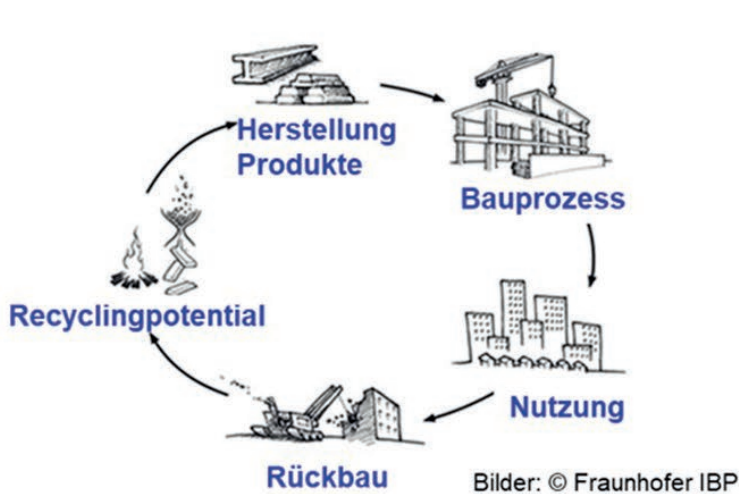
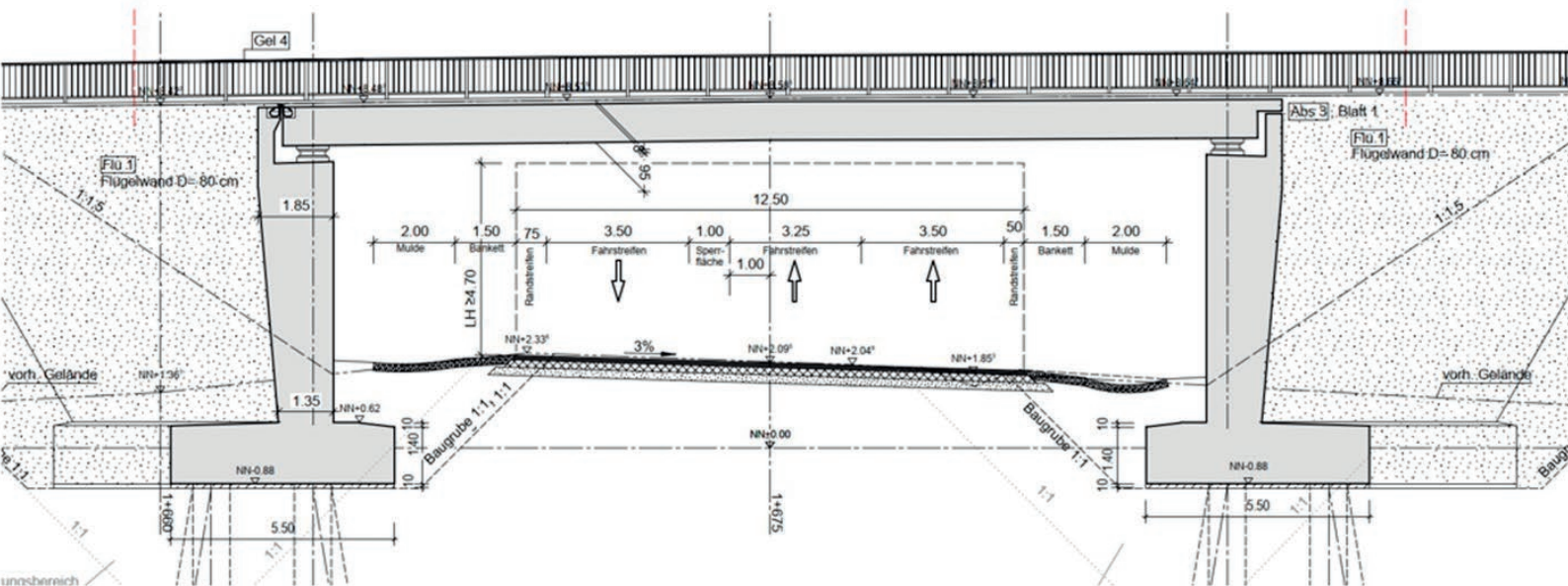
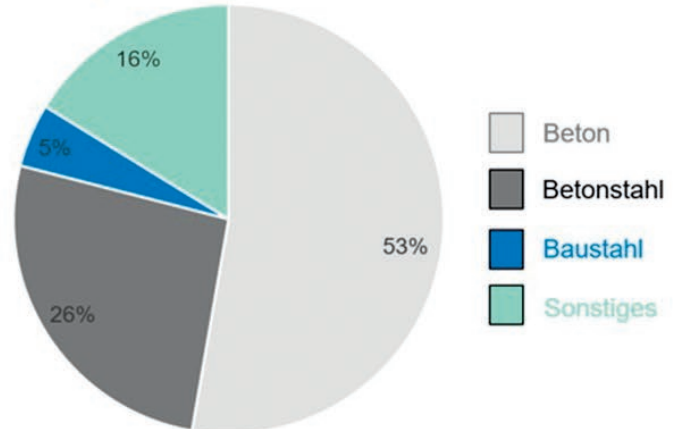




**Stahlbeton /  
Spannbeton Brücke**



## CO<sub>2</sub>-Berechnungen von Brücken mit Bauwerkslängen bis 40m

Stephan Görtz, Thi Kim Dung Pham

# CO<sub>2</sub>-Berechnungen von Brücken mit Bauwerkslängen bis 40 m

Im Rahmen eines von der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) geförderten Forschungsvorhabens wurden CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen an insgesamt 34 realen und mehreren Hundert generierten Brückenbauwerken durchgeführt. Zielsetzung war es, Erfahrungswerte zu erarbeiten, bei welchen Brückenkonstruktionen wie viel CO<sub>2</sub> emittiert wird, und Vorschläge auszuarbeiten, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren lassen.

**Stichworte** Brückenbauwerke; CO<sub>2</sub>-Bilanzierung

## CO<sub>2</sub> balancing of bridges with structure lengths up to 40 m

As part of a research project, funded by the Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH), CO<sub>2</sub> balancing was carried out on a total of 34 real and several hundred generated bridge constructions. The objectives were to develop empirical data, how much CO<sub>2</sub> bridge constructions emit and to develop suggestions on how CO<sub>2</sub> emissions can be reduced.

**Keywords** bridge construction; CO<sub>2</sub> balancing

## 1 Hintergrund

Durch Bauprozesse wird ein Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen verbraucht und hierüber auch immense Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortet. Nach aktuellen Erkenntnissen (Sobek [1], Weidner [2]) ist davon auszugehen, dass über 50 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Herstellung und Nutzung von Gebäuden bzw. Bauwerken zurückzuführen sind und hiervon ca. 1/3 Infrastrukturmaßnahmen zuzurechnen sind [1]. Bei Ingenieurbauten im Zuge von Infrastrukturmaßnahmen sind zuallererst Brückenbauwerke zu nennen.

Trotz dieses Umstands fehlen in der Praxis i. d. R. Kenntnisse oder auch Berechnungsmethoden, um festzustellen, wie viel CO<sub>2</sub> für die Erstellung und die Unterhaltung von Brückenbauwerken erforderlich ist. Auch in der Fachliteratur sind hierzu nur wenige Untersuchungen dokumentiert [3–7]. Ohne die notwendigen Fachkenntnisse und Erfahrungswerte bestehen weder für Bauherrn und Betreiber noch für Planungsbüros Möglichkeiten, den CO<sub>2</sub>-Bedarf zu steuern oder zu reduzieren.

Im Rahmen eines durch die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (kurz EKSH) geförderten Forschungsvorhabens [8] wurden am Institut für Bauwesen der Fachhochschule Kiel CO<sub>2</sub>-Bilanzen für eine große Anzahl an Brückenbauwerken durchgeführt, anhand derer folgenden Ziele verfolgt wurden:

1. Generierung von Erfahrungswerten, welche Brückenkonstruktion wie viel CO<sub>2</sub> verbraucht,
2. Analyse der wesentlichen Einflussfaktoren der CO<sub>2</sub>-Emission,
3. Ausarbeitung von Vorschlägen, wie die CO<sub>2</sub>-Emission eines Brückenbauwerks reduziert werden kann.

Hierfür wurden CO<sub>2</sub>-Berechnungen an insgesamt 480 Brückenbauwerken durchgeführt. In Bezug auf Da-

ten, Planungsunterlagen sowie planerische Untersuchungen wurde das Projekt durch das Ingenieurbüro Mohn aus Melsdorf und den Landesbetrieb für Straßenbau und Verkehr in Schleswig-Holstein unterstützt. Ergänzend zu den 480 eigenen Berechnungen wurden entsprechende Untersuchungen an 34 realen Brückenbauwerken herangezogen.

## 2 Auswahl der Brückenbauwerke

Da bei den Untersuchungen grundsätzliche Tendenzen, frei von projektspezifischen Besonderheiten, abgeleitet werden sollten, wurden die meisten CO<sub>2</sub>-Berechnungen an generierten Fiktiventwürfen durchgeführt. Hierzu wurden in einem ersten Schritt verschiedene potenzielle Kreuzungssituationen generiert, aus denen sich unter Einhaltung der Anforderungen an die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL 2013) und Autobahnen (RAA 2008) die wesentlichen Grundparameter der Brückenbauwerke in Form von erforderlicher Brückenbreite  $B$ , lichter Weite  $LW$ /Abstand der Widerlager bzw. zu überwindender lichter Höhe  $H$  ergeben (Tab. 1). Da landestypische Kreuzungssituationen fokussiert werden sollten, ergaben sich letztlich Brückenlängen zwischen 4 m und 40 m.

Basierend auf den Grundparametern in Tab. 1 sind unter ingenieurmäßigen Gesichtspunkten Brückenlösungen konstruiert worden, wobei sowohl in Bezug auf die Materialwahl (Beton, Stahl, Holz, Verbund usw.) als auch den Querschnittstyp (Platte, Plattenbalken usw.) jeweils verschiedene Varianten möglich sind. Aus diesen Kreuzungssituationen ergaben sich insgesamt 480 sinnvolle Brückenlösungen.

Die für die 480 Fiktiventwürfe erforderlichen Massenansätze wurden gemeinsam mit dem Ingenieurbüro Mohn festgelegt und im Anschluss auszugsweise durch vier wei-

**Tab. 1** Mögliche Kreuzungssituationen bzw. Grundparameter ( $B/LW/H$ ) für Straßenbrücken bzw. Fuß-Radwegbrücken  
Possible intersection situations or basic parameters ( $B/LW/H$ ) for road bridges or pedestrian and bicycle bridges

| Kreuzungssituation Straßenbrücken                     |                                                  | Grundanforderungen |               |              |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Verkehrsweg oben                                      | Hindernis unten                                  | $B^*$<br>[m]       | $LW^*$<br>[m] | $H^*$<br>[m] |
| <b>Straße zweispurig<br/>RQ 11B<br/>n. RAL (2013)</b> | Bach                                             | 12,10              | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 12,10              | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 12,10              | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 12,10              | bis 35,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 12,10              | 40,0          | 4,80         |
| <b>Straße vierspurig<br/>RQ 21B<br/>n. RAL (2013)</b> | Bach                                             | 22,0               | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 22,0               | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 22,0               | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 22,0               | bis 35,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 22,0               | 40,0          | 4,80         |
| <b>Straße vierspurig<br/>RQ 31B<br/>n. RAA (2008)</b> | Bach                                             | 32,0               | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 32,0               | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 32,0               | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 32,0               | bis 35,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 32,0               | 40,0          | 4,80         |
| Kreuzungssituation Fuß- und Radwegbrücken             |                                                  | Grundanforderungen |               |              |
| Verkehrsweg oben                                      | Hindernis unten                                  | $B^*$<br>[m]       | $LW^*$<br>[m] | $H^*$<br>[m] |
| <b>Breite zw. Gel<br/>2,50 m</b>                      | Bach                                             | 3,0                | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 3,0                | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 3,0                | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 3,0                | bis 40,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 3,0                | 40,0          | 4,80         |
| <b>Breite zw. Gel<br/>4,0 m</b>                       | Bach                                             | 4,50               | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 4,50               | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 4,50               | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 4,50               | bis 40,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 4,50               | 40,0          | 4,80         |
| <b>Breite zw. Gel 6,0 m</b>                           | Bach                                             | 6,50               | bis 4,0       | 1,0          |
|                                                       | Wirtschaftsweg                                   | 6,50               | bis 6,0       | 4,80         |
|                                                       | Straße zweispurig nach RAL (2013)                | 6,50               | bis 20,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße vierspurig nach RAL (2013) und RAA (2008) | 6,50               | bis 40,0      | 4,80         |
|                                                       | Straße sechsspurig nach RAA (2008)               | 6,50               | 40,0          | 4,80         |

\* mit  $B$  Brückenbreite  
 \* mit  $LW$  lichte Weite zwischen den Widerlagern (bei Bachquerung: Festlegung bis 4,0m)  
 \* mit  $H$  lichte Höhe (bei Bachquerung: Festlegung von 1,0m als unterer Grenzwert)

tere Ingenieurbüros geprüft, ebenso wurden die zentralen Massenansätze mit 22 realen Brückenbauwerken, mit Erstellungsjahr zwischen 2000 und 2021, des Landesbetriebs für Straßenbau und Verkehr abgeglichen.

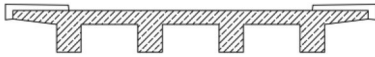
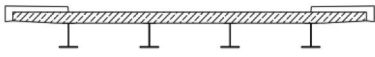
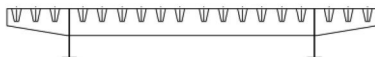
Die zentralen Eckdaten der Überbauten der untersuchten Brückenbauwerke können Tab. 2 entnommen werden, die vollständigen Massenangaben sowie die Massen der Unterbauten und der Ausstattung finden sich in [8].

### 3 Durchführung der CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen

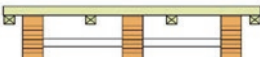
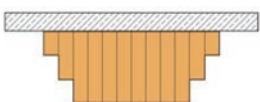
Nach der Generierung der Brückenbauwerke wurden im zweiten Schritt die CO<sub>2</sub>-Emissionen über die prognostizierte Lebensdauer bilanziert. Hierzu wurde, basierend auf DIN EN ISO 14040 bzw. DIN EN ISO 14044, das Treibhauspotenzial (GWP) als Sachbilanz einer Ökobilanz ermittelt, im Folgenden vereinfacht als CO<sub>2</sub>-Berechnung bezeichnet. Die Ergebnisse wurden gemäß dem Be-

**Tab. 2** Zentrale Parameter der betrachteten Brückenquerschnitte  
Main parameters of the cross sections of the evaluated bridge constructions

### Querschnitte Straßenbrücken

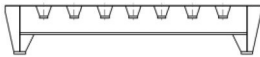
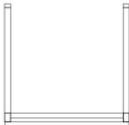
| Typ/Prinzipiskizze                                                                                                                          | Wesentliche Charakteristika                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stahlbeton- bzw. Spannbetonplatte<br>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 6,0m bis ca. 20m (bei 20m vorgespannt)</li> <li>– Plattendicke von 0,4m bis 1,0m</li> <li>– Betonplatte aus Beton C35/45 mit 150kg/m<sup>3</sup> schlaffer Bewehrung und 30kg/m<sup>3</sup> Spannbewehrung</li> </ul>                                                                                                         |
| Stahlbeton- bzw. Spannbetonplattenbalken<br>               | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 20m bis ca. 35m</li> <li>– Konstruktionshöhe von ca. 1,20m bis 1,80m</li> <li>– 0,30m Platte aus sowie Balkenträger mit 0,3m<sup>3</sup> Beton/m<sup>2</sup>, jeweils aus Beton C35/45 mit 220kg/m<sup>3</sup> schlaffer Bewehrung und 45kg/m<sup>3</sup> Spannbewehrung</li> <li>– Endquerträger aus Beton C35/45</li> </ul> |
| Stahlverbund – offene Profile/<br>geschlossene Profile<br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 20m bis ca. 35m</li> <li>– Konstruktionshöhe 1,50m</li> <li>– 0,35m Betonplatte C35/45 mit 250kg/m<sup>3</sup> Bewehrung</li> <li>– Stahltonnage S355 von 215kg/m bis 260kg/m<sup>2</sup></li> </ul>                                                                                                                          |
| Orthotrope Platte aus Stahl<br>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite bis ca. 40m</li> <li>– orthotrope Platte aus Stahl S355 mit aufgeschweißten Stahlprofilen auf der Unterseite, ca. 330kg/m<sup>2</sup></li> </ul>                                                                                                                                                                                  |
| Holzbetonverbund Plattenbalken<br>                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite bis ca. 20m</li> <li>– Konstruktionshöhe 1,20m</li> <li>– 0,30m Platte aus Beton C35/45 mit 300kg/m<sup>3</sup> Bewehrung</li> <li>– Balkenträger aus Brettschichtholz, jeweils ca. 0,5m<sup>3</sup> BSH/m<sup>2</sup></li> </ul>                                                                                                 |

### Querschnitte Fuß- und Radwegbrücken

| Typ/Prinzipiskizze                                                                                                                             | Charakteristika                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stahlbeton- bzw. Spannbetonplatte bzw.<br>Plattenbalken<br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 6m bis ca. 40m (ab ca. 20m vorgespannt)</li> <li>– Plattendicke von 0,30m bis 0,50m, Konstruktionshöhe bei Plattenbalken 0,85m</li> <li>– Betonplatte aus Beton C35/45 mit 150kg/m<sup>3</sup> schlaffer Bewehrung und 25kg/m<sup>3</sup> Spannbewehrung</li> <li>– Fahrbahnbelag aus 4,0cm Gussasphalt</li> <li>– Stahl-Füllstabgeländer Gel 4, i. D. 40kg/m</li> </ul> |
| Holz-Deckbrücke<br>                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 6m bis ca. 20m</li> <li>– Tragkonstruktion aus Holz mit 0,10–0,20m<sup>3</sup> BSH/m<sup>2</sup> zzgl. Aussteifung durch Stahlquerträger, Stahlgeländer, oder Rahmen aus Stahl</li> <li>– Fahrbahnbelag aus Schnittholzbohlen 0,10m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> bzw. Furnierschichtholz mit ca. 7,0cm Gussasphalt</li> </ul>                                               |
| Holz-Trogbrücke<br>                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Holzbetonverbund-Plattenbalken<br>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite von 20m bis ca. 40m</li> <li>– Konstruktionshöhe i. M. = 1,0m</li> <li>– 0,25m Platte aus Beton C35/45 mit 300kg/m<sup>3</sup> Bewehrung</li> <li>– Balkenträger aus Brettschichtholz ca. 0,5m<sup>3</sup> Holz/m<sup>2</sup></li> <li>– Fahrbahnbelag aus 4,0cm Gussasphalt</li> <li>– Stahl-Füllstabgeländer Gel 4, i. D. 40kg/m</li> </ul>                                |
| Stahlkonstruktion mit Belag<br>                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>– Spannweite bis ca. 20m</li> <li>– Tragkonstruktion aus Stahl S355 i. D. 120kg/m<sup>2</sup></li> <li>– Fahrbahnbelag aus z. B. GFK-Platte, <math>d = 4\text{cm}</math></li> <li>– Stahl-Füllstabgeländer Gel 4, i. D. 40kg/m</li> </ul>                                                                                                                                                 |

Tab. 2 Fortsetzung  
Continued

Querschnitte Straßenbrücken

| Typ/Prinzipiskizze                                                                                                     | Wesentliche Charakteristika                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Stahlverbund<br>                      | <ul style="list-style-type: none"><li>– Spannweite von 20 m bis ca. 40 m</li><li>– Konstruktionshöhe 1,15 m</li><li>– 0,35 m Platte aus Beton C35/45 mit 150 kg/m<sup>3</sup> Bewehrung</li><li>– Stahlmenge S355 ca. 150 kg/m<sup>2</sup></li><li>– Fahrbahnbelag aus 4,0 cm Gussasphalt</li><li>– Stahl-Füllstabgeländer Gel 4, i. D. 40 kg/m</li></ul> |
| Orthotrope Platte aus Stahl<br>       | <ul style="list-style-type: none"><li>– Spannweite bis ca. 20 m</li><li>– Fahrbahn aus Baustahlplatte mit aufgeschweißten Stahlprofilen, auf der Unterseite Stahltonnage S355 i. D. 250 kg/m<sup>2</sup></li><li>– 6 mm RHD-Dünnbelag (RHD) auf der Stahlplatte</li><li>– Stahl-Füllstabgeländer Gel 4, i. D. 40 kg/m</li></ul>                           |
| Fachwerk-Trogbrücke aus Aluminium<br> | <ul style="list-style-type: none"><li>– Spannweite von 20 m bis ca. 40 m</li><li>– Aluminium-Fachwerkkonstruktion mit ca. 40 kg/m<sup>2</sup></li><li>– 6 mm RHD-Dünnbelag auf Fahrbahn aus Aluminiumblech</li><li>– Alu-Füllstabgeländer i. D. 10 kg/m</li></ul>                                                                                         |

Anm.: Die Angabe m<sup>2</sup> bezieht sich jeweils auf den Quadratmeter Brückenfläche.

wertungssystem der DIN EN 15978 ausgewertet. Hierbei wurde der gesamte Lebenszyklus des Bauwerks einbezogen, angefangen von der CO<sub>2</sub>-Emission bei der Herstellung der Baustoffe (Module A1–A3) über den Bauprozess (Module A4–A5) und die Nutzungsphase (hier lediglich Modul B4, Austausch bzw. Ersatz von Bauteilen) bis zum späteren Rückbau bzw. zur Entsorgung (Module C1–C4), wobei das Recyclingpotenzial (Modul D) mit berücksichtigt wurde.

Für die Lebensdauer der Bauwerke in Stahl- bzw. Betonbauweise wurden 100 Jahre angesetzt. Bei der Lebensdauer von Holzbrücken liegen sehr unterschiedliche Erfahrungen vor. Neuere Angaben liegen zwischen 60 und 80 Jahren [9–11], wobei in Schleswig-Holstein wegen unzureichendem konstruktivem Holzschutz auch einige Brücken bereits nach ca. 20–25 Jahren rückgebaut werden mussten. In der vorliegenden Untersuchung wurden als Grenzwerte Lebensdauern von jeweils 50 und 100 Jahren vergleichend betrachtet.

Bezüglich der Lebensdauer der einzelnen Bauteile (Belag, Brückenkappen, Fahrbahnübergänge etc.) sei auf den Bericht [8] verwiesen, wobei im Regelfall die Angaben der Ablöserichtlinie ABBV 2010 und des BAST-Hefts B 125 [12] herangezogen wurden.

4 Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Berechnungen

4.1 CO<sub>2</sub>-Bedarf bezogen auf die Brückenfläche

Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, in welcher Größenordnung der CO<sub>2</sub>-Bedarf von Brückenbauwerken liegt, wurden die CO<sub>2</sub>-Werte, die nach der unter Abschn. 3 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt wurden, auf die Brückenfläche bezogen und der Größe nach sortiert (Bild 1). Hierbei zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu 75 % zwischen 0,8 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> und 2,5 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche liegen.

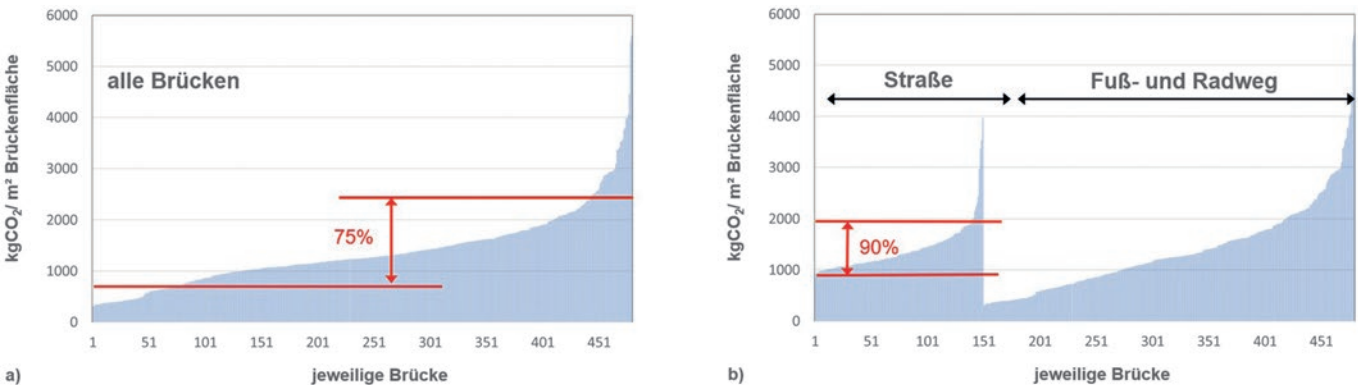


Bild 1 CO<sub>2</sub>-Emission in kg/m<sup>2</sup> Brückenfläche: a) für alle untersuchten Brückenbauwerke, b) unterteilt nach Straßenbrücken bzw. Fuß- und Radwegbrücken  
CO<sub>2</sub> emissions in kg/m<sup>2</sup> bridge area: a) for all investigated bridge constructions, b) divided into road bridges or pedestrian and bicycle bridges

Bei näherer Betrachtung ergeben sich bei Straßenbrücken deutlich geringere Streuungen, hier liegen 90 % der CO<sub>2</sub>-Werte zwischen 1,0tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> und 2,0tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche. Bei den CO<sub>2</sub>-Werten der Fuß- und Radwegbrücken ist eine deutlich größere Spannweite zu erkennen. Auffällig ist, dass zahlreiche Fuß- und Radwegbrücken erwartungsgemäß niedrigere CO<sub>2</sub>-Werte als Straßenbrücken aufweisen, überraschenderweise sind in einigen Fällen allerdings auch Bauwerke mit sehr hohen CO<sub>2</sub>-Werten – in Einzelfällen über 5 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche – feststellbar (Abschn. 4.5).

4.2 CO<sub>2</sub>-Emission über die Lebensdauer

Im zweiten Schritt wird analysiert, in welchen Lebenszyklusphasen des Bauwerks der wesentliche Anteil des CO<sub>2</sub> verbraucht wird. Hierzu wurden die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Bauwerks in allen Phasen des Lebenszyklus ermittelt, angefangen von der Herstellung der Baustoffe (Module A1–A3) über die Erstellung (Module A4–A5)

und die Nutzung des Bauwerks (Module B1–B8) bis zum Rückbau (Module C1–C4) und zu den Gutschriften aus dem Recyclingpotenzial (Modul D).

Die in Bild 2 dargestellte Auswertung zeigt eindeutig, dass der zentrale CO<sub>2</sub>-Anteil (im Mittel 82 %, die Streuung liegt bei etwa 15 %) auf die Emission im Zuge der Herstellung der Baustoffe zurückzuführen ist. Die CO<sub>2</sub>-Anteile der anderen Phasen sind deutlich geringer. In der Phase der Erstellung des Bauwerks sind dies letztlich im Wesentlichen die (vergleichsweise) geringen CO<sub>2</sub>-Aufwendungen des Kraftstoffverbrauchs der Fahrzeuge und Baumaschinen während der Bautätigkeit. In der Nutzungsphase sind es die CO<sub>2</sub>-Emissionen aufgrund des Austauschs von Verschleißbauteilen wie Fahrbahnbelag, Brückenkappen usw., die sich dem Modul B4 zuordnen lassen. Durch die Berücksichtigungen potenzieller Ressourcen im Recyclingprozess wird die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Bauwerks um etwa 10 % verbessert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass knapp 90 % des CO<sub>2</sub>-Anteils in der Phase A und etwa 15 % während der Nutzung verbraucht werden, im Zuge des Rückbaus ergibt sich ein kleinerer CO<sub>2</sub>-Abzugswert, wenn das Recyclingpotenzial ausgenutzt wird. Abweichungen von der Pauschalierung sind lediglich bei Holzbrücken festzustellen, da hier in der Herstellungsphase der Baustoffe durch die Anrechnung des in der Wachstumsphase des Baums gebundenen CO<sub>2</sub> zunächst einmal ein negativer CO<sub>2</sub>-Abzugswert eingerechnet werden darf. Hier entstehen aber in der Phase C hohe CO<sub>2</sub>-Aufwendungen, da das im Holz gebundene CO<sub>2</sub> durch Verbrennung oder Verrottung wieder entweicht.

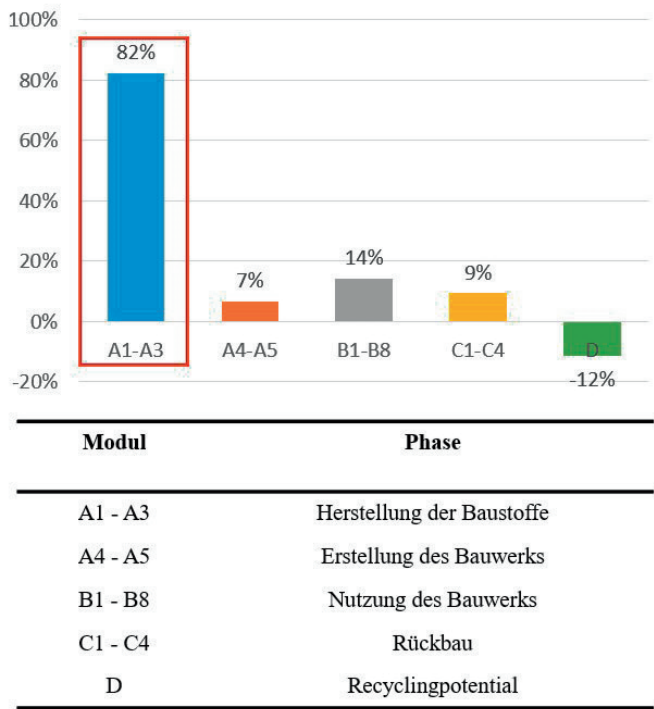


Bild 2 CO<sub>2</sub>-Emission der Brückenbauwerke über alle Lebenszyklusphasen (Module A–D)  
CO<sub>2</sub> emissions of the bridge constructions across all life cycle phases (modules A–D)

4.3 Verteilung der CO<sub>2</sub>-Emission auf die Baustoffe

Im Folgenden wurde ermittelt, welche Baustoffe den Hauptanteil am CO<sub>2</sub>-Bedarf der untersuchten Brückenbauwerke aufweisen. Bild 3 zeigt die Verteilung für unterschiedliche Brücken (Stahlbeton- bzw. Spannbeton-, Stahl-, Stahl-Beton-Verbund-, Holz-Beton-Verbundbrücke). Hierbei ist erkennbar, dass sich über 80 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen den Baustoffen Beton und Stahl zuweisen lassen, dies zieht sich letztlich durch alle Brückentypen bzw. Baustoffe durch. Mindestens 45 % des CO<sub>2</sub>-Bedarfs entfallen auf den bewehrten Beton, wobei – unter Berücksichtigung, dass bei den betrachteten Brückenbauwerken mit Längen bis 40m die meisten in Betonbauwei-

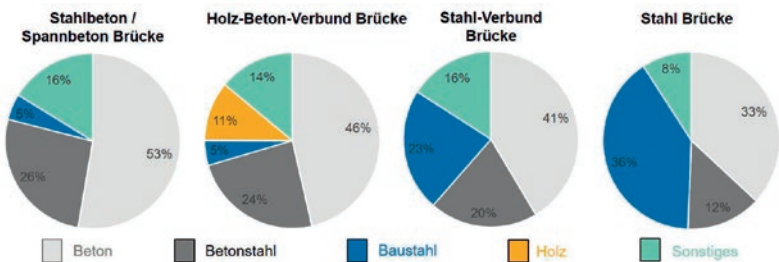


Bild 3 CO<sub>2</sub>-Anteil der Hauptbaustoffe an den Gesamt-Emissionen für unterschiedliche Bauwerkstypen  
Portion of CO<sub>2</sub> of the main building materials in the total emissions for different kind of bridge constructions

se erstellt werden – beim realen Brückenbestand der CO<sub>2</sub>-Anteil vom bewehrten Beton eher im Bereich von etwa 65 % liegen dürfte.

Da v.a. beim Baustoff Beton der zentrale CO<sub>2</sub>-Anteil nicht auf elektrische, sondern auf thermische bzw. chemische Prozesse zurückzuführen ist, würde sich dies auch mittelfristig nur unwesentlich verändern, wenn zukünftig ein höherer Stromanteil regenerativ bzw. CO<sub>2</sub>-neutral gewonnen würde. Hierzu wurden in [8] vergleichende CO<sub>2</sub>-Berechnungen der Brückenbauwerke für das Jahr 2050 durchgeführt und hierbei, einer optimistischen Prognose der dena-Studie [13] folgend, der CO<sub>2</sub>-Anteil für 1 kWh Strom von aktuell 420 g auf etwa 25 g reduziert. Aufgrund des geringen elektrischen Anteils an der gesamten CO<sub>2</sub>-Emission reduziert sich die CO<sub>2</sub>-Bilanz der Betonbauteile hierbei lediglich um 10 %. Unter Berücksichtigung aller anderen Baustoffe wie Baustahl, Betonstahl, Aluminium usw. liegt die Reduzierung in Summe bei etwa 20–25 %.

#### 4.4 Abhängigkeiten des CO<sub>2</sub>-Bedarfs von der Bauwerksgeometrie

Im Weiteren wird untersucht, ob Abhängigkeiten des CO<sub>2</sub>-Bedarfs von der Bauwerksgeometrie erkennbar sind. Die Auswertung in Bild 4 zeigt eine zunächst überraschende Abhängigkeit der in tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche angegebenen CO<sub>2</sub>-Emission von der Brückenlänge. Der Effekt wird umso deutlicher, wenn – wie in Bild 4 dargestellt – auch in der Literatur dokumentierte CO<sub>2</sub>-Berechnungen einbezogen werden. Hier wurden in [4] Brückenbauwerke mit vergleichbaren Bauwerkslängen untersucht, in [3] wurden aber auch Großbrücken mit bis zu 450 m Bauwerkslänge bilanziert.

Hierbei scheinen die CO<sub>2</sub>-Emissionen ab einer Brückenlänge von etwa 50 m bei etwa 1,2 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> je m<sup>2</sup> Brückenfläche relativ konstant zu sein, aber gerade bei den im Rahmen dieses Projekts betrachteten Brücken mit einer Länge von weniger als 40 m zeigt sich ein deutlicher An-

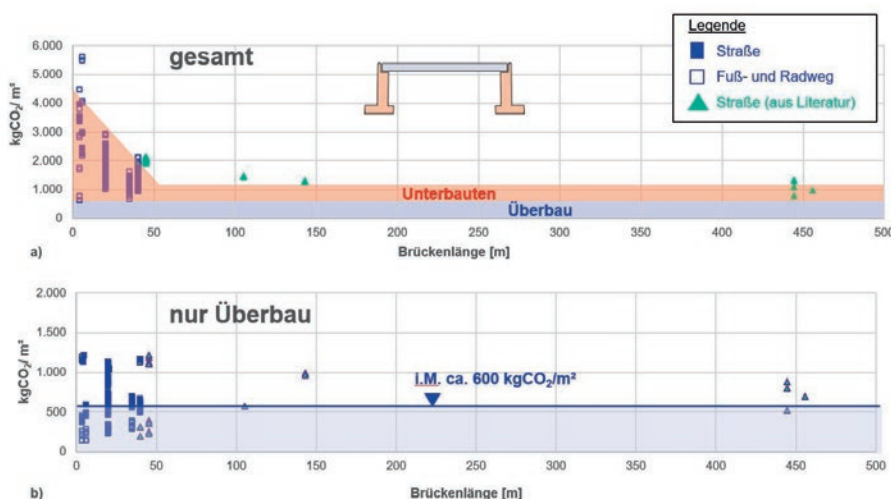
stieg der CO<sub>2</sub>-Emission/m<sup>2</sup> bei abnehmender Brückenlänge. Die nähere Analyse ergibt, dass die Abhängigkeit von der Bauwerkslänge vornehmlich auf die Unterbauten zurückzuführen ist. Der CO<sub>2</sub>-Anteil der Überbauten weist zwar starke Streuungen auf, die durch die Verschiedenartigkeit der Bauwerke (unterschiedliche Materialien, Querschnittstypen, Straßenbrücke kombiniert mit Fuß- und Radwegbrücken etc.) erklärbar sind, hier ist keine sich abzeichnende Tendenz erkennbar – im Mittel kann für die Überbauten inkl. Ausstattung ein mittlerer CO<sub>2</sub>-Wert von ca. 600 kg/m<sup>2</sup> Brückenfläche angegeben werden, um den die Werte der einzelnen Bauwerke entsprechend streuen.

Die eingehendere Untersuchung zeigt, dass der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Kennwerte bei geringer Brückenlänge auf die im Regelfall massiven Betonwiderlager zurückzuführen ist. Je Kastenwiderlager werden zwischen 60 tCO<sub>2</sub> und 110 tCO<sub>2</sub> verbraucht, dies erhöht gerade bei geringer Bauwerkslänge den auf die Brückenfläche umgelegten CO<sub>2</sub>-Bedarf. Bei Bauwerkslängen von weniger als 40 m überwiegt der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Widerlager in vielen Fällen den Werten des Überbaus. Daher sind die Widerlager ein entscheidender CO<sub>2</sub>-Treiber.

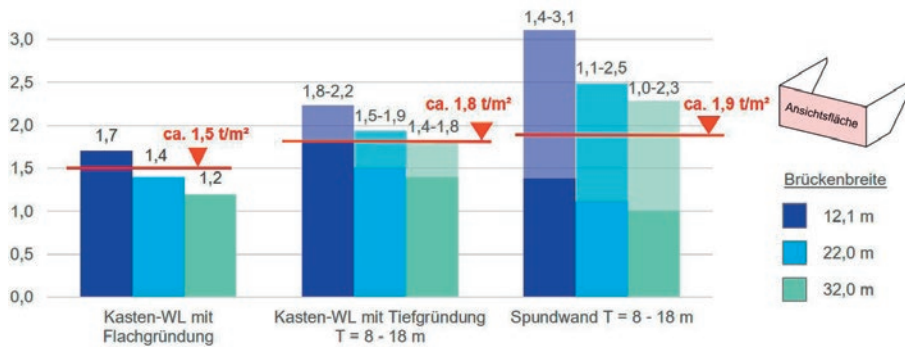
#### 4.5 Ermittlung von CO<sub>2</sub>-Kennwerten einzelner Bauwerksteile

##### 4.5.1 Allgemeines

Um im anschließenden Abschn. 4.6 Anhaltswerte für den CO<sub>2</sub>-Bedarf von Brückenbauwerken abzuleiten, ist im Folgenden zunächst der CO<sub>2</sub>-Bedarf der einzelnen Hauptkomponenten – Unterbauten, Überbau und Ausstattung – untersucht worden.



**Bild 4** Abhängigkeit des Kennwerts CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche von der Bauwerkslänge: a) gesamtes Bauwerk, b) lediglich Überbau  
Dependence of the characteristic value CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> bridge area on the length of the structure: a) entire structure, b) just superstructure



**Bild 5** CO<sub>2</sub>-Werte für Widerlager von Straßenbrücken, bezogen auf die Widerlageransichtsfläche  
CO<sub>2</sub> values for bridge bearings of road bridges, based on the view area of the bearing

#### 4.5.2 CO<sub>2</sub>-Emission der Unterbauten

Aufgrund der massiven Stahlbetonkubatur haben die Widerlager einen sehr großen Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Emission eines Brückenbauwerks. Bei Straßenbrücken beträgt der CO<sub>2</sub>-Verbrauch bezogen auf die Ansichtsfläche des Widerlagers im Falle einer Flachgründung zwischen 1,2tCO<sub>2</sub> und 1,7tCO<sub>2</sub>. Bei Tiefgründungen liegen die Werte im Bereich von 1,4t/m<sup>2</sup> bis 2,2t/m<sup>2</sup>, mit einem Durchschnitt von ca. 1,8t/m<sup>2</sup> (Bild 5).

Bei der Untersuchung wurden auch Spundwandwiderlager einbezogen. Hierbei ergaben sich im Vergleich zu tiefgegründeten Stahlbetonwiderlagern für Einbindetiefen von unterhalb 12m geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen, bei größeren Einbindetiefen lag die CO<sub>2</sub>-Emission jedoch oberhalb der Werte der Stahlbetonwiderlager, da der Zuwachs an Material der flächenhaften Spundwand und der daraus resultierende CO<sub>2</sub>-Bedarf im Vergleich zu einer Pfahlgründung überwiegen.

Wenn bei Fuß- und Radwegbrücken ebenfalls massive Stahlbeton-Kastenwiderlager ausgebildet werden, wächst der CO<sub>2</sub>-Bedarf bezogen auf Ansichts- bzw. Brückenfläche nochmals weiter an. Auch wenn die Betonabmessungen hier filigraner sind, wird durch den geringen Abstand der Flügelwände bezogen auf die Breite der Brücke mehr Beton verbraucht. Hierdurch sind auch die teilweise sehr hohen CO<sub>2</sub>-Werte für Fuß- und Radwegbrücken in Bild 1 erklärbar.

Wenn hier im Regelfall leichtere Konstruktionen verwendet werden (zurückgesetzte Widerlager, Überbrückung der Höhendifferenz durch eine als Brücke ausgebildete Anrampung (Bsp. in Bild 6)), schwankt der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Unterbauten bezogen auf die Bauwerksfläche im Bereich von ca. 0,15tCO<sub>2</sub> bis 0,45 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Bauwerksfläche. Aus der Vielzahl der Variationsmöglichkeiten resultieren entsprechende Streuungen.

#### 4.5.3 CO<sub>2</sub>-Emission verschiedener Überbauten

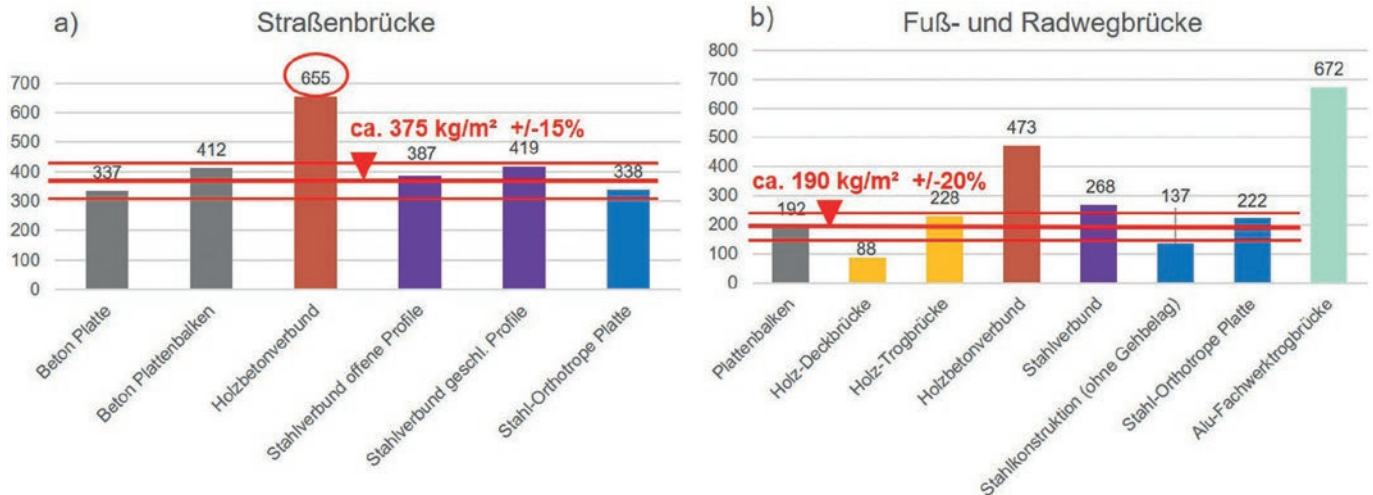
In Bild 7 sind die CO<sub>2</sub>-Anteile der Überbauten vergleichend gegenübergestellt. Bei den Straßenbrücken zeigt sich, dass die CO<sub>2</sub>-Anteile bezogen auf den m<sup>2</sup> Brücken-



**Bild 6** Fuß- und Radwegbrücke zur Überquerung einer Bahnstrecke (hier Brücke am Bahnhof Konstanz-Petershausen): Höhendifferenz wird durch Anrampung/Verlängerung des Brückenbauwerks erreicht  
Pedestrian and bicycle bridge to cross the railway line (here bridge at station Konstanz-Petershausen): height difference is achieved by ramping/extending the bridge construction

fläche relativ unabhängig von der Wahl des Baustoffs in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Im Mittel werden ca. 0,375tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche emittiert, hier liegen alle Bauwerkstypen in der Streubreite der Ausgangswerte von  $\pm 15\%$ . Auffällig sind lediglich die Werte für Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Während bei allen anderen Bauwerkstypen eine Lebensdauer von 100 Jahren realistisch scheint, liegen bezüglich Holzbauweisen sehr unterschiedliche Erfahrungen vor. Wenn hier von einer ähnlichen Lebensdauer ausgegangen werden kann, ist der CO<sub>2</sub>-Bedarf mit ca. 0,327tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> etwas unterhalb des Durchschnitts. Wenn die Lebensdauer allerdings eher im Bereich 50–60 Jahre liegt (die aktuelle Ablöse-richtlinie ABBV 2010 legt 60 Jahre zugrunde) und der Überbau daher innerhalb der Lebensdauer von 100 Jahren zweimal erstellt werden muss, schneidet diese Variante sogar am schlechtesten ab. Im Falle einer Holz-Beton-Verbundvariante ist daher die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit ein entscheidender Punkt.

Bei Fuß- und Radwegbrücken wird infolge der filigranen Ausbildung weniger CO<sub>2</sub> verbraucht, der Mittelwert liegt mit ca. 0,19tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche knapp 50 % unterhalb der Werte der Straßenbrücken. Auch hier liegt



**Bild 7** Kennwert CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche für unterschiedliche Konstruktionsweisen über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren: a) Straßenbrücke, b) Fuß- und Radwegbrücke  
Characteristic CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> bridge area for different bridge constructions over a period of 100 years: a) road bridge, b) foot and bicycle bridge

der CO<sub>2</sub>-Bedarf der unterschiedlichen Bauwerkstypen wieder relativ dicht beieinander. Unterhalb der Spannweite von  $\pm 20\%$  liegen lediglich die beiden folgenden Bauwerkstypen:

1. Holz-Deckbrücken zeichnen sich nach den durchgeführten Berechnungen durch einen sehr geringen CO<sub>2</sub>-Bedarf von ca. 0,044 t/m<sup>2</sup> aus. Sofern der konstruktive Holzschutz sichergestellt ist, sodass diese eine Lebensdauer von etwa 50–60 Jahren erreichen, liegt der CO<sub>2</sub>-Bedarf bezogen auf eine Lebensdauer von 100 Jahren trotz zweifacher Herstellung mit  $2 \cdot 0,044 = 0,088 \text{ tCO}_2/\text{m}^2$  Brückenfläche immer noch deutlich unterhalb der Durchschnittswerte.
2. Auch für leichte Stahlkonstruktionen, die ohne orthotrope Platte lediglich aus Längs- und Querträgern bestehen, konnte in den durchgeführten Berechnungen ein unterdurchschnittlicher CO<sub>2</sub>-Anteil von ca. 0,137 t/m<sup>2</sup> ausgewiesen werden.

Sehr hohe CO<sub>2</sub>-Emissionen weisen v. a. Aluminiumkonstruktionen auf (Bild 7b). Das ist in der energetisch aufwendigen Materialherstellung begründet, während für die Herstellung 1 t Baustahl ca. 1,2 tCO<sub>2</sub> erforderlich sind, sind es bei Aluminium ca. 10,7 tCO<sub>2</sub> [14].

#### 4.5.4 CO<sub>2</sub>-Emissionsanteile der Ausstattung

Neben dem CO<sub>2</sub>-Anteil der Unter- und Überbauten ist wegen der geringen Lebensdauer und der damit verbundenen Mehrfachherstellung auch der CO<sub>2</sub>-Bedarf der Ausstattungen durchaus relevant.

Bei den Straßenbrücken sind neben dem Fahrbahnbelag die Kappen und Geländer sowie ein Fahrzeugrückhaltesystem bei einer Entwurfsgeschwindigkeit von größer als 50 km/h als wesentliche Komponenten zu betrachten. Demgegenüber ist der CO<sub>2</sub>-Anteil der Brückenlager und etwaiger Versorgungsleitungen vergleichsweise gering

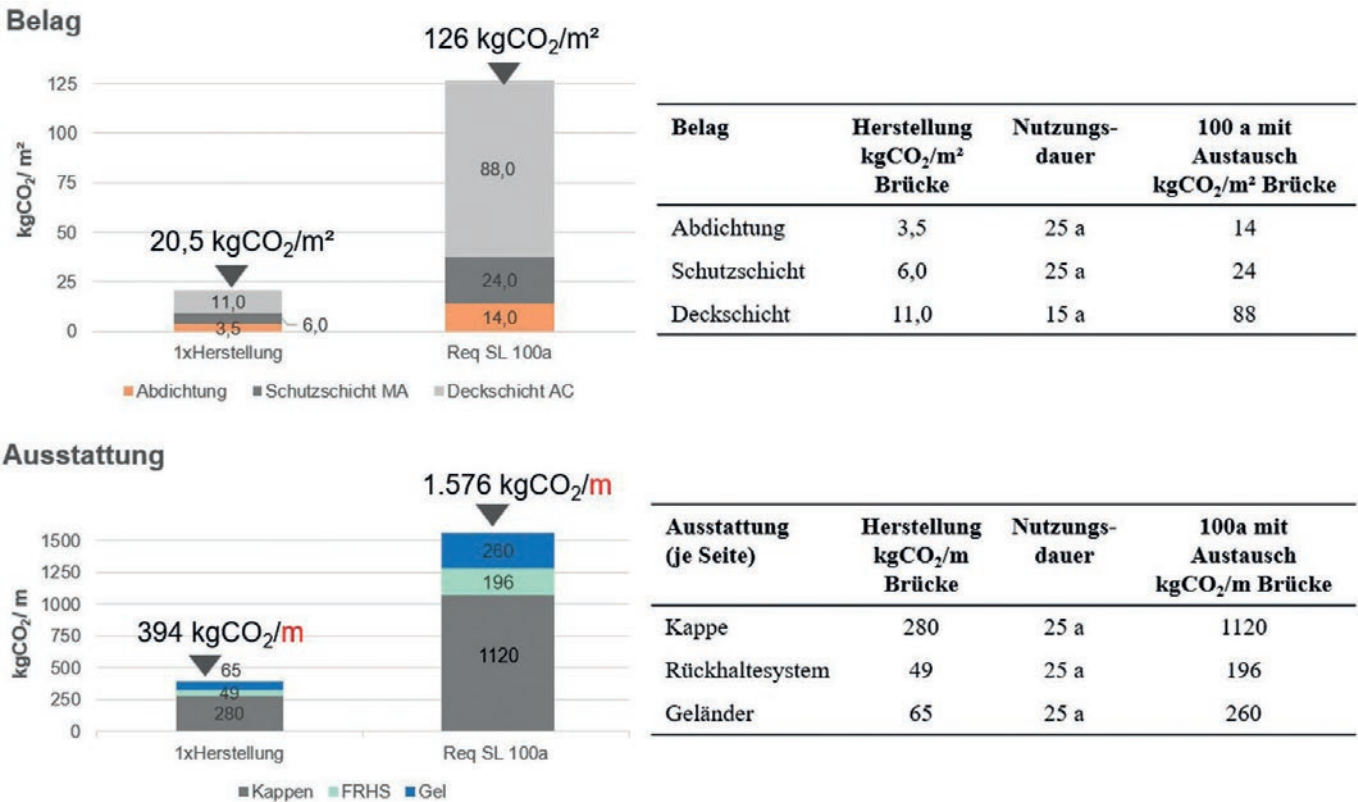
und wird daher in einer 5%-Pauschale indirekt berücksichtigt.

Der Straßenaufbau umfasst i. d. R. die Abdichtungslage, eine 3,5 cm dicke Schutzschicht aus Gussasphalt und eine 4 cm dicke Asphaltbetondeckschicht. Bei der Bilanzierung ist zu beachten, dass die einzelnen Belagskomponenten im Regelfall unterschiedliche vorgesehene Nutzungsdauern aufweisen. Für die Deckschicht wurde eine Lebensdauer von 15 Jahren angesetzt, für die Schutzschicht und Abdichtungslage wurde von 25 Jahren ausgegangen. Bei der angesetzten Lebensdauer der Brücke von 100 Jahren muss die Deckschicht daher siebenmal und die Schutzschicht dreimal ausgetauscht werden (Bild 8).

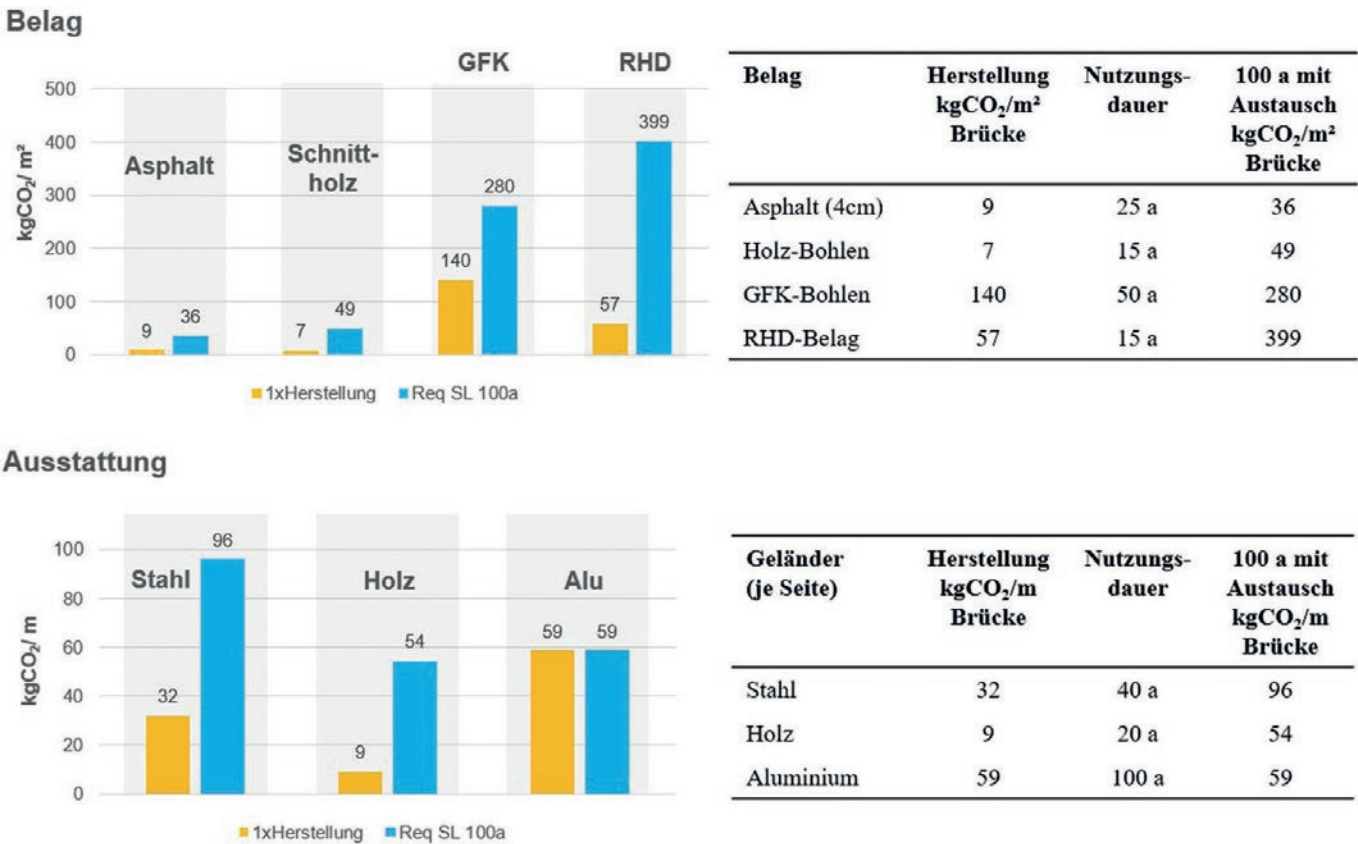
Für das Fahrzeugrückhaltesystem wurden ein Stahlsystem (EDSP) mit einer Stahltonnage von ca. 30 kg/m und eine Betonschutzwand DB 100AS-R, beide den Freigabelisten der BASt entnommen, variiert. Für das Geländer wurde ein Stahl-Füllstabgeländer Gel 4 gemäß RiZ-ING mit einem Stahlgewicht von etwa 40 kg/m zugrunde gelegt.

Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen, dass die Ausstattung durchaus nicht vernachlässigbar ist. Bereits der Fahrbahnaufbau liegt durch den mehrfachen Austausch mit ca. 125 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche, über die Lebensdauer, in der Größenordnung von ca. 30 % des CO<sub>2</sub>-Anteils des Überbaus. Für Kappen inkl. Geländer und Stahl-Fahrzeugrückhaltesystem werden ca. 394 kgCO<sub>2</sub>/m ermittelt, bei einer Lebensdauer von ca. 25 Jahren ergeben sich damit 1576 kgCO<sub>2</sub>/m. Bei einer Brückenbreite zwischen ca. 12 m und 32 m sind es umgerechnet  $2 \cdot 1576 / (12 - 32 \text{ m})$  und somit zwischen 100 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> und 260 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, sodass der CO<sub>2</sub>-Anteil der Ausstattung in Summe zwischen 25 % und 70 % derer des tragenden Überbaus liegt.

Bei der Fuß- und Radwegbrücke wurden der Belag und das Geländer als wesentliche Ausstattungsmerkmale (Bild 9) in der CO<sub>2</sub>-Bilanz berücksichtigt. Wie schon beim Überbau liegt auch bei der Ausstattung eine sehr



**Bild 8** CO<sub>2</sub>-Werte für die Ausstattung der Straßenbrücke  
CO<sub>2</sub> values for the equipment of a road bridge



**Bild 9** CO<sub>2</sub>-Werte für die Ausstattung der Fuß- und Radwegbrücke  
CO<sub>2</sub> values for the equipment of a pedestrian and bicycle bridge

große Bandbreite an Lösungsmöglichkeiten vor, die zu beträchtlichen Unterschieden im Hinblick auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt führen können. Hierbei weist v.a. die Verwendung von kunststoffmodifizierten Belägen, wie reaktionsharzgebundener Dünnbelag (kurz RHD) bzw. ein GFK-Bohlenbelag, extrem hohe CO<sub>2</sub>-Werte auf, die in der

Herstellung der Baustoffe begründet sind. Dort fallen die CO<sub>2</sub>-Emissionen hauptsächlich in Form von Energieverbräuchen an, z.B. bei der Raffinierung von Rohstoffen zur Kunststoffherstellung, besonders durch das Steamcracken, wo eine erhebliche Menge Energie für die Beheizung des Spaltofens eingesetzt wird. Bei der Herstellung von Glasfasern entfällt der wesentliche Energie- bzw. CO<sub>2</sub>-Verbrauch auf die Glasschmelze. Somit werden je kg GFK etwa 5,3kgCO<sub>2</sub> benötigt und je kg RHD etwa 5,2kgCO<sub>2</sub> [14]. Demzufolge ist der CO<sub>2</sub>-Bedarf von 1m<sup>3</sup> GFK etwa 37-mal höher als von 1m<sup>3</sup> Beton, Ähnliches gilt für den RHD-Belag. Deswegen sind derartige Beläge trotz geringer Einbaustärke (RHD-Belag i.d.R. ca. 6–6,5mm) bzw. langer Lebensdauer (GFK-Bohlen im Regelfall deutlich längere Lebensdauer als Holzbohlenbelag) absolute CO<sub>2</sub>-Treiber, der hieraus resultierende CO<sub>2</sub>-Bedarf ist größer als der des gesamten tragenden Überbaus.

#### 4.6 Abschätzung des CO<sub>2</sub>-Bedarfs für Brückenbauwerke

Im Weiteren werden aus den Ergebnissen des Abschn. 4.5 Anhaltswerte abgeleitet, mit denen der CO<sub>2</sub>-Bedarf von Brückenbauwerken abgeschätzt werden kann. Derartige Kennwerte lassen sich bspw. heranziehen, wenn in einer frühen Planungsphase Varianten im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz miteinander verglichen werden sollen oder aber auch vor Beginn einer Planung abgeschätzt werden soll, wie viel CO<sub>2</sub> für die Maßnahme entsprechend investiert werden muss. Je nach Leistungsphase und vorhandener Detaillierung der Bauwerksplanung werden hier unterschiedliche Schätzwerte angegeben.

##### 4.6.1 Schätzwerte für die Leistungsphase 0

Die grundsätzliche Investitionsentscheidung einer Brückenbaumaßnahme muss im Regelfall beurteilt werden, bevor überhaupt eine Planungsleistung vergeben wird. Hierzu werden die Kosten üblicherweise anhand der Brückenfläche und Erfahrungswerte in Euro/m<sup>2</sup> Brückenfläche abgeschätzt. Im Folgenden sollen derartige Erfahrungswerte, basierend auf den o. g. Untersuchungen, auf den CO<sub>2</sub>-Bedarf übertragen werden.

Straßenbrücke:

- CO<sub>2</sub>-Bedarf Überbau:  
ca. 0,38t/m<sup>2</sup> Brückenfläche gemäß Abschn. 4.5.3
- CO<sub>2</sub>-Bedarf Belag/Ausstattung:  
i. M. ca. 0,30t/m<sup>2</sup> Brückenfläche gemäß Abschn. 4.5.4
- CO<sub>2</sub>-Bedarf Widerlager:  
ca. 1,7t/m<sup>2</sup> Ansichtsfläche gemäß Abschn. 4.5.2  
bzw. umgerechnet auf die Bauwerksfläche:  
 $2 \cdot 1,7 \text{ t/m}^2 \cdot B [\text{m}] \cdot H (= 4,80 \text{ m}) / (\text{Brückenfläche} = B [\text{m}] \cdot L [\text{m}]) = 16,5/L [\text{m}]$
- Mindestwert (bei großer Länge):  
ca. 1,2t/m<sup>2</sup>

Hiermit ergibt sich der CO<sub>2</sub>-Bedarf/das Global Warming Potential (GWP) der Straßenbrücke wie folgt:

$$\text{GWP(A-D)}_{\text{Strassenbrücke}} = 16,5/L (\text{m}) + 0,70 \geq 1,2 \text{ tCO}_2/\text{m}^2 \text{ Brückenfläche} \quad (1)$$

Aus einer ähnlichen Betrachtung ergibt sich für eine Fuß- und Radwegbrücke:

$$\text{GWP(A-D)}_{\text{Fuß- und Radwegbrücke}} = 32/L (\text{m}) + 0,45 \geq 0,7 \text{ tCO}_2/\text{m}^2 \text{ Brückenfläche} \quad (2)$$

Hierbei ist zu beachten, dass der vordere Term in Gl. (2) lediglich im Falle eines Kastenwiderlagers anzusetzen ist. Ebenso sei darauf hingewiesen, dass die Streuungen bei Fuß- und Radwegbrücken deutlich größer sind und daher auch der Sockelwert von 0,7tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> tendenziell auf der sicheren Seite liegt und bei sehr ungünstigen Konstellationen durchaus auch überschritten werden kann.

Die in den Gln. (1), (2) angegebenen CO<sub>2</sub>-Werte beziehen sich auf die gesamte Lebensdauer (Phasen A–D) der Brücke. Wenn lediglich die Herstellung des Bauwerks (Phase A) betrachtet wird, kann der CO<sub>2</sub>-Wert mit Ausnahmen von Holzbrücken nach Gl. (3) mit 90 % abgeschätzt werden.

$$\text{GWP(A)} = 0,9 \cdot \text{GWP(A-D)} \quad (3)$$

Da bei Holzbrücken in der Phase A das während der Wachstumsphase des Baums gebundene CO<sub>2</sub> günstig berücksichtigt werden kann, verschieben sich die CO<sub>2</sub>-Anteile hier von der Phase A in die Phase C (Abschn. 4.2).

##### 4.6.2 Schätzwerte für die Leistungsphase 2

In der Leistungsphase 2 stehen die grundsätzliche Brückenkonstruktion, die Hauptbaustoffe und ggf. auch die wesentlichen Ausstattungsmerkmale fest, sodass der CO<sub>2</sub>-Bedarf hier bereits spezifischer ermittelt werden kann. Basierend auf den o. g. Untersuchungsergebnissen wird hierzu der folgende Ansatz vorgeschlagen (Tab. 3) (Gl. (4)):

$$\text{GWP(A-D)} = A [\text{m}^2] \cdot (\text{CO}_{2,\text{ÜB}} + \text{CO}_{2,\text{A}}) + 2 \cdot A_{\text{WL}} [\text{m}^2] \cdot \text{CO}_{2,\text{WL}} \quad (4)$$

##### 4.6.3 Leistungsphasen 3–6:

Ab der Leistungsphase 3 liegen im Regelfall konkrete Massen vor, sodass hier nicht mehr mit den o. g. Anhaltswerten gearbeitet werden muss, sondern eine konkrete CO<sub>2</sub>-Bilanz durchgeführt werden kann.

**Tab. 3** CO<sub>2</sub>-Werte für Bauteilgruppen bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren  
CO<sub>2</sub> values for different components over a period of 100 years

|                                             | Straßenbrücke                                                                                                                                                    | Fuß- und Radwegbrücke                                                                                                                                                                                             |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gründung – Widerlager<br>CO <sub>2,WL</sub> | Flachgründung:<br>1,5tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> oder (8/B [m] + 1,0)<br>Tiefgründung:<br>1,8tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> oder (10/B [m] + 0,03 · T[m]) | Kastenwiderlager:<br>2,6 tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>Tiefgründung:<br>2,0 tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>                                                                                                |
| Überbau<br>CO <sub>2,ÜB</sub>               | Beton, Stahl, Stahlverbund:<br>0,37tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>Holz-Beton-Verbund:<br>(0,32 · (100a/ND)) tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>                | Beton, Stahl, Stahlverbund:<br>0,20tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>Holz-Beton-Verbund:<br>(0,23 · (100a/ND)) tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>Holz:<br>(0,08 · (100a/ND)) tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> |
| Belag und Ausstattung<br>CO <sub>2,A</sub>  | Allgemein:<br>(0,125 + 3,15/B [m]) tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>                                                                                              | Allgemein:<br>0,15 tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>Zuschläge:<br>RHD-Belag: + 0,35 tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup><br>GFK-Belag: + 0,25 tCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup>                                     |

- \* mit A Brückenfläche
- \* mit A<sub>WL</sub> Ansichtsfläche des Widerlagers
- \* mit B Brückenbreite [m]
- \* mit T Einbindetiefe der Pfähle bzw. der Spundwände [m]
- \* mit a Jahre
- \* mit ND voraussichtliche Nutzungsdauer von Bauteilen [a]

5 Einfluss der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emission

Da in verschiedenen Untersuchungen [3,15] darauf hingewiesen wurde, dass bei Brückenbaumaßnahmen der CO<sub>2</sub>-Anteil aus bauzeitlichen Stausituationen größer sein kann als die CO<sub>2</sub>-Emission, die aus der eigentlichen Herstellung des Bauwerks resultiert, wurden hierzu ergänzende Voruntersuchungen durchgeführt. In Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb für Straßenbau- und Verkehr in Schleswig-Holstein wurden zwei konkrete Baustellensituationen betrachtet, bei denen konkrete Verkehrszahlen vorlagen, sodass hieraus die CO<sub>2</sub>-Emission aus der bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigung ermittelt werden konnte. Im Anschluss wurden die an Einzelfällen gewonnenen Erkenntnisse in allgemeingültige Aussagen überführt.

Bei den beiden konkreten bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen handelte es sich in einem Fall um eine Umleitung, da im Zuge einer Bauwerksertüchtigung der Verkehrsweg vollständig gesperrt werden musste, und im anderen Fall um eine bauzeitliche Einengung des 2+2-Verkehrs einer vierspurigen Bundesstraße auf eine 2+0-Verkehrsführung, da jeweils wechselseitig eine Fahrtrichtung infolge von Bautätigkeiten gesperrt werden musste. Die Berechnungen haben lediglich den Charakter einer Voruntersuchung, sollen an dieser Stelle dennoch zusammenfassend vorgestellt werden.

Die Vorgehensweise bzw. die Berechnungsparameter sind im Folgenden in Kürze zusammengefasst:

- Ausgangspunkt der Berechnung sind die Verkehrsstärke in [Kfz/24h] und idealerweise auch die genaue Verkehrszusammensetzung und die Tagesganglinie. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen lag

lediglich die Verkehrsstärke Kfz/24h vor, es wurde von einem Schwerlastverkehrsanteil von 10 % ausgegangen und bei den Pkws nach [16] zu 32,4 % von einem Dieserverbrauch und zu 67,6 % von einem Benzinverbrauch. Als Tagesganglinie wurde der Ganglinientyp D nach [17] verwendet, der für Dienstag bis Donnerstag auf außerörtlichen Bundesstraßen repräsentativ ist; die grundsätzlichen Ergebnisse sind jedoch relativ unabhängig von der Tagesganglinie.

- Nach Ermittlung des Verkehrsflusses über den Tagesverlauf erfolgte ein stündlicher Abgleich, ob die vorhandene Verkehrsstärke unterhalb der Leistungsfähigkeit des Straßenquerschnitts liegt [18], sodass hieran beurteilt werden kann, ob ein freier Fahrfluss in der zulässigen Geschwindigkeit möglich ist oder ob Stausituationen auftreten. In Stausituationen wurde basierend auf [19] von einem Stop-and-Go-Verkehr mit einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von lediglich 9,5 km/h ausgegangen.
- Die Anzahl der sich stauenden Fahrzeuge bzw. der allmähliche Abfluss, wenn die aktuelle Verkehrsstärke wieder unterhalb der Leistungsfähigkeit der Straße liegt, erfolgte an einem deterministischen Warteschlangenmodell, bei dem kontinuierlich der Zufluss bzw. der mögliche Abfluss abgeglichen wird.
- Mit dieser Vorgehensweise kann jedem Fahrzeug eine Geschwindigkeit zugewiesen werden, im Falle einer Umfahrung ist die verlängerte Wegstrecke zu berücksichtigen. Aus der Fahrzeuggeschwindigkeit kann der Kraftstoffverbrauch mittels Verbrauchsfaktoren nach [19] und aktueller Anpassungsfaktoren aus dem Jahr 2020 abgeschätzt und durch die Umrechnungsfaktoren von 3,12 kg CO<sub>2</sub>/kg Benzin bzw. 3,25 kg CO<sub>2</sub>/kg Diesel der CO<sub>2</sub>-Bedarf ermittelt werden. Durch Abgleich mit der Normalsituation ohne Baustelle ergibt sich der baustellenbedingte CO<sub>2</sub>-Bedarf.

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen sind im Diagramm in Bild 10 festgehalten und nachfolgend zusammengefasst.

#### Umleitungsstrecken:

- Sofern die Umleitungsstrecken nicht zu ergänzenden Stausituationen führen, hängt der zusätzliche CO<sub>2</sub>-Bedarf etwa linear von der Länge der Umleitung und der Verkehrsstärke ab (Bild 10a).

Die Größenordnung, in der die CO<sub>2</sub>-Aufwendungen aus der Verkehrsbeeinträchtigung liegen können, soll an einem Beispiel illustriert werden: wenn täglich 10.000 Kfz einen Umweg von 4km fahren, ergeben sich CO<sub>2</sub>-Mehraufwendungen in Höhe von ca. 41 tCO<sub>2</sub>/Woche (Bild 10a); bei einer angenommenen Dauer der Baustelle von neun Monaten ergeben sich hieraus CO<sub>2</sub>-Belastungen von 1612 t. Wird gemäß Abschn. 4 unterstellt, dass für die Herstellung kleinerer Brücken etwa 1,4 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche benötigt werden, könnten aus den verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Mehrbelastungen umgerechnet ca.  $1612/1,4 = 1151$  m<sup>2</sup> Brückenfläche hergestellt werden, dies entspricht einem Brückenbauwerk mit einer Breite von 32 m und einer Länge von 36 m.

- Wenn die Umleitungen ergänzende Stausituationen nach sich ziehen, würde die staubedingte CO<sub>2</sub>-Emission weiter überproportional anwachsen, wobei für diesen Fall keine konkreten Berechnungen durchgeführt wurden.

Die Vergleichsrechnung zeigt, dass bei signifikanten Umleitungen und entsprechenden Verkehrsstärken der CO<sub>2</sub>-Anteil aus der Umfahrung schnell größer als der CO<sub>2</sub>-Anteil aus dem Brückenbauwerk werden kann.

2+0-Verkehrsführung in Verbindung mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h:

- Durch die Reduzierung der Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h ergibt sich lediglich ein geringer

Zuwachs an CO<sub>2</sub>. Sofern signifikante Stausituationen vermieden werden können (in diesem Fall bis ca. 15.000 Kfz/24h), überwiegt der CO<sub>2</sub>-Anteil aus der Bauwerkserstellung die Emissionen aus der bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigung deutlich.

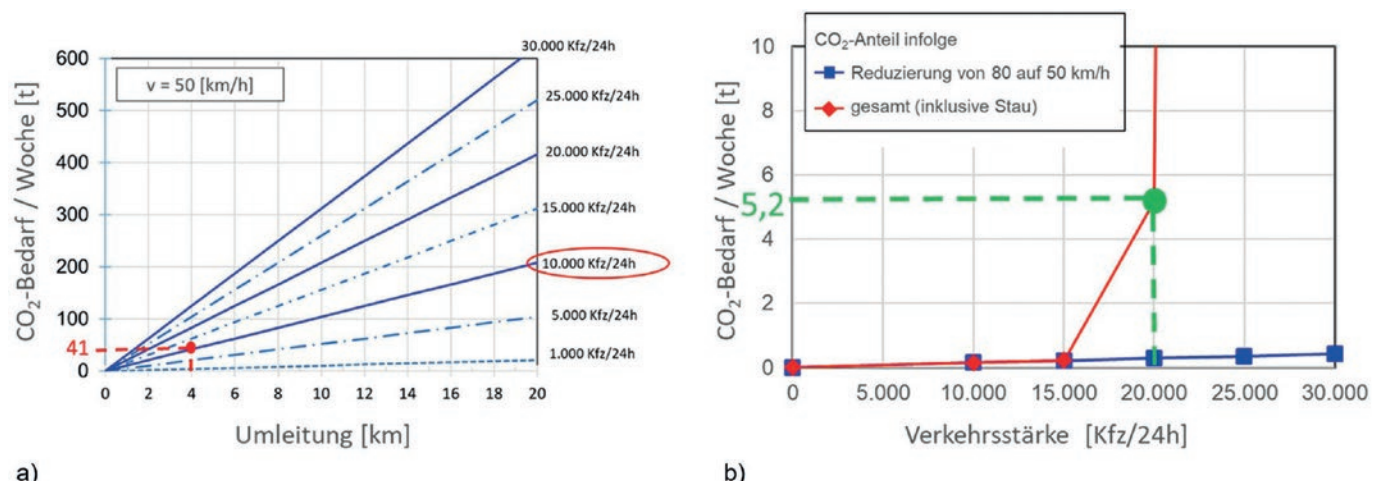
- Im betrachteten Fallbeispiel treten ab einer Verkehrsstärke von ca. 15.000 Kfz/24h in den morgendlichen und abendlichen Spitzenstunden entsprechende Stausituationen auf. Bei einer Verkehrsstärke von 20.000 Kfz werden hier etwa 5,2 tCO<sub>2</sub>/Woche verbraucht (Bild 10b). Bei einer angenommenen Dauer der Baumaßnahme von neun Monaten sind das etwa 203 t. Bei einem CO<sub>2</sub>-Bedarf eines kleineren Brückenbauwerks mit einer erforderlichen CO<sub>2</sub>-Emission von ca. 1,4 t/m<sup>2</sup> Brückenfläche könnten aus den 203 t umgerechnet ca. 145 m<sup>2</sup> Brückenfläche hergestellt werden, das entspricht einem Brückenbauwerk mit einer Breite von 12 m und einer Länge von 12 m.
- Bei einer Überschreitung von 20.000 Kfz/24h nimmt die Dauer der Stausituation und damit auch der CO<sub>2</sub>-Anteil deutlich überproportional zu. Der CO<sub>2</sub>-Anteil aus den bauzeitlichen Stausituationen übersteigt hier schnell den CO<sub>2</sub>-Bedarf aus der Erstellung des Bauwerks.

Somit ist sowohl bei großen Verkehrsstärken (von etwa 5000 Kfz/24h je Fahrstreifen) als auch bei langen Umfahrungen der CO<sub>2</sub>-Anteil aus den bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen höher als der Anteil aus der Bauwerkserstellung. Dies deckt sich grundsätzlich mit den Untersuchungen aus [3,15].

## 6 Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen

### 6.1 Allgemeines

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse zusammengestellt, wie sich der CO<sub>2</sub>-Bedarf von Brückenbauwerken reduzieren lässt. Die Empfehlungen sind schrittweise aufbereitet:



**Bild 10** CO<sub>2</sub>-Emission/Woche infolge bauzeitlicher Verkehrsbeeinträchtigung: a) Fall Komplettspernung und Umleitung, b) Einrichten einer 2+0-Verkehrsführung bei einer vierspurigen Straße  
CO<sub>2</sub> emissions/week as a result of traffic disruption during construction: a) case of complete closure, b) diversion setting up 2+0 traffic routing on a four-lane road

1. Grundsätzliche Empfehlungen in Abschn. 6.2
2. Empfehlungen zur Auswahl des Bauwerkstyps in Abschn. 6.3
3. Hinweise zur Optimierung der Baustoffe in Abschn. 6.4
4. Kompensationsmaßnahmen in Abschn. 6.5

## 6.2 Grundsätzliche Empfehlungen

### 6.2.1 Lange Lebensdauer

Grundsätzlich lässt sich durch eine möglichst lange Lebensdauer der größtmögliche Nutzen bezüglich der CO<sub>2</sub>-Bilanz erzielen. Einerseits werden baubedingte Stausituationen vermieden und zum anderen haben auch die Ergebnisse der Untersuchung in Abschn. 4.2 gezeigt, dass hinsichtlich des reinen Bauwerks fast 90 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung in der Phase A anfallen. Durch eine Anhebung der Lebensdauer von 100 auf 150 Jahre könnte der jährliche CO<sub>2</sub>-Bedarf eines Bauwerks, wegen der geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Nutzungsphase, fast linear um 1/3 reduziert werden. Bei Betonbrücken hat dies im Regelfall allenfalls eine etwas größere Betondeckung zur Folge; das muss die Bauteilabmessungen nicht zwingend tangieren, die Bewehrung rutscht ggf. geringfügig weiter nach innen. Die Zunahme der Lastwechsel sollte bei Beton- bzw. Verbundbrücken ebenfalls nicht zu geänderten Querschnittsabmessungen führen, Stahlbrücken kommen bis 40m Länge tendenziell vornehmlich bei Fuß- und Radwegbrücken zur Anwendung, bei denen die Ermüdung keine Rolle spielt.

Bei Instandsetzungsbedürftigen Bestandsbrücken sollte im Zuge der Abwägung einer Ertüchtigung gegen einen Ersatzneubau – soweit technisch möglich – eine Instandsetzung bzw. Ertüchtigung vorgenommen werden. Ausnahmen können sich ergeben, wenn daraus ggf. ein derart kleinteiliges und langwieriges Arbeiten resultiert, das hieraus längerfristige Stausituationen entstehen. Das lässt sich anhand einer CO<sub>2</sub>-Bilanz untersuchen.

### 6.2.2 Sicherstellung des Verkehrsflusses

Die Ergebnisse in Abschn. 5 haben gezeigt, dass gerade bei hohen Verkehrsstärken von ca. 20.000 Kfz/24 h, also auf Autobahnen oder dicht befahrenen Bundesstraßen, der CO<sub>2</sub>-Anteil aus den bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen die CO<sub>2</sub>-Emission aus der Bauwerkserstellung deutlich übersteigen kann. Daher gilt es hier als oberste Priorität, die bauzeitlichen Einschränkungen auf ein Minimum zu begrenzen und die Bauverfahren so zu planen, dass die Bauzeit auf ein Mindestmaß begrenzt bleibt. Idealerweise kommen hier Bauverfahren zum Einsatz, die üblicherweise bei der Querung von Bahnstrecken angewendet werden. Hier werden Bauteile zur Einhaltung der engen Sperrzeiten im Regelfall soweit möglich vorgefertigt und eingehoben (Bild 11). Hingewiesen sei auch auf die innovativen Ideen zum Brückenschnellbau der Firma Echterhoff [15].

Ebenso ist es im Hinblick auf den Verkehrsfluss und damit auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz sinnvoll, jegliche Bauwerksteile möglichst aus dem Verkehrsbereich fernzuhalten. Gerade Autobahnen oder dicht befahrene Bundesstraßen sollten zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen z. B. durch integrale Bauweisen möglichst ohne Mittelpfeiler überquert werden. In [8] durchgeführte Berechnungen zeigen, dass sich ein stützenfreies integrales Brückenbauwerk in etwa CO<sub>2</sub>-neutral im Vergleich zu einer gelagerten Brücke mit Mittelstütze verhält. Der Vorteil ist allerdings, dass sich durch den Wegfall der Mittelstütze die staubedingten CO<sub>2</sub>-Anteile reduzieren; das gilt sowohl für die Herstellungs- und spätere Rückbausituation des Mittelpfeilers als auch für die Nutzungsphase, da der etwaige Mittelpfeiler im Zuge von Bauwerksprüfungen handnah begutachtet werden muss und auch ein typischer Angriffspunkt für Tausalzeintrag mit entsprechender Instandsetzungserfordernis ist. Sowohl die Bauwerksprüfung als auch etwaige Instandsetzungen ziehen CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge von Stausituationen nach sich. Durch den Verzicht des Mittelpfeilers sollte sich der Anteil aus den bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen gegenüber einer klassischen Herstellung mit halbseitiger Sperrung und 4 + 0-



a)



b)

**Bild 11** a) Einheben vorgefertigter Brückenträger während nächtlicher Vollspernung, b) bauzeitliche Verkehrsbeeinträchtigung bei Instandsetzung eines Mittelpfeilers  
a) Lifting in prefabricated bridge girders during full closure in the night, b) traffic disruption during repair of a centre column

Verkehrsführung um mindestens 60 % reduzieren lassen.

## 6.3 Auswahl der Konstruktion

### 6.3.1 Generell

Bei den Brückenbauwerken, die neu geplant werden, sollte versucht werden, den CO<sub>2</sub>-Anteil der Konstruktion auf ein geringstmögliches Maß zu reduzieren. Sofern es von den geometrischen Abmessungen her möglich ist, wird im Regelfall bei einem Wellstahldurchlass deutlich weniger CO<sub>2</sub> emittiert als bei konventionellen Balkenbrücken. Das ist in den geringen Mengen an industriell hergestellten Baustoffen begründet.

Für alle anderen Fälle werden im Folgenden Vorschläge zur Ausbildung der Widerlager bzw. zum Überbau gemacht.

### 6.3.2 Ausbildung der Widerlager

Optimierung der Betonabmessungen:

Die Ergebnisse der Berechnungen in Abschn. 4.4 zeigen, dass gerade bei Brücken mit einer Länge von weniger als 40m der wesentliche Anteil des CO<sub>2</sub> durch die Herstellung der Widerlager verursacht wird. Da der zentrale Grund in der massiven Stahlbetonbauweise liegt, besteht hier entsprechendes Potenzial, die CO<sub>2</sub>-Bilanz durch eine Optimierung des Materialverbrauchs zu reduzieren.

Im Zuge der Bearbeitung wurden insgesamt neun konkrete Planungen von Brücken durchgesehen und anhand statischer Vergleichsrechnungen Folgendes festgestellt:

- Bei den durchgeführten Vergleichsrechnungen konnten die Betonabmessungen der Widerlager vielfach um ca. 20 % reduziert werden, ohne dass dies zu einer

signifikanten bzw. grenzwertigen Erhöhung der Stahlbewehrungsmenge geführt hätte.

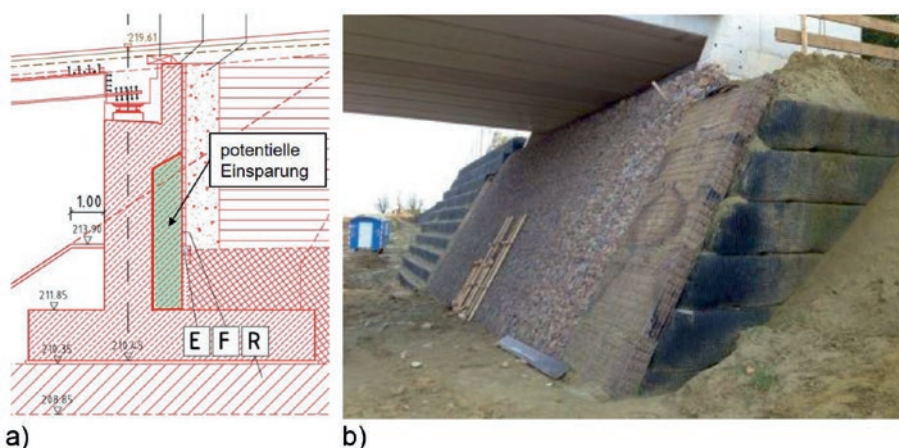
- Wesentliches Einsparpotenzial liegt gemäß den durchgeführten Untersuchungen v.a. in der Widerlagerwand. Hier können die üblichen Dicken von 1,5m bis 2,0m auf Werte um ca. 1,20m reduziert werden – das sind CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Bereich von 25 % bis 40 %.
- Gerade bei der Widerlagerwand wird die Dicke vielfach geometrisch aus der Kammerwand entwickelt, so dass sich an der Rückseite des Widerlagers eine durchgehende bzw. gerade Schalkante ergibt, was baupraktisch eine einfache Lösung darstellt. Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz wäre es jedoch zielführender, die Massen auf die tatsächlich statisch erforderliche Soll-Geometrie zu begrenzen (Bild 12a). Hierdurch lassen sich (je m Breite) ca. 2,5m<sup>2</sup> Stahlbeton bzw. 750kgCO<sub>2</sub> einsparen.

Grundsätzlich waren bei den betrachteten Beispielen allein durch die Reduzierung der Betonmassen CO<sub>2</sub>-Einsparungen von ca. 20 % möglich. Weitere nennenswerte Einsparpotenziale ergeben sich, wenn im Folgenden die Betonrezeptur, in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz, optimiert wird (Abschn. 6.4).

Einbezug innovativer Bauweisen:

Grundsätzlich kann es auch sinnvoll sein, im Bereich der Widerlager zur CO<sub>2</sub>-Einsparung innovative Bauweisen in Betracht zu ziehen. Hierzu einige Beispiele:

- Widerlager aus bewehrter Erde  
In den letzten Jahren sind sowohl in den Niederlanden als auch in Deutschland einige Pilotprojekte realisiert worden, bei denen Betonwiderlager durch eine Konstruktion aus bewehrter Erde ersetzt wurden (Bild 12b) [20–22], wobei das Bodenmaterial, bei den in Deutschland realisierten Projekten, durch ein Zement-Kalk-Bindemittel Dorosol ergänzend stabilisiert wurde. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass sich durch diese Bauweise gerade bei schmalere Brücken mit Breiten zwischen 6,0m und 8,5m etwa 20 % CO<sub>2</sub> einsparen lassen.



**Bild 12** a) Einsparmöglichkeit von Betonmenge an der Rückseite der Widerlagerwand, b) Ansicht eines ausgeführten Widerlagers mit bewehrter Erde (Quelle: HUESKER)  
a) Potential savings in the amount of concrete on the back of bearing of the bridge, b) view of a constructed abutment with reinforced earth

sen. Bei größerer Breite reduziert sich der Effekt wegen der großen Mengen an Bindemittel zunehmend. Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz besteht deutliches Einsparpotenzial, wenn ggf. auch in Deutschland auf die Stabilisierung verzichtet oder diese zumindest in Hinsicht auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz optimiert werden kann. Hierbei ist die Setzung sorgsam zu untersuchen.

- Widerlager aus Gabionenwänden für leichte Fuß- und Radwegbrücken

Auch wenn es hierzu bislang keine Ausführung gegeben hat, lassen sich gemäß durchgeführten Voruntersuchungen leichte Überbauten (z. B. in Holzbauweise bis ca. 20 m Spannweite) auf Widerlagern aus Gabionenkonstruktionen lagern. Die Gabionenwand sollte am Kopf durch den Überbau horizontal gelagert und zur Reduzierung von Setzungen an der Oberseite nicht zu hoch beansprucht werden. Generell ist die Konstruktion so auszubilden, dass Langzeitsetzungen im Bereich von 2 cm bis 3 cm tolerabel sind.

Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich die CO<sub>2</sub>-Werte eines Stahlbetonwiderlagers, mit Werten im Bereich von 1,6 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Ansichtsfläche, auf ca. 0,4 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> reduzieren lassen. Selbst wenn die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Verzinkung der Gabionen lediglich im Bereich von 40 bis 50 Jahren liegt, wäre das eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von 75 %.

- Sonderfall: Brücke mit geringem freizuhaltendem Lichtraumprofil (z. B. über Bach)

Im Falle einer Brücke, bei der kein großes Lichtraumprofil zu unterführen ist, wie z. B. bei der Überquerung eines Bachs, scheint es technisch durchaus möglich, ein Widerlager auch aus Naturstein zu realisieren. Die CO<sub>2</sub>-Emission von Naturstein beträgt etwa 30–35 % der Werte von Beton, mit entsprechendem Gestein (z. B. Granit) lassen sich Festigkeiten von bis zu 300 N/mm<sup>2</sup> erzielen. Gegebenenfalls muss zur Vermeidung von Spannungsspitzen eine umlaufende bewehrte Betonschale betoniert werden. Bei rein druckbeanspruchten Konstruktionen mit lichten Höhen im Bereich von 1,0 m bis 1,50 m scheint eine Anwendung umsetzbar. Der CO<sub>2</sub>-Bedarf dürfte sich (trotz dünner Stahlbetonschale) etwa halbieren.

### 6.3.3 Ausbildung des Überbaus

Straßenbrücken:

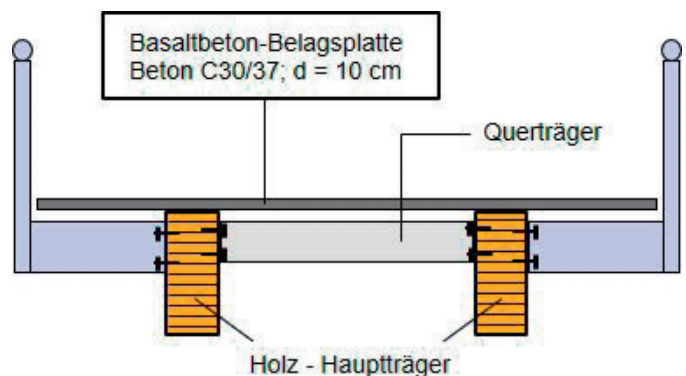
Gemäß den durchgeführten Untersuchungen liegt der CO<sub>2</sub>-Bedarf für Überbauten in Stahl- und Betonbauweise im Bereich von ca. 375 kg/m<sup>2</sup> Brückenfläche. Eine eindeutige Präferenz einer bestimmten Bauweise war nicht festzustellen. Auch eine Holz-Beton-Verbundbauweise bringt gemäß den durchgeführten Untersuchungen keinen Vorteil. Üblicherweise ist bei Straßenbrücken statisch (bzw. zur Sicherstellung des konstruktiven Holzschutzes) eine entsprechende Stahlbetonplatte erforderlich, sodass die CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Bereich von maximal 15 % liegen. Bei einer verminderten Lebensdauer kann die Holz-Beton-Verbundbrücke sogar höhere

CO<sub>2</sub>-Emissionen nach sich ziehen. Von daher wird hier eher Potenzial darin gesehen, die Baustoffe Beton und Stahl hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz zu optimieren (Abschn. 6.4).

Fuß- und Radwegbrücken:

Aufgrund der geringeren Verkehrslasten ist bei Fuß- und Radwegbrücken ein deutlich größerer Gestaltungsspielraum möglich als bei Straßenbrücken. Daher lassen sich hier Überbauten realisieren, deren CO<sub>2</sub>-Anteil die mittleren Werte von ca. 190 kg/m<sup>2</sup> deutlich unterschreitet. Hierzu folgende Beispiele:

- Sofern sich durch einen ausreichenden konstruktiven Holzschutz eine Lebensdauer von zumindest 40 Jahren sicherstellen lässt, lassen sich Fuß- und Radwegbrücken in Holzbauweise mit sehr geringen CO<sub>2</sub>-Emissionen realisieren. Nach den hier vorgestellten Untersuchungen lässt sich die CO<sub>2</sub>-Emission bei einer Lebensdauer zwischen 40 und 60 Jahren um etwa 45–60 % reduzieren.
- Bei klassischen Beton- und Stahlbauweisen ziehen möglichst materialoptimierte Bauweisen die geringsten CO<sub>2</sub>-Emissionen nach sich. Hier sind Varianten bestehend aus Längs- und Querträgern mit Holzbohlenbelag statt Deckblech die CO<sub>2</sub>-reduziertesten Konstruktionen, wenngleich diese Brückenart wegen der Vielzahl der Korrosionsschutzflächen und des Feuchtigkeitsangriffs von oben für die bauliche Erhaltung weniger wünschenswert ist.
- Aufgrund der geringeren Verkehrslast besteht bei Fuß- und Radwegbrücken deutlich mehr Gestaltungsspielraum, den man ggf. gezielt nutzen kann, um die CO<sub>2</sub>-Bilanz zu reduzieren. Hier einige Möglichkeiten:
  - Brücke aus Brettschichtholzträgern, bei der die Quertragwirkung und der konstruktive Holzschutz durch eine filigrane Betonplatte mit Basaltfaserbewehrung sichergestellt ist (Bild 13). Nach eigenen Berechnungen liegt die CO<sub>2</sub>-Emission hier bei etwa 80 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche.
  - Eine alternative unkonventionelle Bauweise ist auch die Bauweise aus vorgespannten Natursteinblöcken. In Paderborn konnte hiermit eine Brücke mit einer



**Bild 13** Entwurf Fuß- und Radwegbrücke aus BSH-Längsträgern mit Gehwegplatte aus Basaltbeton  
Design of a foot and bicycle bridge made of glued lam longitudinal beams with a slab with basalt reinforcement

Spannweite von über 18m realisiert werden. Sofern die Transportwege nicht zu groß werden, ist für den Überbau ein CO<sub>2</sub>-Bedarf im Bereich 100–110 kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche zu erwarten.

- Ebenso können unter CO<sub>2</sub>-Aspekten materialoptimierte Fuß- und Radwegbrücken aus Textilbeton eine geeignete Alternative sein. Aufgrund der besseren CO<sub>2</sub>-Bilanz sollte hierbei überprüft werden, ob gegenüber der aktuell sehr verbreiteten Carbonbewehrung ggf. eine Basaltbewehrung eine technisch und ökologisch sinnvolle Alternative sein kann. Untersuchungen in [23] weisen für Basaltfaserstabbe- wehrungen geringere CO<sub>2</sub>-Emissionen aus.

### 6.3.4 Ausstattung

Straßenbrücken:

Die Ausstattung sollte möglichst wartungsarm sein. Bei Brückenkappen kann bspw. eine nichtmetallische Bewehrung die Lebensdauer erhöhen, Untersuchungen hierzu werden aktuell in [24] durchgeführt; der CO<sub>2</sub>-Anteil der Brückenkappen beträgt ca. 30–35 % der gesamten Ausstattung.

Bei den Fahrzeugrückhaltesystemen weisen die Systeme aus Stahl i. Allg. geringere CO<sub>2</sub>-Aufwendungen auf.

Fuß- und Radwegbrücken:

Bei Fuß- und Radwegbrücken nimmt die Ausstattung einen deutlich höheren Anteil an der CO<sub>2</sub>-Bilanz ein, darüber hinaus ist die Spannweite der Möglichkeiten größer als bei Straßenbrücken. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen lässt sich Folgendes festhalten:

- Als Belag weisen v.a. die Kunststoffbeläge wie ein GFK-Bohlenbelag oder ein RHD-Belag (reaktions- harzgebundener Dünnbettbelag) sehr hohe CO<sub>2</sub>-Aufwendungen auf, die fast im Bereich der Tragkonstruktion liegen. Diese sollten im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Bilanz vermieden werden.
- Als flächiger Belag bietet sich ein Asphaltbelag an, bei einem Bohlenbelag eine Ausführung in Holzbauweise, auch wenn diese eine deutlich geringere Lebensdauer aufweist als GFK-Bohlen.

## 6.4 Optimierung der Baustoffe

Die Ergebnisse der Untersuchungen in Abschn. 4.3 haben gezeigt, dass bei Brückenkonstruktionen ca. 80 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf die Baustoffe Beton und Stahl zurückzuführen sind. Auch wenn sich zukünftig alternative Bauweisen etablieren, werden Beton und Stahl die Hauptbaustoffe bleiben. Da beide sehr CO<sub>2</sub>-intensiv sind, gilt es, diese entsprechend zu optimieren. Hierzu sind im Folgenden einige zentrale Punkte zusammenge- stellt:

Beton:

Der mit ca. 90 % zentrale CO<sub>2</sub>-Treiber im Beton ist der Zement und hierbei im Speziellen der Portlandzement- klinker. Zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Anteils ist es erforder- lich, den Portlandzement durch andere alternative Binde- mittel zu ersetzen, wobei Festigkeit und Dauerhaftigkeit weiterhin zielsicher erreicht werden müssen. Hierbei ist die effektivste Variante, Portlandzement anteilig durch Hüttensand zu ersetzen, der als Abfallprodukt bei der Roheisenherstellung anfällt. Aktuell ist in Deutschland der Zement CEM II/A mit einem Hüttensandanteil von ca. 6 % bis 20 % am verbreitetsten. Durch Verwendung eines CEM III/A mit einem Hüttensandanteil von 36 % bis 65 % lässt sich der CO<sub>2</sub>-Anteil kostenneutral und ohne Qualitätseinbußen um 30 % reduzieren. Hohe An- teile von Hüttensandzement haben durchaus eine längere Festigkeitsentwicklung und Nachbehandlungsdauer zur Folge, bei einem Hüttensandanteil von 65 % sind die Werte jedoch vergleichbar mit Beton, der mit Portlandze- ment hergestellt wurde [25].

Stahl:

Für die Herstellung 1 t Stahl werden ca. 1,7 tCO<sub>2</sub> freige- setzt. Das ist im Wesentlichen auf thermische und chemi- sche Prozesse bei der Herstellung im Hochofen zurückzu- führen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Stahlproduktion kön- nen erheblich reduziert werden, wenn dieser nicht im Hochofen, sondern mittels Recyclingstahl und Eisen- schwamm durch das Elektrolichtbogenverfahren produ- ziert wird. Hierzu wird zwar sehr viel Strom benötigt, die- ser kann jedoch zur Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Bedarfs mit ei- nem möglichst hohen regenerativen Anteil erzeugt werden. Ein beispielhaftes Produkt dafür sind die „XCarb-recycelt und erneuerbar hergestellt“-Stähle von ArcelorMittal, die gemäß Herstellerangaben (Stand 2021) mit 100 % recyceltem Material (Stahlschrott) und erneuerbarem Strom produziert werden. Hierdurch wer- den in der Herstellungsphase statt der üblichen 1125 kgCO<sub>2</sub>/t Stahl nur etwa 330 kgCO<sub>2</sub> emittiert. Über alle Phasen hinweg beträgt die CO<sub>2</sub>-Bilanz 1 t XCarb- Stahl lediglich 550 kgCO<sub>2</sub>.

Eine weitere Möglichkeit der CO<sub>2</sub>-Reduzierung ist die Verwendung von Stahl mit höherer Festigkeit (wie z.B. S460, S690, S960). Hierdurch ist zur Erzielung der glei- chen Tragfähigkeit weniger Material erforderlich, was so- mit zu geringeren CO<sub>2</sub>-Emissionen führt. Beispielsweise lässt sich bei einer Stahlverbundkonstruktion die Stahl- tonnage von ca. 250 kg/m<sup>2</sup> bei Verwendung von S355 auf ca. 150 kg/m<sup>2</sup> für S460 verringern. Voraussetzung ist je- doch, dass die Durchbiegung nicht zu groß wird, weil der materialoptimierte Querschnitt sich deutlicher verformt.

Gemäß Vergleichsrechnungen kann der CO<sub>2</sub>-Bedarf von Stahlüberbauten durch den Einsatz von CO<sub>2</sub>-reduzierten Stahlprodukten mit höherer Streckgrenze von etwa 440 kg/m<sup>2</sup> (Kennwerte in Bild 7) auf ca. 180 kg/m<sup>2</sup> gesenkt

werden und im Fall einer Stahlverbundbrücke von 400 kg/m<sup>2</sup> auf ca. 285 kg/m<sup>2</sup>.

## 6.5 Kompensation von CO<sub>2</sub>-Emission durch Photovoltaikmodule

Die in den Abschn. 6.1–6.4 beschriebenen Maßnahmen zielen alle darauf ab, den unvermeidlichen CO<sub>2</sub>-Anteil, den die Herstellung von Bauwerken erfordert, bestmöglich einzugrenzen. Eine darüber hinausgehende Möglichkeit besteht darin, den CO<sub>2</sub>-Bedarf durch Integration von Photovoltaikmodulen teilweise zu kompensieren. Der Strombedarf kann durch das Brückenbauwerk im Regelfall selbst nicht verwendet (allenfalls für die Straßenbeleuchtung), allerdings als überschüssige Energie ins Netz einspeist werden. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden hierzu die folgenden Lösungen untersucht, die Photovoltaikmodule in das Brückenbauwerk zu integrieren:

- Integration im Geländer,
- Integration seitlich mit 30° Neigung zur Horizontalen (Bild 14),
- Module als Straßenbelag mit speziellen Solar-Straßen-Modulen (z. B. Produkt Solmove (www.solmove.com)).

In Abhängigkeit von der Ausrichtung der Elemente lassen sich für ein verbautes Modul mit ca. 1,6 m<sup>2</sup> Fläche etwa 300 kW Strom im Jahr erzeugen. Unter Berücksichtigung, dass gemäß aktuellem Strommix (Stand 2021) je kWh Strom etwa 0,485 kgCO<sub>2</sub> verbraucht werden, könnten hiermit je Modul 145 kgCO<sub>2</sub>/a eingespart werden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Strommix sich mittelfristig verändern wird. Werden als Mittelwert über die Lebensdauer 0,175 kgCO<sub>2</sub>/kWh angesetzt (prognostizierter Wert der dena-studie [13] für das Jahr 2035), wären es lediglich 5 kgCO<sub>2</sub>/a. Weiterhin sind Ertragsverluste, die sich aus dem Stromtransport, Verlusten durch die Photovoltaik-Wechselrichter und alterungsbedingte Leistungsminderungen ergeben, zu berücksichtigen sowie auch der CO<sub>2</sub>-Bedarf, der zur Herstellung der Photovoltaikmodule sowie deren Befestigung erforderlich ist.

Die durchgeführten Vergleichsrechnungen ergeben, dass sich, trotz Einrechnung der Verluste, mit den seitlich an-

geordneten Elementen ein Einsparpotenzial von ca. 10–20 kgCO<sub>2</sub>/a/m Brücke ergibt, das sind bei einer 4 m breiten Brücke bei einer Lebensdauer von 100 Jahren 0,4 tCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> Brückenfläche.

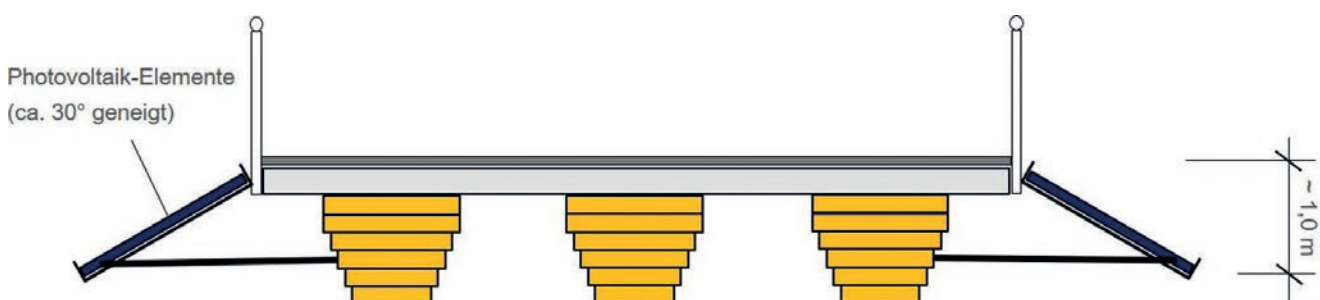
## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen eines von der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH (EKSH) geförderten Forschungsvorhabens [8] wurden CO<sub>2</sub>-Bilanzierungen an insgesamt 480 Brückenbauwerken durchgeführt. Zielsetzung war es, einen Überblick zu gewinnen, welche Brückenkonstruktion wie viel CO<sub>2</sub> emittiert, und Vorschläge auszuarbeiten, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduzieren lassen.

Grundsätzlich hat die Bearbeitung des Forschungsvorhabens gezeigt, dass die Optimierung hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Bilanz nicht trivial ist. Eine signifikante Reduzierung kann nur unter den folgenden Bedingungen funktionieren:

- 1) Die CO<sub>2</sub>-Emission muss mit realistischen Klimafolgekosten eingepreist werden. Das Umweltbundesamt gibt hierzu bei einer Gleichgewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünftiger Generationen einen Preis von 680 Euro/tCO<sub>2</sub> an [26]. Bei einer mittleren CO<sub>2</sub>-Emission einer Straßenbrücke von 1,4 t/m<sup>2</sup> wären das Zusatzkosten von fast 1000 Euro/m<sup>2</sup> Brückenfläche.
- 2) Für die Planung müssen konkrete CO<sub>2</sub>-Obergrenzen (in CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> oder CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·a)) definiert und die Reduzierung als ein zentraler Planungsparameter eingefordert werden. Als sinnvolle Obergrenze können bspw. die unter Abschn. 4.6 ermittelten Status-quo-CO<sub>2</sub>-Werte verwendet werden, abzüglich eines als realisierbar eingeschätzten Optimierungspotenzials von 30 % (Maßnahmen aus Abschn. 6). Die Einhaltung der Werte ist durch ein enges CO<sub>2</sub>-Controlling über alle Planungs- und Bauphasen zu überwachen.
- 3) Die CO<sub>2</sub>-Berechnungen und Optimierungen müssen als besondere Leistung vergütet werden.

Nur so wird es zukünftig gelingen, die Kreativität der Planungsbüros und Ausführenden zu wecken und somit schrittweise den CO<sub>2</sub>-Bedarf zu senken.



**Bild 14** Darstellung Photovoltaikmodule seitlich integriert  
Illustration of photovoltaic elements integrated on the side

## Literatur

- [1] Sobek, W. (2022) *Non nobis – über das Bauen in der Zukunft – Ausgehen muss man von dem, was ist*. 3. Aufl. Stuttgart: avedition.
- [2] Weidner, S. et al. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- [3] Schmidt-Thrö, G. et al. [Hrsg.] (2016) *Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus*. Bremen: Fachverlag NW.
- [4] Zinke, T. (2016) *Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken. Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte* [Dissertation]. Karlsruher Institut für Technologie.
- [5] Kuhlmann, U. et al. (2016) *Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit*.
- [6] Kuhlmann, U. et al. (2019) *Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit*.
- [7] Mancke, R.; Gebert, G. (2022) *Ökobilanzielle Bewertung von alternativen Bauweisen am Beispiel eines typischen Überführungsbauwerks im Zuge von Autobahnen*. Bautechnik 99, H. 7, S. 533–546. <https://doi.org/10.1002/bate.202200051>
- [8] Görtz, S.; Pham, T. K. D. (2023) *CO<sub>2</sub>-Bilanzierung und Optimierung von Brückenbauwerken*. Forschungsvorhaben am Institut für Bauwesen der FH Kiel, gefördert durch die Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH.
- [9] Bundesamt für Justiz (2010) *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz – Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV*.
- [10] Gerold, M. (2005) *Unterhaltungskosten und Lebensdauer geschützter Holzbrücken* [online]. Düsseldorf: Informationsverein Holz e.V. [https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3\\_Spezial/Spezial\\_Unterhaltungskosten\\_und\\_Lebensdauer\\_geschuetzter\\_Holzbruecken\\_2005.pdf](https://informationsdienst-holz.de/fileadmin/Publikationen/3_Spezial/Spezial_Unterhaltungskosten_und_Lebensdauer_geschuetzter_Holzbruecken_2005.pdf) [Zugriff am: 16. Oktober 2023]
- [11] Miebach Ingenieurbüro (o.J.) *Die Lebensdauerbetrachtung von Holzkonstruktionen und Brücken* [online]. Lohmar: IB-MIEBACH – Ingenieurbüro für Holzbau und Holzbrückenbau. <https://www.ib-miebach.de/de/ingenieurholzbau/lebensdauerbetrachtung> [Zugriff am: 15. Mai. 2023]
- [12] Mielecke, T. et al. [Hrsg.] (2016) *Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit*. Bremen: Fachverlag NW.
- [13] dena (2018) *dena-Leitstudie Integrierte Energiewende – Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050 – Ergebnisbericht und Handlungsempfehlungen*. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH. [https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262\\_dena-Leitstudie\\_Integrierte\\_Energiewende\\_Ergebnisbericht.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9262_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_Ergebnisbericht.pdf)
- [14] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (2023) *ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen* [online]. Berlin: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. <https://www.oekobaudat.de> [Zugriff am: 16. September 2023]
- [15] Reddemann, T. (2022) *Brückenschnellbau – Konzepte, Randbedingungen und Beispiele*. Fachtagung „Brücken im Fokus 2022“. Ingenieurakademie West. Düsseldorf, 9./10. Dez. 2022.
- [16] Kords, M. (2022) *Anzahl der Personenkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten von 2017 bis 2022*.
- [17] Fitschen, A.; Nordmann, H. (2021) *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen*. Bremen: Fachverlag NW in Carl Ed. Schünemann KG.
- [18] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2015) *Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen – HBS*. Köln: FGSV Verlag.
- [19] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (1997) *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)*. Köln: FGSV Verlag.
- [20] HUESKER Synthetic GmbH (2019) *Pilotprojekt Stokkumer Straße – Ersatzneubau der Brücke Stokkumer Straße über die A3 bei Emmerich*.
- [21] HUESKER Synthetic GmbH (2021) *Projekt Ersatzneubau im Zuge der L182 über den Swistbach bei Heimerzheim*.
- [22] HUESKER Synthetic GmbH (2022) *Projekt Ersatzneubau der Erftbrücke im Zuge der B56 in Euskirchen*.
- [23] Görtz, S.; Lengert, K.; Haack, R. (2023) *Tragfähigkeit und Anwendungen von Betonbauteilen mit Bewehrung aus basaltfaserverstärktem Kunststoff*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 8, S. 607–625. <https://doi.org/10.1002/best.202300042>.
- [24] Kustermann, A. et al. (2021) *Entwicklung ressourcenschonender, dauerhafter und frostbeständiger Brückenkappen auf Grundlage nichtmetallischer Bewehrung und Betonen mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung*. ZIM-Projekt KK5102701KI0.
- [25] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (2021) *Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb)*.
- [26] UBA (2020) *Methodenkonvention 3.2 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

## Autor:innen

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz (Korrespondenzautor:in)  
[stephan.goertz@fh-kiel.de](mailto:stephan.goertz@fh-kiel.de)  
 Fachhochschule Kiel  
 Institut für Bauwesen  
 Grenzstraße 3  
 24149 Kiel

Thi Kim Dung Pham, M.Sc.  
[kim-dung.pham@fh-kiel.de](mailto:kim-dung.pham@fh-kiel.de)  
 Fachhochschule Kiel  
 Institut für Bauwesen  
 Grenzstraße 3  
 24149 Kiel

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Görtz, S.; Pham, T. K. D. (2024) *CO<sub>2</sub>-Berechnungen von Brücken mit Bauwerkslängen bis 40m*. Bautechnik 101, H. 2, S. 87–104. <https://doi.org/10.1002/bate.202300098>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 17. Oktober 2023; angenommen: 19. Dezember 2023.



**Fachhochschule Kiel**

Institut für Bauwesen (IfB)

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz

Grenzstraße 3 • 24149 Kiel

Telefon: +49 431 2104600

Telefax: +49 431 21064600

E-Mail: [ifb@fh-kiel.de](mailto:ifb@fh-kiel.de)

[www.fh-kiel.de](http://www.fh-kiel.de)