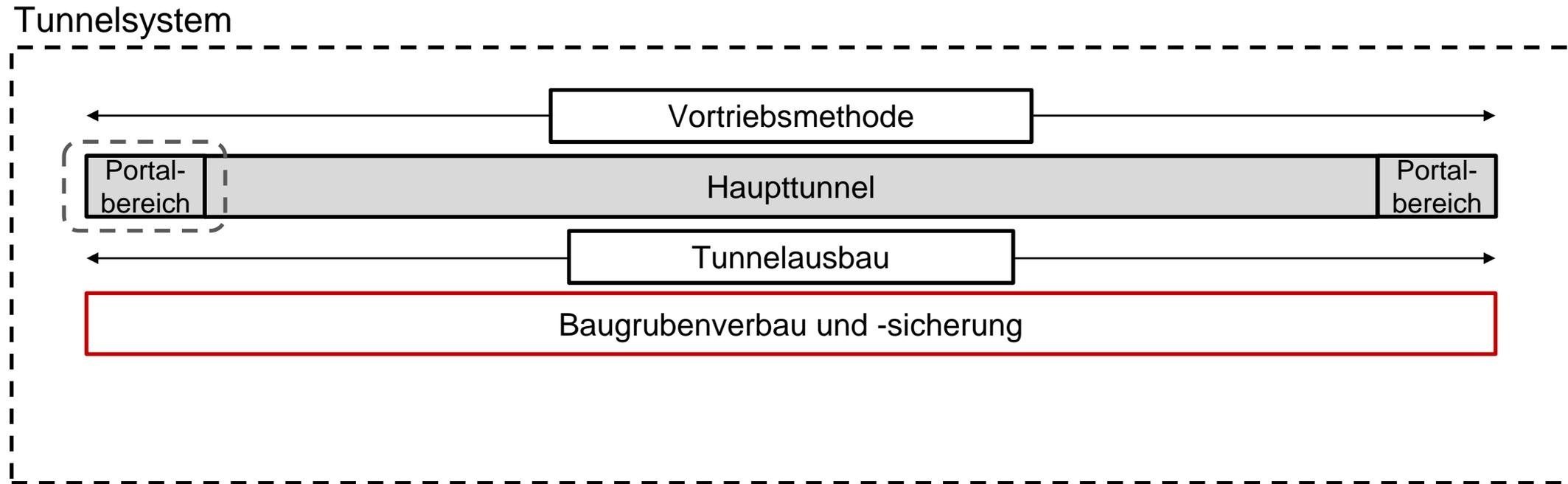
h	Energieträger
$f_h$	Energiebedarf nach Energieträgern h
$\chi_h$	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor von Energieträgern h
k	Art des Materials
$q_k$	Menge des Materials k
$\varphi_k$	CO <sub>2</sub> -Emissionsfaktor des Materials k

Emissionsfaktoren aus Umweltproduktdeklarationen (EPD)



# 1. Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen

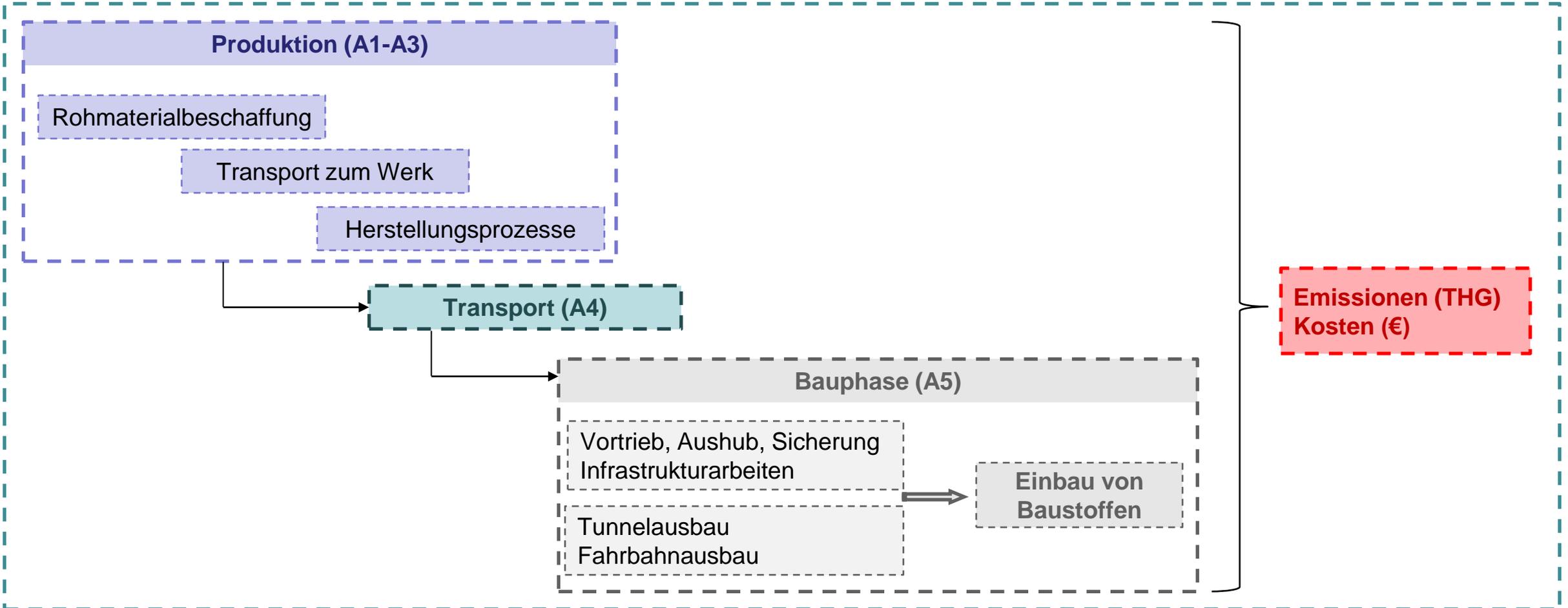
## Systemgrenzen für Tunnelbauwerke



**Ausschließliche Betrachtung von massiven Bauteilen und damit verbundener Prozesse**

# 1. Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen

## Systemgrenzen für die Bilanzierungsphasen nach DIN EN 15804



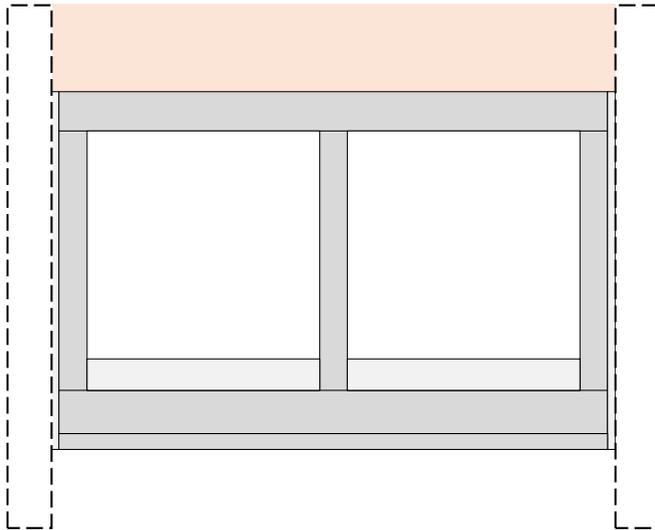
**Nicht berücksichtigt: Lohnkosten, Nutzungsphase (B), Lebensende (C), Wiederverwendung/Recycling (D)**

1. Grundlagen der Nachhaltigkeitsbilanzierung
- 2. Vorstellung von Beispielprojekten**
3. Optimierungsvorschläge zur ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit
4. Fazit

## 2. Vorstellung der Beispielprojekte

### Unterschiedliche Tunnelbauweisen und Tunnellängen

Offene Bauweise mit Bohrpfehlwand

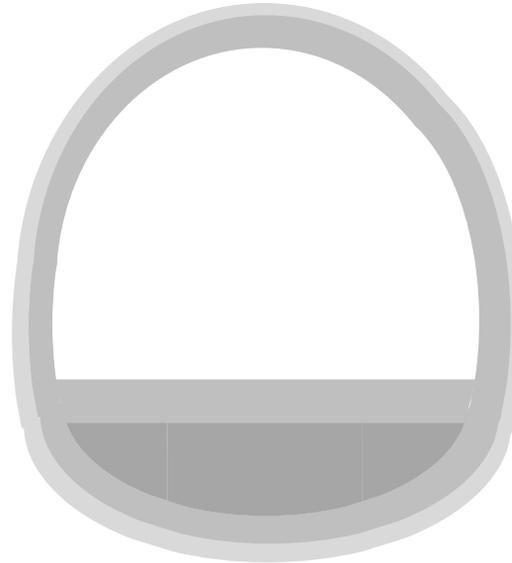


Tunnellänge: 745 m (zweigleisig)

**Massive Bauteile:**

Baugrubenverbau  
Sohle  
Wände  
Decke  
Feste Fahrbahn

Konventioneller Vortrieb mittels Sprengvortrieb

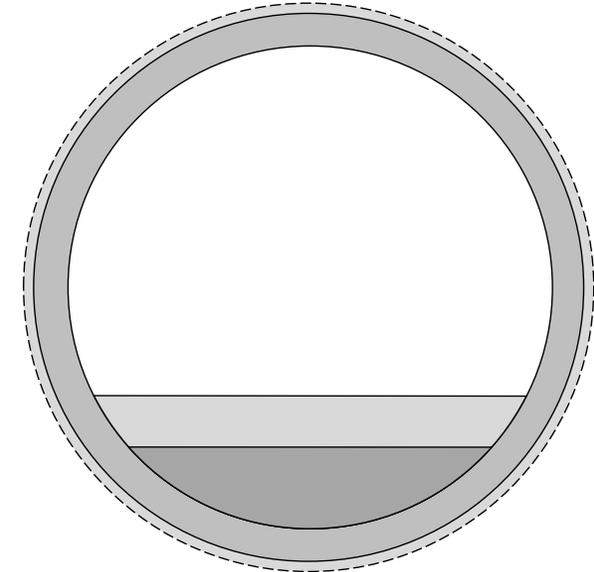


Tunnellänge: 2 x 2.614m (eingleisig)

**Massive Bauteile:**

Spritzbetonsicherung (Außenschale)  
Ortbetonschale (Innenschale)  
Sohlausbau  
Feste Fahrbahn

Maschineller Vortrieb



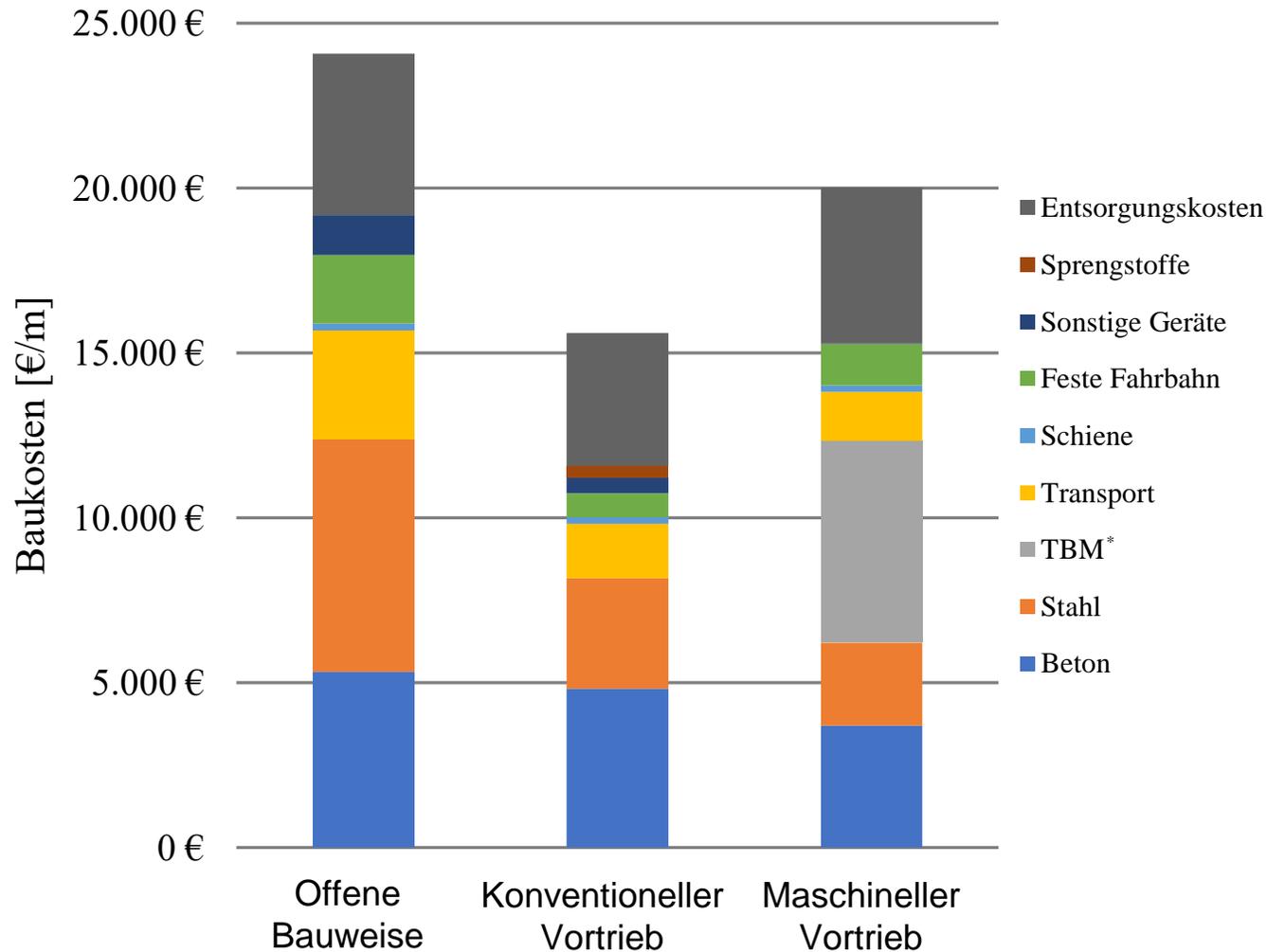
Tunnellänge: 1 x 4.242 m (eingleisig)

**Massive Bauteile:**

Spritzbetonsicherung (Portalbereich)  
Tübbinge (Tunnelschale)  
Ringspaltverfüllung  
Sohlausbau  
Feste Fahrbahn

## 2. Vorstellung der Beispielprojekte

### Bilanzierung der Beispieltunnel - Baukosten



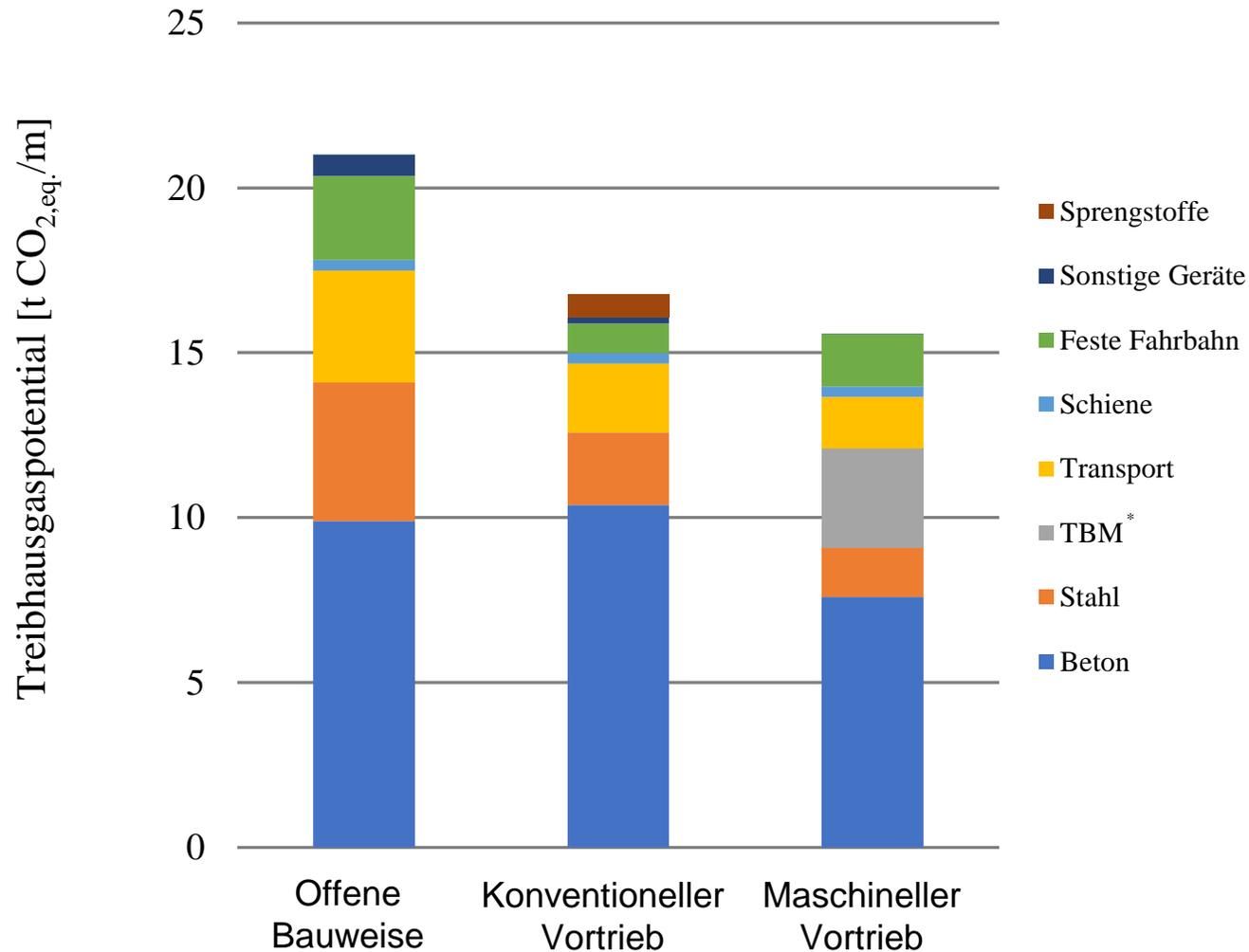
### Größte Stellschrauben:

- Betonvolumen (10-20 %)
- Beton- und Baustahl (10-20 %)
- Tunnelvortrieb (5-30 %)
- Entsorgungskosten (15-20 %)

\* Annahme: Neuanschaffung einer TBM nur für dieses Bauvorhaben  
Baukosten und Treibhauspotential aus eigenen Berechnungen

## 2. Vorstellung der Beispielprojekte

### Bilanzierung der Beispieltunnel - Treibhausgaspotential



#### Größte Stellschrauben:

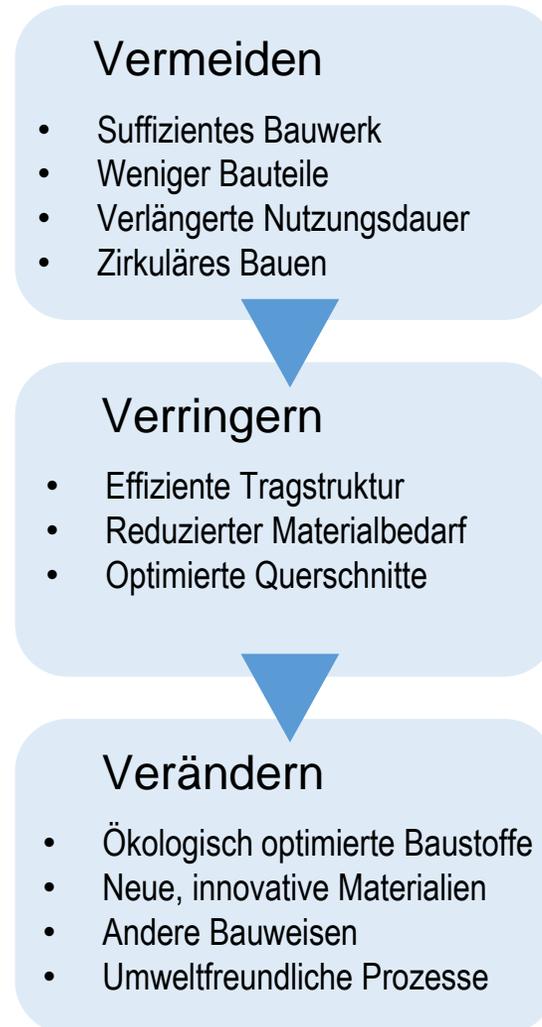
- Betonvolumen (30-50 %)
- Beton- und Baustahl (10-20 %)
- Tunnelvortrieb (5-15 %)
- Transporte (5-10 %)

\* Annahme: Neuanschaffung einer TBM nur für dieses Bauvorhaben  
Baukosten und Treibhauspotential aus eigenen Berechnungen

1. Grundlagen der Nachhaltigkeitsbilanzierung
2. Vorstellung von Beispielprojekten
- 3. Optimierungsvorschläge zur ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit**
4. Fazit

# 3. Ansätze zum nachhaltigen Bauen

## Allgemeines Vorgehen



# 3.1 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Vermeiden

## Verlängerung der Lebensdauer

### Vermeiden

- Suffizientes Bauwerk
- Weniger Bauteile
- Verlängerte Nutzungsdauer
- Zirkuläres Bauen

### Verringern

- Effiziente Tragstruktur
- Reduzierter Materialbedarf
- Optimierte Querschnitte

### Verändern

- Ökologisch optimierte Baustoffe
- Neue, innovative Materialien
- Andere Bauweisen
- Umweltfreundliche Prozesse



## Schadensfall: Bewehrungskorrosion, Betonabplatzung, Bauteilversagen

→ Sanierung / Neubau

### Entgegenwirken

#### Beton:

Höherer Bauteilwiderstand gegen äußere Einflüsse  
Beton mit höherer Dauerhaftigkeit

#### Bewehrung:

Faserbewehrung  
Nichtrostende Bewehrung



Schöck GmbH, Solidian, Thyssen-Krupp



Institut Feuerverzinken GmbH

# 3.2 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Verringern

## Effiziente Betonbauweisen in der offenen Bauweise

**Vermeiden**

- Suffizientes Bauwerk
- Weniger Bauteile
- Verlängerte Nutzungsdauer
- Zirkuläres Bauen

**Verringern**

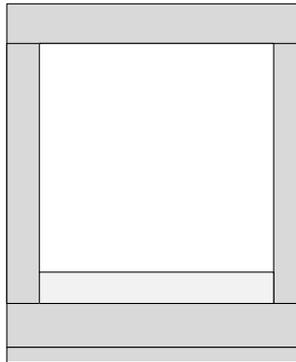
- Effiziente Tragstruktur
- Reduzierter Materialbedarf
- Optimierte Querschnitte

**Verändern**

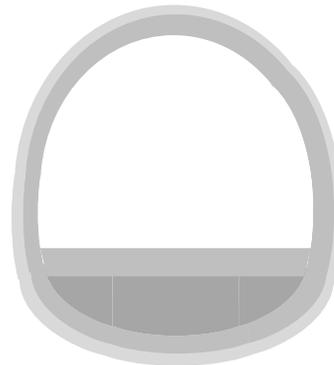
- Ökologisch optimierte Baustoffe
- Neue, innovative Materialien
- Andere Bauweisen
- Umweltfreundliche Prozesse

### Veränderung von Betonquerschnitten

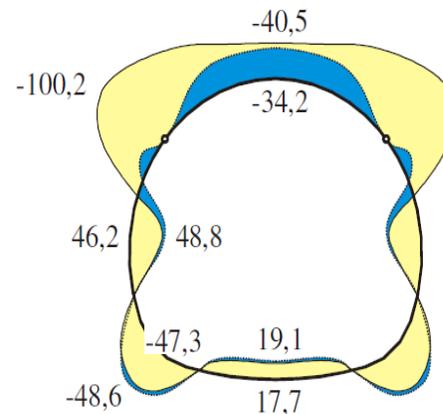
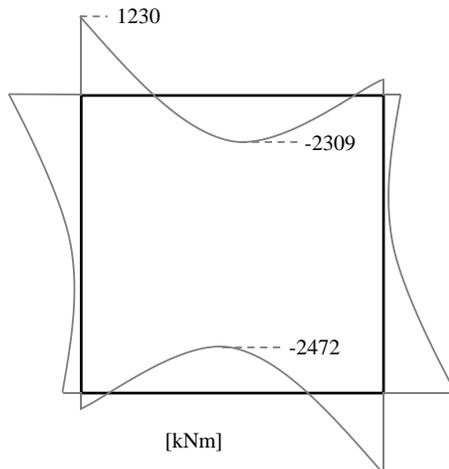
#### Offene Bauweise



#### Bergmännische Bauweise



Momentenverlauf



**Bogentragwirkung ausnutzen → Bewehrungsgehalte reduzieren**

Strauss, A. et al. (2023) Verlängerung der technischen Nutzungsdauer von Infrastrukturbauwerken auf Basis semiprobabilistischer Betrachtungen

### Vermeidung von statisch unwirksamem Beton



Quelle: <https://www.heinze-gruppe.de/de/tochterunternehmen/heinze-cobix-deutschland-gmbh/>

**Bis zu - 40 Vol.-%**

# 3.2 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Verringern

## Effiziente Betonbauweisen im konventionellen bergmännischen Vortrieb

**Vermeiden**

- Suffizientes Bauwerk
- Weniger Bauteile
- Verlängerte Nutzungsdauer
- Zirkuläres Bauen

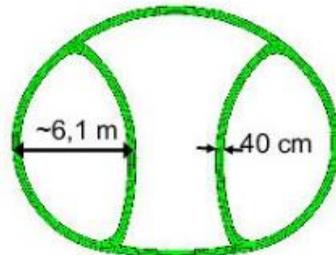
**Verringern**

- Effiziente Tragstruktur
- Reduzierter Materialbedarf
- Optimierte Querschnitte

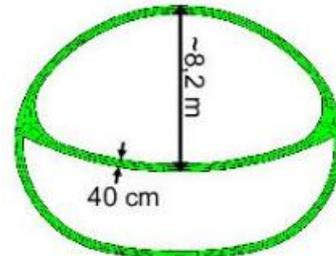
**Verändern**

- Ökologisch optimierte Baustoffe
- Neue, innovative Materialien
- Andere Bauweisen
- Umweltfreundliche Prozesse

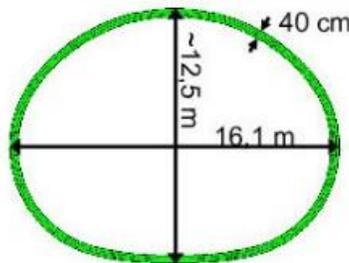
### Bereiche des Tunnelvortriebs



$$A_{\text{Spritzbeton/shotcrete}} = (17,7 + 2 \cdot 4,66) \text{ m}^2/\text{running m}$$



$$A_{\text{Spritzbeton/shotcrete}} = (17,7 + 8,3) \text{ m}^2/\text{running m}$$



$$A_{\text{Spritzbeton/shotcrete}} = 17,7 \text{ m}^2/\text{running m}$$

Witke et al. (2022): Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO2-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau

→ Geringerer Spritzbetonbedarf

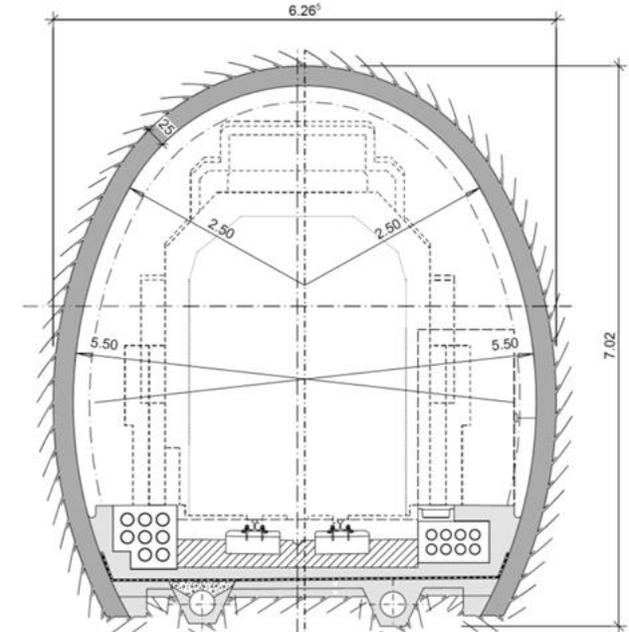
Spritzbetonbedarf:

153 %

147 %

100 %

### Einschalige Spritzbetonbauweise



<https://www.rhb.ch/de/unternehmen/projekte-dossiers/neubau-albulatunnel/der-neubau/das-projekt>

Tunnel Albula II (CH)

→ Entfall der Außenschale und Schalungsarbeiten

→ Reduzierter Bewehrungsgehalt

→ Geringerer Ausbruchquerschnitt

## 3.2 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Verringern

### Effiziente Betonbauweisen im maschinellen Vortrieb

#### Vermeiden

- Suffizientes Bauwerk
- Weniger Bauteile
- Verlängerte Nutzungsdauer
- Zirkuläres Bauen

#### Verringern

- Effiziente Tragstruktur
- Reduzierter Materialbedarf
- Optimierte Querschnitte

#### Verändern

- Ökologisch optimierte Baustoffe
- Neue, innovative Materialien
- Andere Bauweisen
- Umweltfreundliche Prozesse

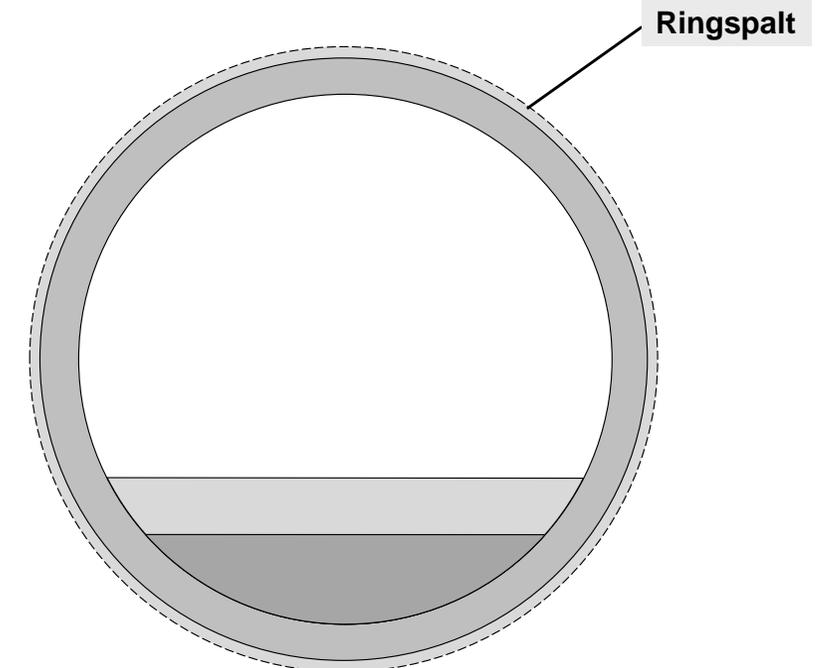
### Stahlfaserbewehrte Tübbings

Homogene Verteilung der Bewehrung  
 Weniger Tübbingschäden  
 Rissbreitenbegrenzung auch in der  
 Betonrandzone  
 Entfall der Bewehrungsarbeiten  
 Dünnere Tunnelwände möglich



Quelle: <https://www.baunetzwissen.de/beton/fachwissen/betonarten/faserbeton-150986/gallery-1/1>

### Ringspaltverfüllmaterialien



Ringspaltverfüllmaterial	Einkomponentenmörtel	Zweikomponentenmörtel	bedingt aktiver Mörtel	Inaktiver Mörtel	Perlkies
Treibhausgaspotential [kg CO <sub>2,eq</sub> /m <sup>3</sup> ]	244,9	539,1	210,5	182,5	165,7 97,7 23

# 3.3 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Verändern

## Möglichkeiten in der Betontechnologie

### Vermeiden

- Suffizientes Bauwerk
- Weniger Bauteile
- Verlängerte Nutzungsdauer
- Zirkuläres Bauen

### Verringern

- Effiziente Tragstruktur
- Reduzierter Materialbedarf
- Optimierte Querschnitte

### Verändern

- Ökologisch optimierte Baustoffe
- Neue, innovative Materialien
- Andere Bauweisen
- Umweltfreundliche Prozesse

### Optimierung der Betonzusammensetzung

→ Minimierung des Zementgehalt

### Verwendung von Kompositzementen

→ Reduktion des Portlandzementklinkergehalts

### Nutzung neuartiger zementfreier Bindemittelsysteme

→ Bei speziellen Anwendungen sinnvoll

Innovationen und neue Materialien bei gleicher Leistungsfähigkeit zulassen

Leistungsfähigkeit (Widerstandsseite) statt für die Zusammensetzung (Innovationsseite) vorgeben

→ Bautechnischen Zulassung (DIBt)

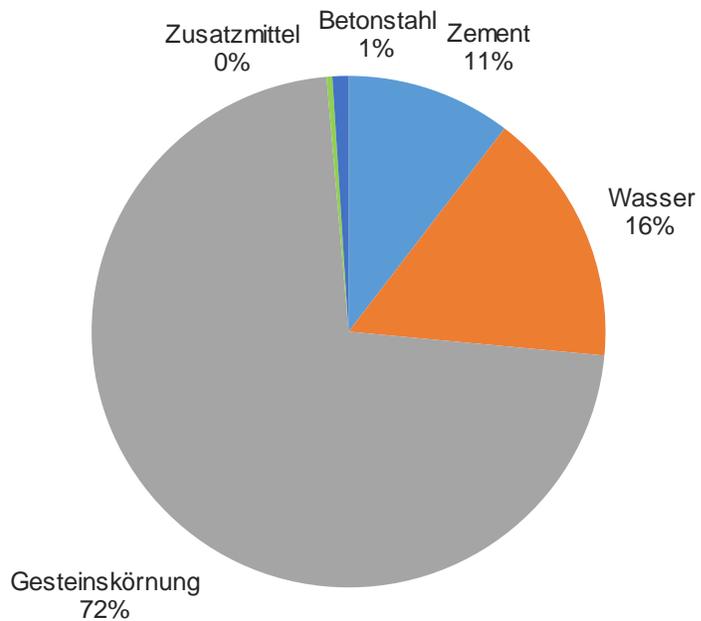
→ Unternehmensinterne Genehmigung (UiG)

# 3.3 Ansätze zum nachhaltigen Bauen - Verändern

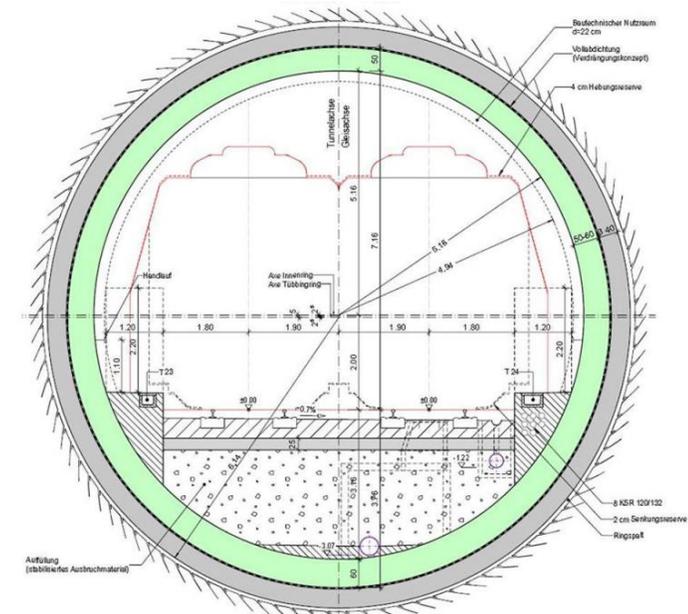
## Wiederverwendung von Tunnelausbruch

- Vermeiden**
  - Suffizientes Bauwerk
  - Weniger Bauteile
  - Verlängerte Nutzungsdauer
  - Zirkuläres Bauen
- Verringern**
  - Effiziente Tragstruktur
  - Reduzierter Materialbedarf
  - Optimierte Querschnitte
- Verändern**
  - Ökologisch optimierte Baustoffe
  - Neue, innovative Materialien
  - Andere Bauweisen
  - Umweltfreundliche Prozesse

### Betonherstellung



### Schotterherstellung (Sohlauffüllung)



[https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel\\_Neuer\\_Boezberg-Eisenbahntunnel\\_Baubeginn\\_im\\_Fruehjahr\\_2016-2432801.html](https://www.tunnel-online.info/de/artikel/tunnel_Neuer_Boezberg-Eisenbahntunnel_Baubeginn_im_Fruehjahr_2016-2432801.html)

Bözbergtunnel (CH)

**Das ist grün.**  
 Aus dem Berg.  
 In das Werk.  
**Erdpool.**  
 Nr. 163

- Reduktion von Deponieraum und –kosten sowie Neumaterial
- Verringerung von Transportkosten und –emissionen und Verkehrsemissionen
- Zur Verfügung stellen für andere Industriezweige

### 3.3 Ansätze zum nachhaltigen Bauen

#### Zusammenfassung

	Referenz-tunnel	Einsparung			
		Kosten €/m	THG t CO <sub>2,eq.</sub> /m	Kosten %	THG %
	Offene Bauweise	24.078	21,01		
	Konventioneller Vortrieb	15.599	16,76		
	Maschineller Vortrieb	20.022	15,58		
Optimierung	Tunnelbeispiel	€/m	t CO <sub>2,eq.</sub> /m	%	%
Betonhohlkörper	Offene Bauweise	22.065	16,04	8%	24%
Querschnittsform	Offene Bauweise	17.181	14,22	29%	32%
Ökobeton	Offene Bauweise	24.078	13,90	0%	34%
Lebensdauererlängerung <sup>1</sup>	Maschineller Vortrieb	20.776	16,63	-4%	-7%
Ausbruchmaterial für Beton	Maschineller Vortrieb	18.647	15,47	7%	1%
Stahlfaserbetontübbings	Maschineller Vortrieb	18.643	14,16	7%	9%
Ringspaltverfüllung	Maschineller Vortrieb	20.022	14,18	0%	9%
Ausbruchmaterial für Sohle	Maschineller Vortrieb	17.705	13,17	12%	15%
Ökostrom	Maschineller Vortrieb	20.022	13,04	0%	16%
Ökobeton	Maschineller Vortrieb	20.022	10,27	0%	34%
Vollausbruch	Konventioneller Vortrieb	14.939	15,50	4%	8%
Spritzbetoninnenschale	Konventioneller Vortrieb	13.125	13,95	16%	17%

<sup>1</sup> Einsparpotential bei einer Betrachtung über eine Nutzungsdauer von 200 Jahren: 47%

# 3.4 Bepreisung von Treibhausgasemissionen

## Monetäre Bewertung von Treibhausgasemissionen

Was sind uns Emissionen wert?

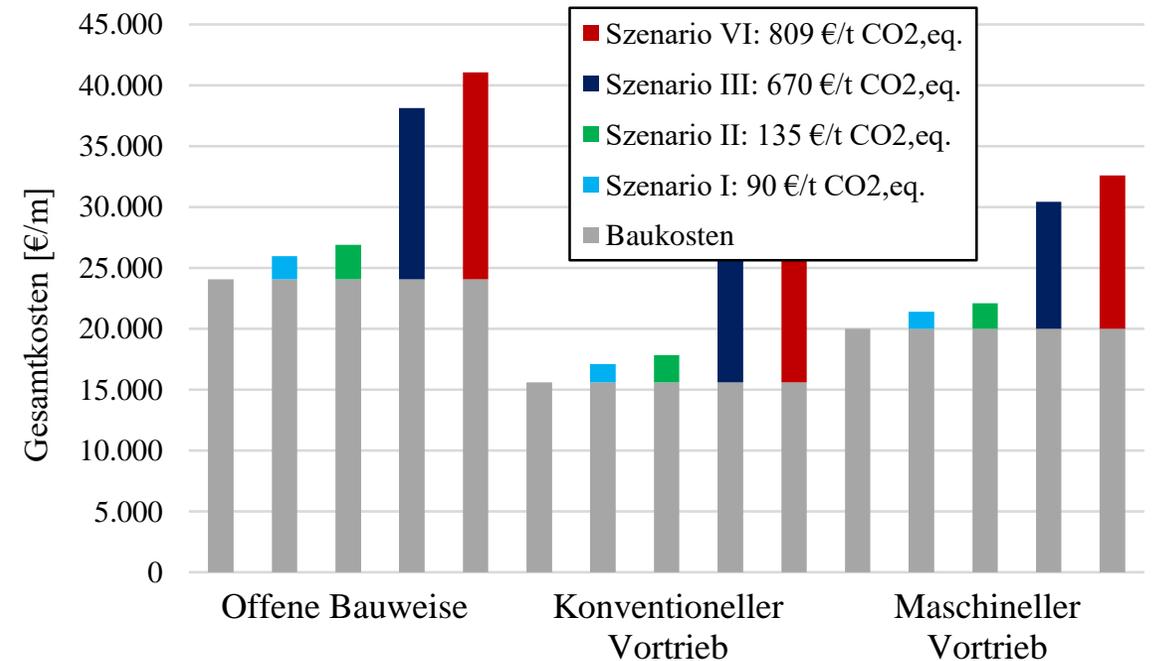
... am Beispiel CO<sub>2</sub>

Szenario I: Aktueller Börsenpreis:  
90 €/t CO<sub>2,eq.</sub>

Szenario II: Bedarfsumsetzungsvereinbarung (BUV):  
135 €/t CO<sub>2,eq.</sub>

Szenario III: Gemeindeverkehrsfinanzierungsgesetzes (GVFG):  
670 €/t CO<sub>2,eq.</sub>

Szenario IV: Studie des Umweltbundesamtes:  
807 €/t CO<sub>2,eq.</sub>



<https://www.boerse.de/rohstoffe/Co2-Emissionsrechtepreis/XC000A0C4KJ2>

<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/gesellschaftliche-kosten-von-umweltbelastungen#gesamtwirtschaftliche-bedeutung-der-umweltkosten>

1. Grundlagen der Nachhaltigkeitsbilanzierung
2. Vorstellung von Beispielprojekten
3. Optimierungsvorschläge zur ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit
4. Fazit

### Zusammenfassung

Beton- und Stahlverbrauch haben größten Anteil an Treibhausgasemissionen und Kosten

Bilanzierung unterschiedlicher Arten des Vortriebs

Konflikte mit aktuellen Regelwerken vorhanden

Hohe Einsparpotentiale identifiziert

### Ausblick

Vorzeitige Nutzung des Tunnels durch schnelle Bauweisen mitbilanzieren

Ökologische Bilanzierung mit in Ausschreibung fließen lassen

Betrieb des Tunnels mitbilanzieren (Ganzheitliche Bilanzierung)

Abschätzung der zusätzlichen Nutzungsdauer und Wirkungsdauer von Sanierungsmaßnahmen

# Nachhaltigkeitsbewertung von Großbauprojekten der Deutschen Bahn im Bereich des Tunnelbaus

Vielen Dank

17. Januar 2024



**Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich**

TU Darmstadt – Institut für Massivbau

✉ [waldmann@massivbau.tu-darmstadt.de](mailto:waldmann@massivbau.tu-darmstadt.de)

☎ +49 6151 16 21400



**Dr.-Ing. Christian Herget**

Erdpool – DB BahnbauGruppe GmbH

✉ [christian.herget@deutschebahn.com](mailto:christian.herget@deutschebahn.com)

☎ +49 1523 3319373