

CO₂-Bilanzierung und Optimierung von Brückenbauwerken

Institutsbericht Nr. KI – 23 / 01
des Instituts für Bauwesen
der Fachhochschule Kiel

Erstellt von: Institut für Bauwesen der Fachhochschule Kiel
Professor Dr.-Ing. Stephan Görtz
Thi Kim Dung Pham, M. Sc.

Mit Unterstützung: Ingenieurbüro Mohn GmbH
Bahnhofstraße 16, 24109 Melsdorf
Dipl.-Ing. Andreas Mohn

Gefördert durch: EKSH
(Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH)



Kiel, 15.09.2023

Danksagung

An dieser Stelle möchten wir uns sehr herzlich beim

- Landesbetrieb für Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein (LBV) sowie dem
- Tiefbauamt der Stadt Kiel

bedanken, die dem Projekt beratend zur Verfügung standen sowie Planunterlagen zur Verfügung gestellt haben. Insbesondere der LBV hat zwecks Recherche Einsicht in sein Archiv gewährt.

Weiterhin möchten wir uns bei den folgenden Unternehmen bedanken, die uns Planunterlagen zur Verfügung gestellt haben bzw. Massenansätze mit uns diskutiert haben.

- Ingenieurbüro Miebach
- Leonhardt, Andrä und Partner – Beratende Ingenieure VBI AG
- Neuser Ingenieure, beratende Ingenieure Hoch- und Brückenbau PartG mbB
- Prof. Dr.-Ing. H. Bechert + Partner - Ingenieurbüro für Bauwesen

Unser besonderer Dank gilt der Gesellschaft für Energie und Klimaschutz Schleswig-Holstein GmbH für die Förderung des Projektes.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1. Ausgangssituation und Zielsetzung	5
1.1 Ausgangssituation	5
1.2 Zielsetzung	5
2. Erläuterung der Vorgehensweise	6
3. Grundlagen der CO ₂ -Berechnungen	7
3.1 Allgemeines	7
3.2 Vorschriften	7
3.2.1 Grundlagen für die Dimensionierung der Brückenbauwerke	7
3.2.2 Grundlagen für die CO ₂ -Berechnung	7
3.2.3 Zu beachtende Regelungen bei der CO ₂ -Bilanzierung	9
3.3 Untersuchungsumfang	10
3.4 Zur Verfügung gestellte Brückenbauwerke	12
3.5 Mengenangaben für typische parametrisierte Brückenbauwerke	13
3.5.1 Mengenangaben für typische Straßenbrücken	13
3.5.2 Mengenangaben für typische Fußgänger- und Radwegbrücken	15
3.6 Nutzungsdauer von Bauelementen	17
4. CO ₂ -Berechnungen vorhandener Bauwerke (Status Quo)	20
4.1 Allgemeines	20
4.2 Erläuterung der konkreten Vorgehensweise an einer Beispielberechnung	20
4.3 Analyse der Gesamt-CO ₂ -Emission der Brückenbauwerke	30
4.3.1 CO ₂ -Emission bezogen auf die Brückenfläche	30
4.3.2 Analyse der CO ₂ -Emission über die Lebensdauer	31
4.3.3 Abhängigkeit der CO ₂ -Emission von Baustoffen	32
4.3.4 Abhängigkeit der CO ₂ -Emission von geometrischen Grundparametern	34
4.4 CO ₂ -Emission der Unterbauten und Gründung	36
4.4.1 Allgemeines	36
4.4.2 CO ₂ -Emission der Unterbauten und Gründung von Straßenbrücken	36
4.4.3 CO ₂ -Emission der Unterbauten und Gründung von Fuß- und Radwegbrücken ..	38
.....	38
4.5 CO ₂ -Emission der Überbauten	40
4.5.1 Allgemeines	40
4.5.2 CO ₂ -Emission der Überbauten von Straßenbrücken	40
4.5.3 CO ₂ -Emission der Überbauten von Fuß- und Radwegbrücken	41
4.5.4 CO ₂ -Emissionsanteile der Beläge und Ausstattung	43

4.6	Ergänzende Detailuntersuchungen	45
4.6.1	Allgemeines	45
4.6.2	CO ₂ -Vergleich einer integralen Brücke mit einer konventionell gelagerten Lösung	45
4.6.3	Zurückgesetzte Widerlager.....	47
4.6.4	Vergleich Stahlbetonwiderlager mit Spundwandwiderlager	49
4.6.5	Sonderfall Wellstahldurchlass	51
4.7	Zusammenfassung der Ergebnisse und Ableitung von Anhaltswerten für die CO ₂ -Emissionen von Brückenbauwerken für die Leistungsphasen 0 und 2	53
4.8	Untersuchung des Einflusses der „Energiewende“ auf die ermittelten CO ₂ -Emissionen	56
4.9	Einfluss der verkehrsbedingten CO ₂ -Anteile.....	58
5.	Untersuchung von Optimierungsvorschlägen hinsichtlich der CO ₂ -Bilanz.....	61
5.1	Allgemeines.....	61
5.2	Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Widerlager	62
5.2.1	Allgemeines	62
5.2.2	Massenmäßige Optimierung von Betonwiderlagern	62
5.2.3	Alternative Variante: Widerlager aus bewehrter Erde	63
5.2.4	Alternative Variante: Gabionenwiderlager	66
5.3	Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Überbauten	68
5.3.1	Allgemeines	68
5.3.2	Holz-Beton-Verbund-Brücke mit demontabler Betonplatte.....	68
5.3.3	Untersuchung eines Überbaus aus textilbewehrtem Beton.....	69
5.3.4	Untersuchung der Kombination aus Brettschicht-Holz-Längsträger und Basaltplatte	70
5.3.5	Fuß- und Radwegbrücken aus vorgespannten Natursteinblöcken.....	71
5.4	Optimierung der Hauptbaustoffe.....	72
5.4.1	Allgemeines	72
5.4.2	Beton	72
5.4.3	Baustahl und Betonstahl	74
5.4.4	Aspekte zum Holz	75
5.5	Untersuchung zur Kompensation des CO ₂ -Anteils durch Photovoltaik-Elemente ...	76
6.	Zusammenstellung der Ergebnisse	80
6.1	CO ₂ -Emission von Brückenbauwerken	80
6.2	Optimierungsvorschläge.....	81
6.2.1	Allgemeines	81
6.2.2	Generelle Maßnahmen.....	82

6.2.3	Wahl des Bauwerktyps.....	84
6.2.4	Ausbildung der Widerlager	84
6.2.5	Überbauten	86
6.2.6	Ausstattung	87
6.2.7	Optimierung der Baustoffe.....	87
6.2.8	Kompensationsmaßnahmen durch Photovoltaik.....	88
6.2.9	Zusammenfassende Kurzübersicht	89
7.	Zusammenfassung.....	91
8.	Literaturverzeichnis	94
9.	Anhang.....	98

1. Ausgangssituation und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

Durch Bauprozesse werden ein Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen verbraucht und immense Mengen an CO₂ ausgestoßen. Neuere Erkenntnisse gehen davon aus, dass über 50% der CO₂-Emissionen auf die Herstellung und Nutzung von Gebäuden bzw. Bauwerken zurückzuführen sind [1] und hiervon ca. 1/3 Ingenieurbauwerken bzw. Infrastrukturmaßnahmen zuzurechnen ist [2]; bei Ingenieurbauten von Infrastrukturmaßnahmen sind hierbei vor allem auch Brückenbauwerke zu nennen. Da in [3], basierend auf Untersuchungen in [1], am Beispiel von Wohngebäuden gezeigt wurde, dass die CO₂-Emissionen, die aktuell für die Erstellung von Bauwerken verbraucht werden, zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens deutlich zu hoch sind, ist es naheliegend, dass gleiches auch für Infrastrukturbauwerke gilt.

Trotz diesem Umstand fehlen vor allem im Ingenieurbau / Brückenbau sowohl auf Seiten der Bauherrn und Betreiber, als auch auf Seiten von Planungsbüros bzw. Bauausführenden, Kenntnisse oder auch Berechnungsmethoden, wieviel CO₂ für die Erstellung und auch die Unterhaltung eines Brückenbauwerks erforderlich ist, daher spielen CO₂-Bilanzierungen bzw. Optimierungen / Reduzierungen in der Planung und Bauausführung keine Rolle.

1.2 Zielsetzung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen für typische Brückenbauwerke, wie sie zukünftig in Schleswig-Holstein erstellt werden, folgende Punkte bearbeitet werden:

1. Durchführung umfassender CO₂-Bilanzen, so dass hierdurch ein Überblick bzw. Transparenz und Erfahrungswerte über den CO₂-Verbrauch typischer Brückenkonstruktionen entsteht,
2. Ermittlung der wesentlichen Einflussfaktoren der CO₂-Emissionen,
3. Erarbeitung konkreter Anwendungsvorschläge, wie der CO₂-Bedarf von Brückenbauwerken reduziert werden kann,
4. Aufbereitung der Ergebnisse in übersichtlicher Form für die praktische Anwendung.

Hierdurch sollen vor allem Planern und Bauherrn / Betreibern konkrete Ansätze zur Verfügung gestellt werden, die CO₂-Bilanz zu optimieren. Gegenüber dem aktuellen Status-Quo soll eine Reduzierung der CO₂-Emission von mindestens 20% (im Einzelfall mehr) erzielbar sein.

2. Erläuterung der Vorgehensweise

Die Bearbeitung erfolgt in den folgenden fünf Arbeitsschritten:

Schritt 1: Festlegung des Untersuchungsumfangs für die CO₂-Parameterstudie

Ein wesentlicher Bearbeitungsteil des Projektes ist eine Bestandsanalyse, wieviel CO₂ aktuell für die unterschiedlichen Brückentypen, die in Schleswig-Holstein zur Anwendung kommen, verbraucht wird. Hierzu muss im ersten Schritt der Untersuchungsumfang sinnvoll festgelegt werden. Dieses erfolgt schrittweise:

1. In einem ersten Bearbeitungsschritt sind sowohl für Straßenbrücken als auch für Fuß- und Radwegbrücken mögliche Kreuzungssituationen definiert worden. Hieraus ergeben sich die wesentlichen Grundparameter einer Brücke in Form von erforderlicher Nutzbreite, lichter Weite / Abstand der Widerlager bzw. zu überwindender lichter Höhe.
2. Aus diesen Grundparametern sind dann unter ingenieurmäßigen Gesichtspunkten verschiedene mögliche Brückenlösungen generiert worden, wobei sowohl in Bezug auf die Materialwahl (Beton, Stahl, Holz, ...) als auch den Querschnittstyp (Platten, Plattenbalken, ...) jeweils verschiedene mögliche Ausführungsvarianten variiert wurden.

Dieser Bearbeitungsschritt ist in Kapitel 3.3 bzw. im Anhang [A] dokumentiert.

Schritt 2: Durchführen der CO₂-Parameterstudie

Basierend auf den unter Schritt 2 identifizierten möglichen Brückenvarianten sind dann CO₂-Bilanzierungen für die einzelnen Brückenvarianten durchgeführt worden. Die Berechnungen wurden an realen Brückenbauwerken und an parametrisierten Fiktiventwürfen durchgeführt.

Durch die umfangreichen CO₂-Berechnungen entsteht ein Überblick, welcher Brückentyp wieviel CO₂ verbraucht. Die Werte werden als Absolutwert kgCO₂ und als bezogene Werte in kgCO₂/ m² Brückenfläche bzw. kgCO₂/ (m² Brückenfläche · Jahr) ausgewertet und für die einzelnen Konstruktionsprinzipien miteinander verglichen.

In den Kapiteln 3.4 bis 3.6 sind die Bauwerke bzw. die Eingangsparameter für die Fiktiventwürfe zusammengestellt, die Ergebnisse der CO₂-Berechnungen in Kapitel 4.

Schritt 3: Identifikation der Haupt-CO₂-Treiber

Nachdem am Ende von Arbeitsschritt 3 die CO₂-Werte typischer Bestandsbauweisen vorliegen, gilt es die Ergebnisse gezielt auszuwerten, um zu beurteilen, welches die Haupt-CO₂-Treiber der Brücken sind bzw. wo die wesentlichen Optimierungspotentiale liegen. Dieses erfolgt ebenfalls in Kapitel 4.

Schritt 4: Erarbeiten von Optimierungslösungen

Die in Schritt 4 identifizierten Haupt-CO₂-Treiber, werden dann in konkreten Optimierungsvorschlägen ausgearbeitet. Diese sind in Kapitel 5 dokumentiert.

Schritt 5: Zusammenfassung der Ergebnisse / Gesamtfazit

Die Ergebnisse werden abschließend in komprimierter Form für die praktische Anwendung aufbereitet. Dieses erfolgt in Kapitel 6 bzw. im Anhang [E].

3. Grundlagen der CO₂-Berechnungen

3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel sind die wesentlichen Grundlagen der in Kapitel 4 dokumentierten CO₂-Bilanzierung zusammengestellt. Dieses sind:

1. Technische Grundlagen:
 - Wesentliche Technische Vorschriften bei der Dimensionierung der Brückenbauwerke, in Kapitel 3.2.
2. Grundlagen für die konkreten CO₂-Untersuchungen:
 - Festlegung des Untersuchungsumfangs der CO₂-Parameterstudie in Kapitel 3.3,
 - Überblick über die für die Parameterstudie zur Verfügung gestellten Brückenbauwerke, in Kapitel 3.4,
 - Zusammenstellung der Parameter für die Fiktiventwürfe der CO₂-Parameterstudie, in Kapitel 3.5,
 - Im Rahmen der CO₂-Bilanzierung berücksichtigte Lebensdauer der Bauwerke bzw. Verschleißbauteile, in Kapitel 3.6.

3.2 Vorschriften

3.2.1 Grundlagen für die Dimensionierung der Brückenbauwerke

Grundlage der durchgeführten CO₂-Berechnungen sind sowohl konkrete Brückenbauwerke als auch fiktive Brücken, die im Sinne einer Vor- bzw. Entwurfsplanung vordimensioniert wurden. Für die Vordimensionierung wurden folgende Grundlagen herangezogen:

1. Eingeführte technische Baubestimmungen für Brückenbauwerke: DIN EN 1991-2, DIN EN 1992-2, DIN EN 1993-2, DIN EN 1994-2.
2. RE-ING (2022) [4]: Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten.
3. ZTV-ING (2022) [5]: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten.
4. RiZ-ING (2022) [6]: Richtzeichnungen für Ingenieurbauten der Bundesanstalt für Straßenwesen.
5. BASt-Bericht Heft B 77 (2011) [7]: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes.
6. Literatur: Geißler, K. (2014) [8]; Kracke, E.-A. & Lodde, K. (2011) [9]; Geier et al. (2017) [10]; Informationsdienst Holz (2019) [11] etc.

3.2.2 Grundlagen für die CO₂-Berechnung

Für alle Brückenbauwerke wurde basierend auf DIN EN ISO 14040 [12] bzw. DIN EN ISO 14044 [13] das Treibhauspotential (GWP) als Sachbilanz einer Ökobilanz bestimmt, im Folgenden vereinfacht als „CO₂-Berechnung“ bezeichnet. Die Ergebnisse wurden dem Bewertungssystem der DIN EN 15978-1 [14] zufolge ausgewertet. Die Vorgehensweise ist im Folgenden zusammenfassend beschrieben:

Bei der sogenannten „CO₂-Berechnung“ handelt es sich um eine Bilanz für das Treibhauspotential, GWP (eng: Global Warming Potential), von Bauprodukten und Bauwerken. In der DIN EN ISO 14040: Umweltauswirkungen – Ökobilanz, gehört das Treibhauspotential unter der

Wirkungskategorie „Klimawandel“ zu den wesentlichen Kernindikatoren für die Umweltauswirkungen eines Bauprodukts. Aktuell dient die EN 14040 als eine der bedeutendsten Grundlagen für die Betrachtung der potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten im Verlauf über den Lebenszyklus. Der Lebenszyklus beinhaltet die Rohstoffgewinnung, die Materialherstellung, die Bauwerkserstellung sowie die Nutzung bis hin zum späteren Rückbau bzw. Abfallbehandlung [12].

Die Maßeinheit vom GWP ist CO₂-Äquivalent (nachfolgend CO₂). Hierüber werden die Klimawirksamkeit anderer klimaschädlichen Treibhausgase wie Methan (CH₄), Lachgas (N₂O) oder die fluorierten Treibhausgase (F-Gase) auf die Wirkung von Kohlendioxid umgerechnet.

Die in diesem Bericht durchgeführten CO₂-Berechnungen ähneln der Sachbilanz einer Ökobilanz-Studie gemäß EN 14040. In der Sachbilanz-Phase wird die Klimawirkung der Bauteile in einzelne Prozessmodule durch die Betrachtung der Input- und Outputflüsse berechnet. Zu den Inputflüssen zählen z.B. Stoffe aus Ressourcen, Vorprodukte und Energieträger sowie Strom. Unter die Outputflüsse fallen bei dieser Betrachtung die Treibhausgas-Emissionen in Luft, sowie Nebenprodukten, Abfällen etc.

Um die ökologische Qualität der Brücken zu beurteilen, werden diese gemäß des Bewertungsprozesses nach DIN EN 15978 bzw. DIN EN 17472 [15] bearbeitet. Die so gewonnenen CO₂-Ergebnisse werden dementsprechend an die Module und Lebenszyklusphasen angeordnet, wie es in den Normen geregelt ist. Die Systemgrenze umfasst vier Hauptphasen über den Lebenszyklus von Bauwerken sowie Bauprodukten: Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sowie das Recyclingpotential, was im Modul D dargestellt wird.

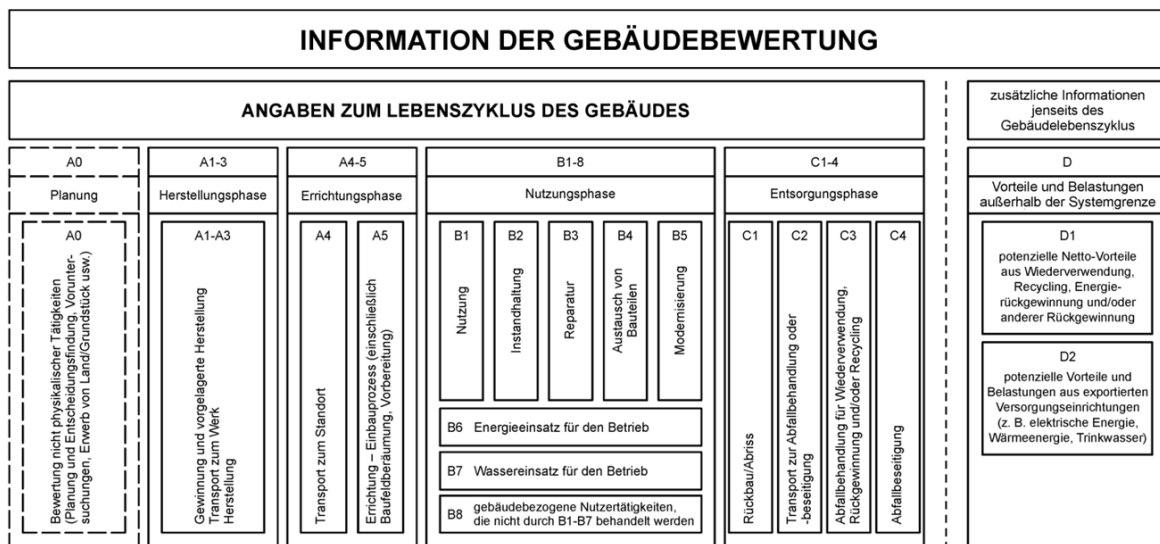


Bild 3.1 Lebenszyklusphasen und Module des Bauwerks ([14], S. 30)

Infolgedessen wird die CO₂-Berechnung für das Brückenbauwerk unter Anlehnung an das, in der EN 15978 für die Quantifizierung der Umweltindikatoren vorgelegte Rechenverfahren, durchgeführt. Die für die Bilanzierung benötigten Umweltwirkungsdaten sind aus den Umweltproduktdeklarationen der Produkte, Abkürzung EPD - nach DIN EN 15804 [16], zu entnehmen. Im EPD-Dokument werden die verifizierbaren Umweltinformationen für Produkte aufgeführt, hier im Sinn von Bauteilkomponenten und Baustoffen und ihrer Anwendungen

über ihren Lebenszyklus. Durch die Möglichkeit der Aggregation der Daten einzelner Bauteile, können die vollständigen Informationen für Bauwerke geliefert werden.

Die meisten EPD-Daten wurden der ÖKOBAUDAT entnommen, hier stellt das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) allen Nutzern eine vereinheitlichte Datenbasis für die Ökobilanzierung zur Verfügung (siehe unter www.oekobaudat.de) [17]. Auf der Plattform sind unterschiedliche Datensatz-Typen, wie folgt, aufgeführt:

- Generische Datensätze: nicht-verifizierte Datensätze, basierend auf z.B. Literatur. Diese werden mit einem Sicherheitszuschlag versehen,
- Muster-Datensätze: verifizierte Datensätze von repräsentativ erhobenen Daten,
- Durchschnitts-Datensätze: Durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden oder mehreren Firmen,
- Spezifische Datensätze: Spezifische Datensätze von Herstellern.

Weitere Daten wurden der Plattform EPD-Online (www.epd-online.com) [18] entnommen, oder in Einzelfällen wurden Herstellerangaben herangezogen, die vorab kritisch geprüft wurden. Im Falle von Baustoffen, bei denen das Herstellverfahren einen großen Einfluss hat, wie beispielsweise bei der Pfahlherstellung, wurde die Herstellung ergänzend über den Dieselverbrauch (1 l Diesel \cong 2,64 kgCO₂) berücksichtigt.

3.2.3 Zu beachtende Regelungen bei der CO₂-Bilanzierung

Im Einzelnen wurden bei den CO₂-Berechnungen gemäß folgenden Regelungen vorgegangen:

- Es wird für jedes gesamte Brückenbauwerk das Treibhauspotential (CO₂) über den gewählten Betrachtungszeitraum bilanziert.
- Der Betrachtungszeitraum wird auf 100 Jahre (DIN EN 1990, 2010 und [19]) festgelegt, da dies die übliche Nutzungsdauer eines Brückenbauwerks ist.
- Bei der Summation der CO₂-Emissionen wird eine Komplettbetrachtung über den kompletten Lebenszyklus durchgeführt (quasi „von der Wiege bis zur Bahre“ mit Modul D). Im Einzelnen werden die folgenden Phasen und Module gemäß EN 15978-1 betrachtet:
 - Herstellungsphase (Module A1 bis A3): Herstellung der Baustoffe,
 - Bauphase (Module A4 bis A5): Errichtung des Bauwerks,
 - Nutzungsphase (Module B1 bis B8): hier werden einerseits die CO₂-Emissionen, die sich durch den Austausch von Verschleißbauteilen wie Fahrbahnbelag, Brückenkapfen etc. ergeben, aufsummiert (Modul B4) sowie die durch Karbonatisierung von Beton aufgenommene Menge an CO₂ als Abzugswert berücksichtigt (Modul B1),
 - Abbruch- und Entsorgungsphase (Module C1 bis C4),
 - Modul D: Recyclingpotential der rückgebauten Baustoffe.
- Bei Tiefgründungen wie Pfählen und im Baugrund eingebettete Teile von Spundwandgründungen, wird davon ausgegangen, dass diese am Ende der Nutzungsdauer nicht zurückgewonnen werden, so dass hier die CO₂-Anteile aus der Phase C und dem Modul D unberücksichtigt bleiben.
- Besondere Ansätze für Baustoffe:
 - Bauholz (wie Vollholz, Brettschichtholz, etc.) wird mit stofflicher Verwertung in der Recyclingphase berechnet.
- Annahmen und Pauschalwerte:

- Die bei der Erdarbeit emittierende CO₂-Menge wird pauschal, mit 5% von der gesamten CO₂-Emission des Bauwerkes, eingeschätzt.
- Für die Baustelleneinrichtung sowie für andere nicht erfasste Bautätigkeiten und vernachlässigte kleine Bauteile, beispielsweise Entwässerungsleitungen, wird durch einen pauschalen Aufschlag auf die CO₂-Emission in Höhe von 5% bei Straßenbrücken und 8% bei Fuß- und Radwegbrücken berücksichtigt.
- Bei Ort betonbauteilen wird die Schalung durch einen Faktor von 1,05 des CO₂-Wertes vom jeweiligen Bauteil berücksichtigt.

3.3 Untersuchungsumfang

Schwerpunkt der Untersuchung sind typische Brückenbauwerke in Schleswig-Holstein. Da das Bundesland mit wenigen Ausnahmen (Nord-Ostsee-Kanals, Fehmarnbelt) keine großen Hindernisse aufweist, ist der Brückenbestand vornehmlich durch kleine Brücken mit Brückenlängen bis ca. 40 m geprägt (siehe Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1 Anzahl der Brücken in Schleswig-Holstein (ca.-Werte) in Abhängigkeit der Brückenlänge

Brückenlänge	Anzahl	[%]	kumuliert	[%]
Bis 5 m	3.427	49	3.427	49
5 m bis 40 m	3.180	46	6.607	95
40 m bis 100 m	183	3	6.790	98
100 - 500 m	148	2	6.938	100
> 500 m	7	< 1	6.945	100
Summe	6.945	100		

Bem.: Die Daten wurden für Bundesautobahnen, Bundesfernstraße, Landes- und Kreisstraßen dem Datenbestand des LBV übernommen, die Anzahl der kommunalen Brücken wurde abgeschätzt

Um die zu untersuchenden Brückentypen festzulegen, wurden zunächst verschiedene potenzielle Kreuzungssituationen definiert. Hieraus ergeben sich unter Einhaltung der Anforderungen an die Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL 2013) [20] und von Autobahnen (RAA 2008) [21] dann die wesentlichen Grundparameter der Brücke in Form von erforderlicher Nutzbreite B, lichter Breite LW / Abstand der Widerlager bzw. zu überwindender lichter Höhe H. Aus diesen Grundparametern lassen sich dann unter ingenieurmäßigen Gesichtspunkten Brückenlösungen konstruieren, wobei sowohl in Bezug auf die Materialwahl (Beton, Stahl, Holz, ...) als auch den Querschnittstyp (Platten, Plattenbalken, ...) jeweils verschiedene Varianten möglich sind.

In Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3 sind die möglichen Kreuzungssituationen und die daraus resultierenden Grundparameter, getrennt für Straßen- und Fuß- und Radwegbrücken dargestellt. Bei den Fuß- und Radwegbrücken wurden die Nutzbreiten in Anlehnung an den aktuellen Bauwerksbestand zunächst zwischen 2,50 und 4,0 m variiert und – aufgrund des zunehmenden Fuß- und Radwegverkehrs – in einigen Fällen auch Untersuchungen mit einer Nutzbreite von 6,0 m durchgeführt. Insgesamt ergaben sich hieraus 480 Ingenieurösungen, die in Anhang [A] dargestellt sind.

Tabelle 3.2 Mögliche Kreuzungssituationen bzw. Grundparameter (B / LW / H) für Straßenbrücken

Kreuzungssituation		Grundanforderungen		
Verkehrsweg oben	Hindernis unten	B* [m]	LW* [m]	H* [m]
Straße 2-spurig RQ 11B n. RAL (2013)	Bach	12,10	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	12,10	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	12,10	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	12,10	bis 35,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	12,10	40,0	4,80
Straße 4-spurig RQ 21B n. RAL (2013)	Bach	22,0	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	22,0	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	22,0	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	22,0	bis 35,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	22,0	40,0	4,80
Straße 4-spurig RQ 31B n. RAA (2008)	Bach	32,0	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	32,0	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	32,0	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	32,0	bis 35,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	32,0	40,0	4,80

Tabelle 3.3 Mögliche Kreuzungssituationen bzw. Grundparameter (B / LW / H) für Fuß- und Radwegbrücken

Kreuzungssituation		Grundanforderungen		
Verkehrsweg oben	Hindernis unten	B* [m]	LW* [m]	H* [m]
Breite zw. Gel 2,50 m	Bach	3,0	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	3,0	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	3,0	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	3,0	bis 40,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	3,0	40,0	4,80

Breite zw. Gel 4,0 m	Bach	4,50	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	4,50	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	4,50	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	4,50	bis 40,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	4,50	40,0	4,80
Breite zw. Gel 6,0 m	Bach	6,50	bis 4,0	1,0
	Wirtschaftsweg	6,50	bis 6,0	4,80
	Straße 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1); RQ 11,5+ (EKL 2); RQ 11 (EKL3)	6,50	bis 20,0	4,80
	Straße 4-spurig nach RAL (2013) und RAA (2008): RQ 21 (EKL 1-3) RQ 31 (EKA 1); RQ 28 (EKA 2); RQ 25 (EKA 3)	6,50	bis 40,0	4,80
	Straße 6-spurig nach RAA (2008): RQ 36 (EKA 1); RQ 31,5 (EKA 3)	6,50	40,0	4,80

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

3.4 Zur Verfügung gestellte Brückenbauwerke

Die CO₂-Bilanzierung wurden zunächst an 34 realen Brückenbauwerken durchgeführt, die eine möglichst große Spannweite des vorgesehenen Untersuchungsbereichs abdecken. Hierzu wurden zu folgenden Bauwerken Brücken mit Übersichtsplänen und Massen zur Verfügung gestellt:

- Von Planungspartner Ingenieurbüro Mohn in Melsdorf
 - 5 Beton-Straßenbrücken mit Rechteckquerschnitt und Längen zwischen 10 m - 25 m
 - 2 Stahlverbund-Straßenbrücken
 - 2 Wellstahlrohr-Straßenbrücken
 - 4 Stahl- und Spannbeton-Fußgängerbrücken
 - 5 Stahl-Fußgängerbrücken verschiedene Querschnitte (Deckbrücke, Trogbrücke, Fachwerk, Orthotope)
 - 1 Aluminium-Fachwerk-Fußgängerbrücke
 - 3 Aluminium Fachwerktrug-Fußgängerbrücken
 - 1 Wellstahlrohr- Fußgängerbrücke
- Von Ingenieurbüro Miebach (www.ib-miebach.de)
 - 2 Holzverbund-Straßenbrücken
 - 4 Holz-Deck- sowie Trog-Fußgängerbrücken verschiedener Querschnitte
- Von der Landeshauptstadt Kiel
 - 1 Stahlverbund-Fußgängerbrücke
- Vom Ingenieurbüro Bechert & Partner (www.bechertundpartner.de) und Autobahn GmbH
 - 3 integrale Stahlverbund-Straßenbrücken

- 1 Stahlverbund-Fußgängerbrücke

Basierend hierauf wurden für die weiteren zu bilanzierenden Bauwerke sogenannte Fiktiventwürfe erstellt.

3.5 Mengenangaben für typische parametrisierte Brückenbauwerke

Wie in Abschnitt 2 beschrieben, wurde ein Großteil der für die CO₂-Berechnung erforderlichen Brücken anhand von Parametrisierungen gewonnen. Für die Parametrisierung wurden auf eigene Erfahrungswerte bzw. die des Ingenieurbüros Mohn zurückgegriffen, teilweise auch auf Werte gemäß der im Literaturverzeichnis angegebenen Literatur.

Die Vorgaben wurden im Anschluss nochmal durch eine groß angelegte Untersuchung an Brückenbauwerken mit Herstelljahr zwischen 2000 und 2021 des Landesbetriebs Straßenbau und Verkehr Schleswig-Holstein (LBV) überprüft. In diesem Rahmen wurden die Massenansätze nochmal mit insgesamt 13 Straßenbrücken und 9 Fuß- und Radwegbrücken abgeglichen. Darüber hinaus wurden einzelne Mengenangaben nochmal durch verschiedene Ingenieurbüros überprüft.

Die wesentlichen Grundparameter anhand derer die Massen bestimmt wurde, sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt, die vollständigen Angaben finden sich im Anhang [B].

3.5.1 Mengenangaben für typische Straßenbrücken

Zu untersuchen sind zwei- bzw. vierspurige Straßenbrücken über verschiedene Hindernisse (angefangen von einem Bach bis zu einer vierspurigen Autobahn). Hieraus ergeben sich die folgenden Grundparameter (im Detail siehe Abschnitt 3.3):

- Breite des Brückenquerschnittes nach Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL) und von Autobahnen (RAA) für Straßenbrücken mit 2 Spuren und 4 Spuren: 12,10 m, 22,00 m, 32,00 m (im Fall Autobahn).
- Spannweite der Brücke zwischen ca. 6 m und ca. 40 m. Die Spannweite wurde hierbei vereinfacht ermittelt, in dem die erforderliche lichte Weite zwischen den Widerlagern mit $2 \times 0,50 \text{ m} = 1,0 \text{ m}$ beaufschlagt wurde.
- Lichte Höhe
 - a) 4,80 im Falle einer Straßenkreuzung. Hiermit ist einerseits das Lichtraumprofil von 4,50 m (Regelfall) bzw. 4,70 m (Autobahn) des unterführten Verkehrsweges abgedeckt, ebenso ein Puffer für spätere etwaige Gradienten Anpassungen.
 - b) Im Falle einer Bachkreuzung wurde die lichte Höhe mit 1,0 m als unterer Grenzwert festgelegt.

Die parametrisierten Brücken wurden hierbei mit den folgenden Vorgaben konstruiert:

Statisches System:

- Im Regelfall: Einfeldträger, beidseits gelenkig gelagert
- Sonderfall bei 40 m Spannweite: 2-Feld-Bauwerk mit Mittelstütze
- Sonderfall: Einfeldriges Rahmenbauwerk

Überbauvarianten:

Für die Überbauvarianten sind die folgenden Baustoffe berücksichtigt worden:

- Stahlbeton / Spannbeton
- Stahlverbund
- Stahl
- Holzbetonverbund

Hiermit wurden jeweils sechs unterschiedliche Überbautypen konstruiert:

- 1) Stahlbeton bzw.- Spannbetonplatte
 - Spannweite von 6,0 m bis ca. 20 m (bei 20 m vorgespannt)
 - Plattendicke von 0,4 m bis 1,0 m
 - Betonplatte aus Beton C35/45 mit 150 kg/m³ schlaffer Bewehrung und 30 kg/m³ Spannbewehrung
- 2) Stahlbeton bzw.- Spannbetonplattenbalkenquerschnitt
 - Spannweite von 20 m bis ca. 35 m
 - Konstruktionshöhe von ca. 1,20 m bis 1,80 m
 - Platte 0,30 m stark aus Beton C35/45 mit 220 kg/m³ schlaffer Bewehrung und 45 kg/m³ Spannbewehrung
 - Balkenträger aus Beton C35/45 mit Menge von ca. 0,3 m³/m² Brückenfläche
 - Endquerträger aus Beton C35/45 mit Querschnittfläche von ca. 2,0 m²
- 3) Stahlverbundquerschnitt mit offenen Profilen
 - Spannweite von 20 m bis ca. 35 m
 - Konstruktionshöhe 1,50 m
 - 0,35 m Betonplatte C35/45 mit 250 kg/m³ Bewehrung
 - Stahltonnage S355 von 215 kg/m² Brückenfläche
- 4) Stahlverbundquerschnitt mit geschlossenen Stahlhohlkasten
 - Wie vor, Stahlmenge S355 jedoch 260 kg/m² Brückenfläche
- 5) Orthotrope Platte aus Stahl
 - Spannweite bis ca. 40 m
 - Fahrbahnplatte aus Stahl S355 mit aufgeschweißten Stahlprofilen auf der Unterseite, i. D. 330 kg Stahl /m² Brückenfläche
- 6) Holzbetonverbund Plattenbalken
 - Spannweite bis ca. 20 m
 - Konstruktionshöhe 1,20 m
 - 0,30 m Betonplatte C35/45 mit 300 kg/m³ Bewehrung
 - Balkenträger aus Brettschichtholz, Tonnage geschätzt 0,5 m³ Holz /m² Brückenfläche

Gründung und Widerlager

Die Überbauten wurden jeweils mit drei verschiedenen Gründungsvarianten kombiniert.

- a) Stahlbetonwiderlager, tief gegründet
 - Bohrpfähle Durchmesser = 0,80 m aus Beton C30/37 mit 100 kg/m³ Bewehrung, Achsabstand ca. 2 m
 - Pfahlänge wurde zwischen 8 m und 18 m variiert
 - Pfahlkopfplatte i. M. d = 1,00 m aus Beton C30/37 mit 150 kg/m³ Bewehrung
 - Widerlagerwand i. M. d = 1,20 m aus Beton C30/37 mit 130 kg/m³ Bewehrung

- 2 Flügelwände $d = 0,80$ m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m^3 Bewehrung
- b) Stahlbetonwiderlager, flach gegründet
- Fundamentplatte i. M. $d = 1,00$ m; Breite $B = 6,0$ m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m^3 Bewehrung
 - Widerlagerwand i. M. $d = 1,20$ m aus Beton C30/37 mit 130 kg/m^3 Bewehrung
 - 2 Flügelwände $d = 0,80$ m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m^3 Bewehrung
- c) Spundwandwiderlager, tief gegründet
- Einbindetiefe zwischen 8 und 18 m variiert
 - Tiefgründung-Widerlager aus Spundwandprofile $d = 17$ mm
 - Tiefgründung-Flügelwände aus Spundwandprofile $d = 12$ mm
 - Abrostungsgrad $0,02$ mm/Jahr
 - Kopfbalken C30/37 Höhe / Breite = $0,8$ m / $1,0$ m mit 120 kg/m^3 Bewehrung

Lager und Übergangskonstruktion:

- Elastomerlager (mit bzw. ohne Festhaltung)
- Übergangskonstruktion aus Stahl 40 kg/m

Fahrbahnbelag:

- $1,0$ cm Abdichtungslage mit Bitumenbahnen Bit-G200S4
- $3,5$ cm Schutzschicht aus Gussasphalt
- und $4,0$ cm Betonasphalt als Deckschicht.

Brückenausstattung:

- 2 Kappen gemäß Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING) aus Luftporenbeton C25/30 mit 115 kg/m^3 Bewehrung
- Fahrzeugrückhaltesystem aus Stahl i. D. 30 kg/m
- Stahl-Füllstabgeländer (Gel 4 gemäß RiZ-ING) i. D. Stahl 40 kg/m

3.5.2 Mengenangaben für typische Fußgänger- und Radwegbrücken

Die Hauptparameter für die betrachteten Fußgänger- und Radwegbrücken sind wie zuvor bei den Straßenbrücken:

- Breite des Brückenquerschnittes zwischen $3,0$ m und $6,50$ m
- Spannweite der Brücke zwischen 6 m und 40 m
- Lichte Höhe $4,80$ m über Straßenkreuzung und $1,0$ m über Bach

Die Brücke wurde mit den folgenden Vorgaben konstruiert:

Statisches System:

- Einfeldträger, beidseits gelenkig gelagert

Überbauvarianten:

Für die Überbauvarianten sind die folgenden Baustoffe berücksichtigt worden:

- Stahlbeton / Spannbeton
- Holz
- Holzbetonverbund
- Stahlverbund

- Stahl
- Aluminium

Hiermit wurden jeweils sechs unterschiedliche Überbautypen konstruiert:

- 1) Stahlbeton bzw. - Spannbetonplatte bzw. - Plattenbalken
 - Spannweite von 6 m bis ca. 40 m (ab ca. 20 m vorgespannt)
 - Plattendicke von 0,30 - 0,50 m, Konstruktionshöhe bei Plattenbalken 0,85 m
 - Betonplatte aus Beton C35/45 mit 150 kg/m³ schlaffer Bewehrung und 25 kg/m³ Spannbewehrung
 - Fahrbahnbelag aus 4,0 cm Gussasphalt
- 2) Holz-Deckbrücke
 - Spannweite von 6 m bis ca. 20 m
 - Tragkonstruktion aus Holz geschätzt 0,10 m³ BSH/m² Brückenfläche mit Aussteifung durch Stahlquerträger, Stahlgeländer, oder Rahmen aus Stahl
 - Ggf. Holzgeländer
 - Fahrbahnbelag aus Schnittholz-Bohlen geschätzt 0,10 m³ VH/m² Brückenfläche
 - Alternativ Belag aus i. M. 7,0 cm Gussasphalt mit Belagsunterkonstruktion aus Furnierschichtholz (ca. 5 cm dick)
- 3) Holz-Trogbrücke
 - Wie zuvor, Tragkonstruktion aus Brettschichtholz mit ca. 0,20 m³ BSH/m² Brückenfläche mit Aussteifung durch Rahmen aus Stahl
- 4) Holzbetonverbund Plattenbalken
 - Spannweite von 20 m bis ca. 40 m
 - Konstruktionshöhe i. M = 1,0 m
 - 0,25 m Betonplatte C35/45 mit 300 kg/m³ Bewehrung
 - Balkenträger aus Brettschichtholz ca. 0,5 m³ Holz / m² Brückenfläche
 - Fahrbahnbelag aus 4,0 cm Gussasphalt
- 5) Stahlkonstruktion mit Belag aus Glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)
 - Spannweite bis ca. 20 m
 - Tragkonstruktion aus Stahl S355 ca. 120 kg/m² Brückenfläche
 - Fahrbelag aus 4,0 cm dicker GFK- Platte, Beispiel Hacon GFK-Planke HC 280 mit einem Gewicht von 24 kg/m²
- 6) Stahlverbundquerschnitt mit Stahlprofilen
 - Spannweite von 20 m bis ca. 40 m
 - Konstruktionshöhe 1,15 m
 - 0,35 m Betonplatte C35/45 mit 150 kg/m³ Bewehrung
 - Stahlmenge S355 ca. 150 kg/m² Brückenfläche
 - Fahrbahnbelag aus 4,0 cm Gussasphalt
- 7) Orthotrope Platte aus Stahl
 - Spannweite bis ca. 20 m
 - Fahrbahnplatte aus Stahl S355 mit aufgeschweißten Stahlprofilen auf der Unterseite, i. D. 250 kg Stahl /m² Brückenfläche

- 6 mm Reaktionsharzgebundene Dünnschicht (RHD) auf der Stahlplatte

8) Fachwerk-Trogbrücke aus Aluminium

- Spannweite von 20 m bis ca. 40 m
- Aluminium-Fachwerkkonstruktion mit ca. 40 kg/m² Brückenfläche
- 6 mm Reaktionsharzgebundener Dünnschicht (RHD) auf Fahrbahn aus Aluminiumblech
- Alu-Füllstabgeländer i. D. 10 kg/m

Gründung und Widerlager

Die Überbauten wurden jeweils mit drei verschiedenen Gründungsvarianten kombiniert.

a) Stahlbetonwiderlager, tief gegründet

- Stahlrohrpfähle S355 Durchmesser = 0,40 m mit Stahlmenge ca. 100 kg/m, Abstand ca. 2,5 m
- Alternativ Stahlbetonpfähle Durchmesser = 0,50 m aus Beton C30/37 mit 100 kg/m³ Bewehrung, Abstand ca. 2,5 m
- Pfahllänge zwischen 8,0 und 12,0 m variiert
- Pfahlkopfplatte i. M. d = 0,60 m aus Beton C30/37 mit 80 kg/m³ Bewehrung
- Widerlagerwand i. M. d = 0,80 m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m³ Bewehrung
- 2 Flügelwände d = 0,80 m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m³ Bewehrung

b) Stahlbetonwiderlager, flach gegründet

- Fundamentplatte i. M. d = 0,80 m; Breite = 4,20 m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m³ Bewehrung
- Widerlagerwand i. M. d = 0,80 m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m³ Bewehrung
- 2 Flügelwände d = 0,80 m aus Beton C30/37 mit 120 kg/m³ Bewehrung

c) Spundwandwiderlager, tief gegründet

- Einbindetiefe zwischen 8,0 und 12,0 m variiert
- Tiefgründung-Widerlager aus Spundwandprofile d = 12 mm
- Tiefgründung-Flügelwände aus Spundwandprofile d = 10 mm
- Abrostungsgrad 0,02 mm/Jahr
- Kopfbalken C30/37 Höhe / Breite = 1,0 m / 0,8 m mit 100 kg/m³ Bewehrung

Ergänzend jeweils

- Sauberkeitsschicht für Betonbauteile d = 0,10 m aus Beton C12/15

Lager, Fuge und Übergangskonstruktion: Pauschal in der CO₂-Bilanz berücksichtigt.

Brückenausstattung:

- In meisten Fällen: Stahl-Füllstabgeländer (Gel 4 gemäß ZTV-Ing) i. D. Stahl 40 kg /m

3.6 Nutzungsdauer von Bauelementen

Da nicht nur die Erstellung der Bauwerke CO₂-mäßig bilanziert wird, sondern der gesamte Lebenszyklus bis zum späteren Rückbau, ist zu berücksichtigen, dass zahlreiche Verschleißbaueile (Belag, Brückenkappen, Fahrbahnübergangskonstruktion etc.) innerhalb der Lebensdauer der Brücke mehrfach ausgebaut und neu erstellt werden müssen und somit in entsprechender Anzahl in die Bilanz einfließen.

Die Abschätzung der Nutzungsdauer kann basierend auf der Faktor-Methode oder der Kennwert-Methode erfolgen. Bei der Faktor-Methode wird gemäß DIN ISO 15686 eine theoretische Nutzungsdauer basierend auf Einzelfaktoren multiplikativ ermittelt, die jeweils von der Bauteilqualität, der Qualität der Bauausführung, mechanischen oder bauphysikalischen Auswirkungen abhängen. Deutlich pragmatischer ist die Kennwertmethode, die im Rahmen der vorliegenden Bearbeitung zur Anwendung gekommen ist. Hier wird die Nutzungsdauer basierend auf Erfahrungswerten (ggf. als Mittelwert einer Spannweite) angegeben. Hierzu sind die folgenden Quellen herangezogen worden:

- BAST Heft B 125 (2016) [19]: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit,
- ABBV (2010) [22]: Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – Ingenieurbauwerke – Brücken,
- Informationsdienst Holz (2019) [11]: Entwurf von Holzbrücken,
- Angabe von Bauproduktherstellern: Hacon (<https://brueckenbelag.de>), Viacon Hamco (<https://www.hamco-gmbh.de>),
- Erfahrungswerte in Schleswig-Holstein (kurz: SH) basierend auf Angaben des Ingenieurbüro Mohn bzw. der Projektberatern, dem Landesbetrieb Straßenbau und Verkehr in Schleswig-Holstein und dem Tiefbauamt der Stadt Kiel.

Die Tabelle 3.4 gibt jeweils einen Überblick über die Spannweite der einzelnen Werte sowie die letztlich im Rahmen des Projektes angesetzte Lebensdauer.

Tabelle 3.4 Brücken - Nutzungsdauer von Bauelementen und Bauteilkomponenten

Kategorie	Bauwerksteil / Baustoff	ABBV	BAST B125	Verw.	Begründung
Unterbauten	Beton	110	100	100	gemäß BAST B125
	Stahlbeton	110	100	100	gemäß BAST B125
	Stahlspundwände im Boden (ohne Korrosionsschutz)	50		100	Erfahrungswert in SH
	Stahlspundwände im Baugrund (mit Korrosionsschutz)	70		100	Erfahrungswert in SH
Überbauten	Beton		100	100	gemäß BAST B125
	Stahlbeton	70	100	100	gemäß BAST B125
	Spannbeton	70	100	100	gemäß BAST B125
	Baustahl	100	100	100	gemäß BAST B125
	Holz (nicht geschützt)	30		30	gemäß ABBV
	Holz (geschützt)	60		50/100	Angesetzter Rechenwert*
Lager	Elastomerlager		50	50	gemäß BAST B125
Übergänge	Fahrbahnübergänge		25	40	Erfahrungswert in SH
Fahrbahnbelag	Abdichtung		25	25	gemäß BAST B125
	Schutzschicht (Gussasphalt)	25	25	25	gemäß BAST B125
	Deckschicht (Asphaltbeton) Straßenbrücke	15	25	15	Erfahrungswert in SH
	Asphalttragdeckschicht-Fuß-Radwegbrücke	25		25	gemäß ABBV

	RHD			15	Erfahrungswert in SH
	Holz-Bohlen			15	Informationsdienst Holz
	GFK-Bohlen			50	geschätzt
Ausstattung	Stahlbeton Kappen		25	40	Erfahrungswert in SH
	Geländer aus Stahl			40	Erfahrungswert in SH
	Geländer aus Holz			20	Informationsdienst Holz
	Schutz - und Leiteinrichtungen	30	25	40	Erfahrungswert in SH
Sonstiges	Bewitterter Korrosionsschutz		35	25	Erfahrungswert in SH
Sonstiges	Wellstahlrohr	70		70	gemäß ABBV

* bezüglich der Lebensdauer geschützter Holzbrücken liegen sehr unterschiedliche Erfahrungen vor. Laut [22] beträgt diese etwa 60 Jahre, während in [23] eine theoretische Lebensdauer von 80 Jahren angegebene wird. In [24] wird von Erfahrungen berichtet, dass Holzbrücken mit modernem konstruktivem Holzschutz eine Lebensdauer von über 80 Jahren erreichen können, im aktuellen Entwurf der Überarbeitung des Eurocode 5 (prEN 1995-2, Fassung Februar 2022) sind sogar 100 Jahr enthalten. Die Spannweite reicht also von 60 bis über 100 Jahren.

Im Rahmen des Projektes sind vergleichend einmal ein Wert von 50 Jahren und eine theoretische Obergrenze von 100 Jahren angesetzt worden. Die konkreten Grenzwerte (50 Jahre bzw. 100 Jahre) der Spannweite sind auch aus Gründen der Rechenvereinfachung gewählt worden, so muss die geschützte Holzbrücke innerhalb der Lebensdauer, der in konventioneller Stahl- bzw. Betonbauweise genau zweimal oder genau einmal errichtet werden.

4. CO₂-Berechnungen vorhandener Bauwerke (Status Quo)

4.1 Allgemeines

Im Folgenden sind die Ergebnisse der CO₂-Berechnungen der in Kapitel 3 erläuterten Brückenbauwerke dokumentiert, die hinsichtlich der CO₂-Emission den Status-Quo darstellen.

Im Abschnitt 4.2 wird zunächst die konkrete Vorgehensweise bei der CO₂-Bilanzierung an einem Beispiel erläutert. Die Ergebnisse der insgesamt 480 Berechnungen werden im Anhang [C] und [D] dargestellt. In den Folgekapiteln 4.3 bis 4.5 werden die Ergebnisse analysiert, um den grundsätzlichen CO₂-Bedarf von Brücken, und ihrer einzelnen Bauwerkskomponenten (Unterbauten, Überbau, Ausstattung), sowie der verschiedenen Bauweisen zu beurteilen.

Basierend auf den Berechnungsergebnissen werden in Abschnitt 4.7 dann konkrete Anhaltswerte abgeleitet, mit denen der CO₂-Bedarf für unterschiedliche Brückenbauwerke in den Leistungsphasen 0 bzw. 2 einer konkreten Planung abgeschätzt werden können.

In den darauffolgenden Teilkapiteln werden nochmal zwei Sonderuntersuchungen durchgeführt, inwiefern sich die CO₂-Emissionen durch den vorgesehenen sukzessiven Umbau der Energieerzeugung zu weitgehend regenerativen Energieträgern verändern würde (siehe Abschnitt 4.8) bzw. welchen Einfluss CO₂-Anteile aus bauzeitlicher Verkehrsbeeinträchtigung im Vergleich zu denen aus der Bauwerkserstellung haben (siehe Abschnitt 4.9).

4.2 Erläuterung der konkreten Vorgehensweise an einer Beispielberechnung

Im Folgenden sind an einem Bauwerk exemplarisch die wesentlichen Bearbeitungsschritte sowie Teilergebnisse einer CO₂-Berechnung zusammengestellt. Die vollständigen durchgeführten CO₂-Berechnungen und ihre Ergebnisse befinden sich im Anhang [C] und [D].

▪ Parameter der Brücke

Die grundsätzliche Vorgehensweise soll im Folgenden an dem Rechenbeispiel dargestellt werden. Hierzu wurde eine 2-spurige Straßenbrücke mit den folgenden Randbedingungen ausgewählt:

Lichte Höhe	H = 4,80 m
Konstruktionsbreite	B = 12,10 m
Nutzungsbreite	11,60 m
Lichte Weite	LW = 20,0 m
Stützweite	L = 21,0 m
Kreuzungssituation	über 2-spurige Straße
Querschnitt	Spannbetonplatte, Konstruktionshöhe 1,0 m
Statisches System	1-Feld Träger
Gründung	Flachgründung
Widerlager	Stahlbeton-Kastenwiderlager

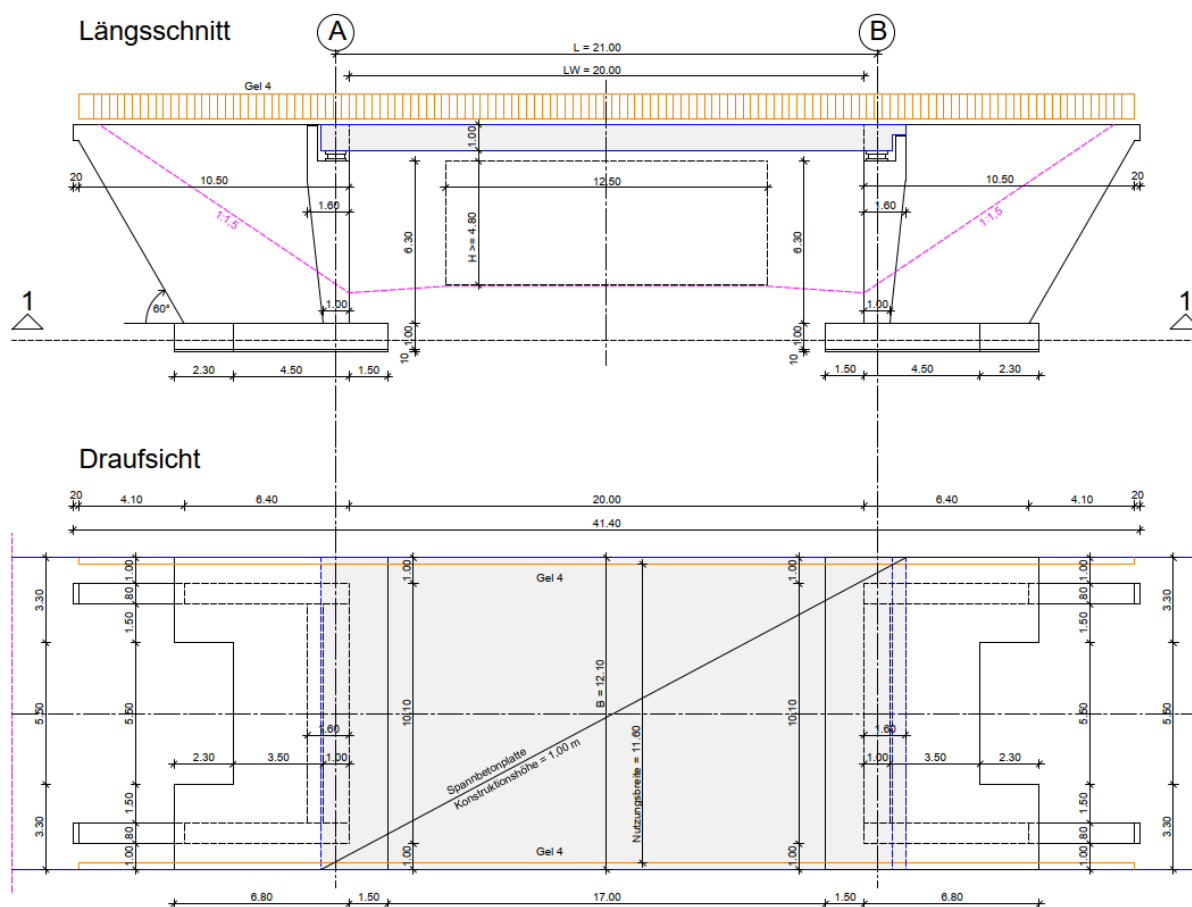


Bild 4.1 Brückenskizze, basierend auf der Planung von Büro Mohn

- Ermittlung der Brückenfläche

Während der Bearbeitung wurden die CO₂-Emissionen als Rechenwert vielfach auf die Brückenfläche bezogen. Diese wurde im Zuge der Berechnung, abweichend vom Vorgehen nach RAB-ING (2022) [25], vereinfacht bzw. für alle Bauwerke einheitlich wie folgt ermittelt:

$$\begin{aligned} \text{Brückenfläche} &= \text{Stützweite } L \times \text{Konstruktionsbreite } B \\ &= \text{hier: } 21,0 \text{ m} \times 12,10 \text{ m} = 254 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

- Durchführung der CO₂-Berechnung

Für die Berechnung der CO₂-Emissionen des Brückenbauwerkes wurden folgende Schritte durchgeführt:

Zunächst wurde die Brücke in kleinere Bauelemente zerlegt (bspw. Gründung, Widerlagerwand, Flügelwände, Lager, Fahrbahnplatte, Belag und Brückenausstattung). Von den einzelnen Bauteilkomponenten wurden die Baustoffe und ihre Mengen ermittelt, dabei wurde auch ihre Austauschhäufigkeit berücksichtigt.

Anschließend wurde, für jedes Bauteil der Brücke, eine CO₂-Bilanzierung über alle Phasen des Lebenszyklus durchgeführt. Als Grundlage für die Bilanzierung wurden die Environmental Product Deklarationen (EPDs) sowie die Regelungen, die in Abschnitt 3.2.2 und 3.2.3 dieses Berichtes erwähnt wurden, verwendet.

Die CO₂-Bilanz des gesamten Brückenbauwerks wurde nach dem Rechenverfahren nach EN 15978-1 berechnet, indem die CO₂-Emissionen aller Bauteile summiert wurden.

Schließlich wurden die Ergebnisse in tabellarischer Form zusammengefasst, um eine übersichtliche Darstellung der CO₂-Emissionen der Brücke zu ermöglichen.

Schritt 1: Festlegung und Quantifizierung des Bauwerks – Mengenermittlung

Das ausgewählte Brückenbauwerk wurde in Hauptbauteile und relevante Bauteilkomponenten unterteilt und in Bauteilgruppen zusammengestellt. Dabei wurden die Untergruppen gemäß der Gliederung der RAB-ING gebildet. Die Struktur sieht wie folgt aus:

- Flachgründung
 - Sauberkeitsschicht
 - Fundamentplatte für Widerlagerwand
 - Fundamentplatte für Flügelwände
- Unterbauten
 - Stahlbeton Widerlagerwand
 - Stahlbeton Flügelwände
- Lager und Übergangskonstruktion
 - Elastomer-Lager
 - Stahl Übergangskonstruktion
- Überbau
 - Tragkonstruktion: Fahrbahnplatte aus Spannbeton
 - Belag: Abdichtung, Asphaltenschutzschicht, Asphaltdeckschicht
- Ausstattung
 - Brückenkappen
 - Stahl Geländer
 - Stahl Fahrzeugrückhaltesystem (FRHS)

• Mengenermittlung der Bauteile

Die Mengenermittlung der Bauteile ist ein wichtiger Schritt bei der CO₂-Bilanzierung eines Bauwerks. Dabei geht es darum, die verwendeten Baustoffe und ihre Menge in den einzelnen Bauteilen zu bestimmen.

Die Baustoffe der Bauteile können entweder in der Planung des Bauwerks angegeben sein, oder gemäß dem Abschnitt 3.5 ausgewählt werden. Die Verbrauchsmengen an Baustoffen lassen sich aus den Abmessungen des Bauteils ableiten.

Eine präzise Mengenermittlung ist wichtig, um eine genaue CO₂-Bilanzierung durchführen zu können.

Tabelle 4.1 Mengenermittlung der Brückenbauteile für die einmalige Herstellung

Nr.	Name des Bauteils	Baustoffgüte	Menge	Einheit	Anzahl	Gesamte Menge
1	Sauberkeitsschicht	Beton C12/15	22	m ³	1	22
2a	Widerlager-Fundament	Beton C30/37	60	m ³	2	120
2b		BSt 500B	7 300	kg	2	14 600
3a	Flügelwand-Fundament	Beton C30/37	25	m ³	4	100
3b		BSt 500B	3 050	kg	4	12 200
4a	Widerlagerwand	Beton C30/37	76	m ³	2	152
4b		BSt 500B	9 925	kg	2	19 850

5a	Flügelwand	Beton C30/37	50	m ³	4	200
5b		BSt 500B	6 000	kg	4	24 000
6	Lager	Elastomer	240 (D*)	kg	4	960
7	Übergangskonstruktion	Stahl	464	kg	1	464
8a	Fahrbahnplatte	Beton C35/45	170	m ³	1	170
8b		BSt 500B	25 425	kg	1	25 425
8c		St 1570/1770	5 085	kg	1	5 085
9a	Belag-Abdichtung	Bit-G200S4	280	m ²	1	280
9b	Belag-Schutzschicht	MA (Guss)	14 810	kg	1	14 810
9c	Belag-Deckschicht	AC (Beton)	31 335	kg	1	31 335
10a	Kappe	Beton C25/30	18	m ³	2	36
10b		BSt 500B	2 070	kg	2	4 140
11	Geländer	Stahl	1,6	t	2	3,2
12	Rückhaltesystem	Stahl	1,2	t	2	2,4

* Mit D = Durchschnittlicher Wert

- Ermittlung der Austauschhäufigkeit von Bauelementen und Bauteilkomponenten

Die Austauschhäufigkeit von einzelnen Bauteilen der Brücke wurde nach dem in der DIN EN 15978-1 geregelten Modell „ganzzahlige Austauschhäufigkeit“ ermittelt.

Formel für die Ermittlung der ganzzahligen Austauschhäufigkeit nach EN 15978-1:

$$NR(j) = E [ReqSL / ESL(j) - 1]$$

Dabei ist	NR(j)	die Austauschhäufigkeit für Produkt j
	E [...]	Auf- oder Abrunden-Funktion
	ReqSL	die geforderte Nutzungsdauer des Bauwerks
	ESL(j)	die voraussichtliche Nutzungsdauer des Produktes j

Die Auf- oder Abrundung des Wertes NR(j) wird unter Berücksichtigung der tatsächlichen Wahrscheinlichkeit des geplanten Austauschs von dem Produkt entschieden.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird die geforderte Nutzungsdauer von Brücken mit 100 Jahre angesetzt.

Die voraussichtliche Nutzungsdauer von jeweiligen Bauelementen und Bauteilkomponenten sind in Tabelle 3.4 (Abschnitt 3.6) abzulesen.

Beispiel: Ermittlung der Austauschhäufigkeit für Brückenkappen, für die eine Nutzungsdauer von 40 Jahren (siehe Tabelle 3.4) vorgesehen ist.

$$NR = E [100 / 40 - 1] = E [1,5] = 2$$

Zum Rechenbeispiel:

Tabelle 4.2 Austauschhäufigkeit von den Bauteilen und Bauteilkomponenten

Nr.	Name des Bauteils	Nutzungsdauer Jahre	ReqSL Jahre	Austausch- häufigkeit
1	Sauberkeitsschicht	100	100	0
2	WL Fundament	100	100	0
3	FIW Fundament	100	100	0
4	Widerlagerwand	100	100	0
5	Flügelwand	100	100	0

6	Lager Elastomer	50	100	1
7	Übergangskonstruktion	40	100	2
8	Fahrbahnplatte	100	100	0
9a	Belag-Abdichtung	25	100	3
9b	Belag-Schutzschicht MA	25	100	3
9c	Belag-Deckschicht AC	15	100	7*
10	Kappe	40	100	2
11	Geländer Stahl	40	100	2
12	Rückhaltesystem Stahl	40	100	2

*) Unter Berücksichtigung des Austauschs der Schutzschicht

Schritt 2: Anwendung der Umwelt-Produktdeklarationen (EPD) von Bauprodukten

Hierbei werden die Informationen aus der EPD verwendet (siehe Abschnitt 3.2.2), um die Umweltauswirkungen der einzelnen Bauprodukte zu quantifizieren.

Die EPD listet die Umweltauswirkungen des Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus auf. Diese Auflistung umfasst die Treibhausgasemissionen, den Energieverbrauch, den Ressourcenverbrauch, das Abfallaufkommen und die Luft-, Boden- und Wasserverunreinigungen.

In den CO₂-Bilanzierungen wurden alle, in der EPD deklarierten GWP-Daten des Produktes mit einbezogen. Die Berechnung erfolgt in der Regel über Multiplikation der Baustoffmenge mit den GWP- Einheitswerten.

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; MND = MODUL NICHT DEKLARIERT; MNR = MODUL NICHT RELEVANT)

Produktionsstadium		Stadium der Errichtung des Bauwerks					Nutzungsstadium						Entsorgungsstadium			Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung/Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau/Abriss	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	X	X	X	MND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ – UMWELTAUSWIRKUNGEN nach EN 15804+A1: 1 m³ Konstruktionsbeton C 25/30

Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	D
GWP	[kg CO ₂ -Äq.]	197,00	3,90	1,08	-10,00	3,10	12,00	6,01	-21,40
ODP	[kg CFC11-Äq.]	5,36E-8	7,67E-13	4,71E-12	0,00E+0	6,09E-13	2,37E-12	1,31E-11	-1,32E-10
AP	[kg SO ₂ -Äq.]	2,87E-1	9,93E-3	1,60E-3	0,00E+0	3,00E-2	3,21E-2	1,13E-2	-4,73E-2
EP	[kg (PO ₄) ³⁻ -Äq.]	5,35E-2	2,35E-3	2,57E-4	0,00E+0	6,53E-3	7,65E-3	2,17E-3	-8,86E-3
POCP	[kg Ethen-Äq.]	2,30E-2	-3,35E-3	1,11E-4	0,00E+0	3,18E-3	-1,11E-2	9,74E-4	-2,79E-3
ADPE	[kg Sb-Äq.]	6,43E-4	4,13E-7	5,36E-7	0,00E+0	3,28E-7	1,28E-6	1,97E-6	-8,60E-6
ADPF	[MJ]	900,00	52,50	10,50	0,00	41,70	163,00	68,40	-227,00

Legende: GWP = Globales Erwärmungspotenzial; ODP = Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht; AP = Versauerungspotenzial von Boden und Wasser; EP = Eutrophierungspotenzial; POCP = Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon; ADPE = Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen – nicht fossile Ressourcen (ADP – Stoffe); ADPF = Potenzial für die Verknappung abiotischer Ressourcen – fossile Brennstoffe (ADP – fossile Energieträger)

Bild 4.2 Beispiel Umweltwirkungsinformation für 1 m³ Beton C25/30 [26]

Schritt 3: Berechnung des Treibhauspotential-Indikators

Es wurde das resultierende Rechenverfahren nach EN 15978-1, verwendet.

- Die resultierenden CO₂-Emissionen des Bauwerks über den gesamten Lebenszyklus lassen sich wie folgt berechnen:

$$GWP = \sum_{i=A}^D GWP_i$$

Dabei ist

GWP der gesamte CO₂-Ausstoß des Bauwerks über alle Phasen des Lebenszyklus

i das Modul *i* im Lebenszyklus (mit *i* = A1-A3, A4, A5, B1-B8, C1-C4 und D)

GWP_i das Treibhauspotential des Bauwerks im Modul *i* (mit *i* = A1-A3, A4, A5, B1-B8, C1-C4 und D)

- Formel für die Ermittlung des Treibhauspotentials (GWP) vom Bauwerk in einem Modul des Lebenszyklus:

$$GWP_i = a_{1,i} \times GWP_{a1,i} + a_{2,i} \times GWP_{a2,i} + a_{3,i} \times GWP_{a3,i} + \dots + a_{N,i} \times GWP_{aN,i}$$

Dabei ist

GWP_i das für das Modul *i* des Bauwerks quantifizierte Treibhauspotential

a_{n,i} die Menge an Produkten *n*, die im Modul *i* verwendet werden
(mit *n* = 1, 2, ..., N)

GWP_{an,i} (*GWP-Einheitswert*) das Treibhauspotential des Produkts *n*, das im Modul *i* des Bauwerks verwendet wird (mit *n* = 1, 2, ..., N)

- Berücksichtigung des CO₂-Ausstoßes durch Austausch vom Bauteil bzw. vom Produkt *n*

$$GWP_{n,B4} = NR_n \times a_{n,B4} \times GWP_{an,A1-A5, B1,C1-C4, D}$$

Dabei ist

GWP_{n,B4} das für das Modul *B4 Austausch* ermittelte Treibhauspotential vom Produkt *n*

NR_n die Austauschhäufigkeit des Produkts *n* während des Lebenszyklus des Bauwerks

a_{n,B4} die Mengen am Produkt *n*, die im Modul *B4* verwendet werden

GWP_{an,A1-A5, B1, C1-C4, D} die Summe der Treibhauspotentiale des Produkts *n*, die das Produkt *n* in den Modulen *A1-A3, A4, A5, B1, C1-C4, D* besitzt

Im Modul B4 werden alle anderen Module summiert und mit der Austauschhäufigkeit des Produkts multipliziert. Dadurch wird berücksichtigt, dass das jeweilige Bauprodukt nach dem Ende seiner Lebensdauer erneut hergestellt, transportiert, erneut eingebaut, wieder rückgebaut, entsorgt und recycelt wird.

Beispiel: Berechnung der CO₂-Emission im Modul B4-Austausch des Produkts Beton im Bauteil „Kappe“

Bauteil	Kappe
Anzahl	2 Stücke
Baustoffgüte (Tabelle 4.1) - Verwendetes Bauprodukt (EDP)	C25/30
Baustoffmenge (Tabelle 4.1) - gesamte Menge vom Produkt C25/30	36 m ³
Austauschhäufigkeit (Tabelle 4.2)	2

Die GWP-Einheitswerte für das Produkt „1 m³ Beton C25/30“ wurden aus den Datensätzen in der EPD des Informationszentrums Beton GmbH bzw. im Online-Portal ÖKOBAUDAT, entnommen.

Tabelle 4.3 Berechnung der CO₂-Emission im Modul B4-Austausch von den Brückenkappen

Phasen im Lebenszyklus	Modul	Beschreibung des Moduls	GWP-Einheitswert kg CO ₂ -Äq./ 1 m ³ C25/30	Treibhauspotential GWP in kg CO ₂ -Äq.
Herstellungsphase	A1-A3	Herstellung	197,00	7 092
Errichtungsphase	A4	Transport	3,90	140
	A5	Einbau	1,08	39
Nutzungsphase	B1	Nutzung	-10,00	-360
	B2	Instandhaltung	-	-
	B3	Reparatur	-	-
	B4	Austausch	-	13 802
	B5	Modernisierung	-	-
	B6	Betrieblicher Energieeinsatz	-	-
	B7	Betrieblicher Wassereinsatz	-	-
	B8	Nutzung durch den Nutzer	-	-
Entsorgungsphase	C1	Abriss	3,10	112
	C2	Transport	12,00	432
	C3	Abfallbehandlung	6,01	216
	C4	Abfallbeseitigung	-	-
Belastungen außerhalb Lebensdauer	D	Recyclingpotential	-21,40	-770

$$\begin{aligned}
 \text{GWP}_{\text{C25/30 (Kappe),B4}} &= \text{NR}_{\text{C25/30(Kappe)}} \times \text{Menge C25/30} \times \text{GWP}_{\text{C25/30,A1-A5,B1,C1-C4,D}} \\
 &= 2 \times 36 \text{ [m}^3\text{]} \times (197,00 + 3,90 + 1,08 + -10,00 + 3,10 + 12,00 + 6,01 + -21,40) \text{ [kg CO}_2\text{/m}^3\text{]} \\
 &= 2 \times 36 \text{ [m}^3\text{]} \times 191,69 \text{ [kg CO}_2\text{/m}^3\text{]} = 13\,802 \text{ kg CO}_2
 \end{aligned}$$

Die konkrete CO₂-Berechnung für die gewählte Brücke wurde in Tabelle 4.4 dargestellt.

Tabelle 4.4 CO₂-Bilanzierung der gewählten 2-spurigen Spannbeton-Straßenbrücke

Nr.	Bauteil	Bau- stoff	Menge	Ein- heit	NR	A1-A3	A4	A5	B1	B4	C1	C2	C3	C4	D	Total
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C20/25</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>178,00</i>	<i>3,90</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
1	Sauberkeitsschicht	C20/25*	22	m ³	0	3916	86	24	X	0	68	264	132	-	-471	4019
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C30/37</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>219,00</i>	<i>4,50</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
2a	Widerlager-Fund.	C30/37	120	m ³	0	26280	540	130	-1200	0	372	1440	721	-	-2568	25715
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>0,683</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0028</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
2b	Bewehrung 2a	B500B	14 600	kg	0	9972	-	-	-	0	10	41	-	-	-	10023
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C30/37</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>219,00</i>	<i>4,50</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
3a	Flügelwand-Fund.	C30/37	100	m ³	0	219000	450	108	-1000	0	310	1200	601	-	-2140	21429
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>0,683</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0028</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
3b	Bewehrung 3a	B500B	12 200	kg	0	8333	-	-	-	0	9	34	-	-	-	8376
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C30/37</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>219,00</i>	<i>4,50</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
4a	Widerlagerwand	C30/37	152	m ³	0	33288	684	164	-1520	0	471	1824	913	-	-3253	32571
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>0,683</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0028</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
4b	Bewehrung 4a	B500B	19 850	kg	0	13558	-	-	-	0	14	56	-	-	-	13628
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C30/37</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>219,00</i>	<i>4,50</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
5a	Flügelwand	C30/37	200	m ³	0	43800	900	216	-2000	0	620	2400	1202	-	-4280	42858
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>0,683</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0028</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
5b	Bewehrung 5a	B500B	24 000	kg	0	16392	-	-	-	0	17	67	-	-	-	16476
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>E-Lager</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>3,5</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
6	Elastomer Lager	Sonst.	960	kg	1	3360	-	-	-	3360	-	-	-	-	-	6720
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>Fahr-ÜKO</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>1,92</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
7	Übergangskonstruk- tion	Sonst.	464	kg	2	891	-	-	-	1782	-	-	-	-	-	2673
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C35/45</i>	<i>1</i>	<i>m³</i>		<i>244,00</i>	<i>9,10</i>	<i>1,08</i>	<i>-10,00</i>	<i>-</i>	<i>3,10</i>	<i>12,00</i>	<i>6,01</i>	<i>-</i>	<i>-21,40</i>	
8a	Fahrbahnplatte	C35/45	170	m ³	0	41480	1547	184	-1700	0	527	2040	1022	-	-3638	41462
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>0,683</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>0,0007</i>	<i>0,0028</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
8b	Bewehrung 8a	B500B	25 425	kg	0	17365	-	-	-	0	18	71	-	-	-	17454
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>Spanngl.</i>	<i>1</i>	<i>kg</i>		<i>1,09</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	<i>-</i>	
8c	Bewehrung 8a	St 1570 /1770	5 085	kg	0	5543	-	-	-	0	-	-	-	-	-	5543

Nr.	Bauteil	Bau- stoff	Menge	Ein- heit	NR	A1-A3	A4	A5	B1	B4	C1	C2	C3	C4	D	Total
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>Bit-G200</i>	1	<i>m²</i>		2,48	-	-	-	-	-	0,0174	-	0,397	-	
9a	Belag-Abdichtung	Bitumen	280	m ²	3	695	-	-	-	2415	-	5	-	111	-	3225
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>MA-Guss</i>	1	<i>kg</i>		0,0973	-	0,0008	-	-	0,0005	0,007	-	-	-0,026	
9b	Belag-Schutzschicht	MA	14 810	kg	3	1441	-	12	-	3537	7	104	-	-	-385	4716
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>AC-Beton</i>	1	<i>kg</i>		0,0712	-	0,0064	-	-	0,0005	0,007	-	-	-0,026	
9c	Belag-Deckschicht	AC	31 335	kg	7	2231	-	200	-	12963	16	219	-	-	-815	14815
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>C25/30</i>	1	<i>m³</i>		197,00	3,90	1,08	-10,00	-	3,10	12,00	6,01	-	-21,40	
10a	Kappe	C25/30	36	m ³	2	7092	140	39	-360	13802	112	432	216	-	-770	20703
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>B500B</i>	1	<i>kg</i>		0,683	-	-	-	-	0,0007	0,0028	-	-	-	
10b	Bewehrung 10a	B500B	4 140	kg	2	2828	-	-	-	5684	3	12	-	-	-	8527
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>Baustahl</i>	1	<i>t</i>		1130	-	-	-	-	-	-	1,84	-	-413	
11	Geländer	Stahl	3,2	t	2	3616	-	-	-	4600	-	-	6	-	-1322	6900
	<i>GWP-Einheitswert [kgCO₂]</i>	<i>Stahl</i>	1	<i>t</i>		1130	-	-	-	-	-	-	1,84	-	-413	
12	Rückhaltesystem	Stahl	2,4	t	2	2712	-	-	-	3450	-	-	4	-	-991	5175
0	Erdarbeit (Psch. 5%)															16474
	Summe					266691	4347	17550	-7780	51594	2573	10209	4818	112	-	329481
	Mit Aufschlag Psch. 5%															345955

*) Annahme

Modul nicht bewertet: B2, B3, B5 bis B8

Schritt 4: Darstellung der Ergebnisse

Hierbei wurden die wichtigen Ergebnisse und die bedeutenden Werte aus der Berechnung herausgezogen und übersichtlich in tabellarischer Form wie folgt aufgelistet:

Nutzungsdauer a:	100 Jahre
Total kg CO ₂ Äq.:	329.481
Total kg CO ₂ Äq m. Aufschlag:	345.955
Brückenfläche m ² :	254,10
kg CO ₂ -Äq/m ² (Brü.):	1361,49 kg CO ₂ -Äq./m ²
kg CO ₂ -Äq/m ² (Brü.)*a:	13,61 kg CO ₂ -Äq/(m ² *a)

Anteil Absolutwert	kg CO ₂ -Äq.
Anteil Gründung	73.039
Anteil UB-Widerlager	48.509
Anteil UB-Flügelwand	62.301
Anteil UEB-Tragkonstruktion	67.681
Anteil UEB-Belag	23.894
Anteil Ausstattung	43.371
Anteil UEB-Lager u. ÜKO	9.862
Anteil Erdarbeit	17.520
Total:	345.955

Anteil Prozent	Anteil %
Anteil Gründung	21%
Anteil UB-Widerlager	14%
Anteil UB-Flügelwand	18%
Anteil UEB-Tragkonstruktion	20%
Anteil UEB-Belag	7%
Anteil Ausstattung	13%
Anteil UEB-Lager u. ÜKO	3%
Anteil Erdarbeit	5%
Total	100%
Anteil Unterbauten	52%
Anteil Überbau	40%

Anteil Absolutwert (mit 5% Aufschlag)	kgCO ₂ -Äq.
Herstellungsphase (M. A1-A3)	280.025
Bauphase (M. A4-A5)	22.993
<i>(Nutzung Modul B1)</i>	<i>(-8.169)</i>
<i>(Ersatz Modul B4)</i>	<i>(58.173)</i>
Nutzungsphase (M. B1-B8)	46.004
Entsorgungsphase (M. C1-C4)	18.597
Recycling-potential (M. D)	-21.664
Total:	345.955

Anteil Phase	Anteil %
Herstellungsphase (M. A1-A3)	80,9%
Bauphase (M. A4-A5)	6,6%
<i>(Nutzung Modul B1)</i>	<i>(-2,4%)</i>
<i>(Ersatz Modul B4)</i>	<i>(15,7%)</i>
Nutzungsphase (M. B1-B8)	13,3%
Entsorgungsphase (M. C1-C4)	5,4%
Recycling-potential (M. D)	-6,3%
Total:	100%

Die Ergebnisse werden im nächsten Abschnitt 4.3 analysiert und ausgewertet.

4.3 Analyse der Gesamt-CO₂-Emission der Brückenbauwerke

4.3.1 CO₂-Emission bezogen auf die Brückenfläche

Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, in welcher Größenordnung der CO₂-Bedarf von Brückenbauwerken liegt, wurden die Kennwerte CO₂/m² Brückenfläche, die gemäß der unter Abschnitt 4.2 vorgestellten Vorgehensweise ermittelt wurden, zunächst einmal der Größe nach sortiert abgetragen (Bild 4.3). Hierbei zeigt sich, dass die Kennwerte CO₂/m² Brückenfläche durchaus eine größere Spannweite durchlaufen, wobei 75% zwischen 0,8 und 2,5 tCO₂/m² Brückenfläche liegen.

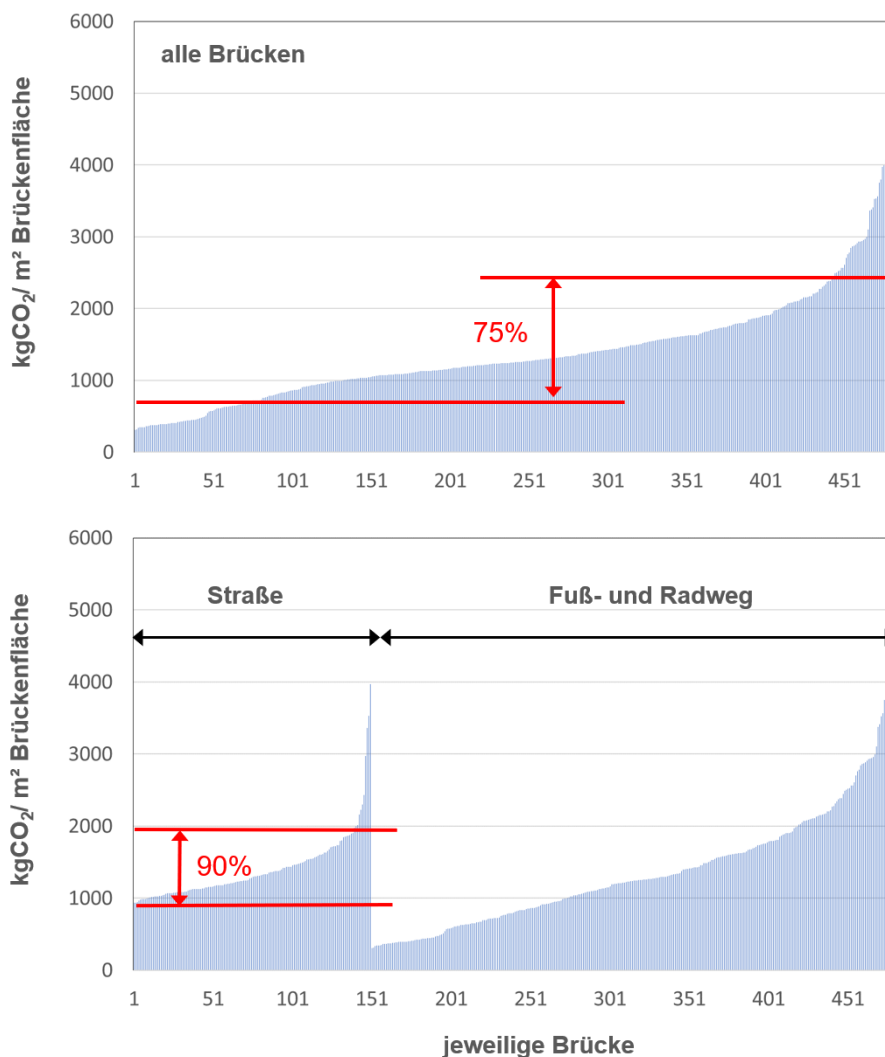


Bild 4.3 CO₂-Emission in kg/m² Brückenfläche: Gesamt (oben) bzw. getrennt nach Straßen- sowie Fuß- und Radwegbrücken (unten)

Bei näherer Betrachtung liegen die CO₂-Kennwerte der Straßenbrücken deutlich dichter beieinander, hier liegen 90% der Werte zwischen 1,0 und 2,0 tCO₂/m² Brückenfläche, der Mittelwert liegt bei ca. 1,4 tCO₂/m². Die Fuß- und Radwegbrücken weisen eine deutlich größere Spannweite hinsichtlich des CO₂-Bedarfs auf, hierbei ist auffällig, dass der Großteil der Fuß- und Radwegbrücken erwartungsgemäß niedrigere CO₂-Werte als die Straßenbrücken aufweisen; überraschenderweise sind jedoch auch Fuß- Radwegbrücken mit sehr hohen CO₂-Werte vorhanden, in Einzelfällen von über 5 tCO₂/m² Brückenfläche.

Die Hintergründe werden in dem Kapitel 4.3.4 erläutert, an dieser Stelle zunächst einmal die reine Einordnung der Größenordnung.

4.3.2 Analyse der CO₂-Emission über die Lebensdauer

Im nächsten Schritt wird analysiert, in welchen Lebenszyklusphasen des Bauwerks der wesentliche Anteil des CO₂-Bedarfs verbraucht wird.

Die CO₂-Emissionen des Bauwerks wurden hierbei in allen Phasen des Lebenszyklus ermittelt. Angefangen von der Herstellung der Baustoffe (Module A1-A3), der Erstellung des Bauwerks (Module A4-A5), der Nutzung des Bauwerks (Module B1-B8) sowie dem Rückbau (Module C1-C4) und den Gutschriften aus dem Recyclingpotential (Modul D). In Bild 4.4a ist der CO₂-Bedarf jeder Phase als Mittelwert über alle Bauwerke dargestellt, die Streuung der Werte liegt etwa bei 15%.

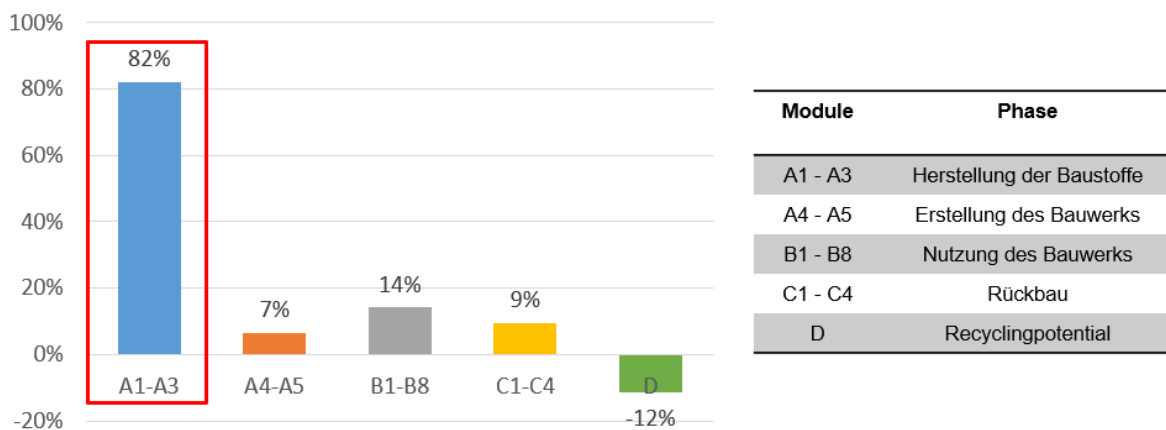


Bild 4.4a CO₂-Emission aller Brückenbauwerke über alle Lebenszyklusphasen (Module A bis D)

Die Auswertung in Bild 4.4a zeigt eindeutig, dass der zentrale CO₂-Anteil (im Mittel 82%, Streuung mit Ausnahme von Holzbrücken bei unter 15%) auf die Emission im Zuge der Herstellung der Baustoffe zurückzuführen ist. Die CO₂-Anteile der anderen Phasen sind deutlich geringer. In der Phase der Erstellung des Bauwerks (Module A4-A5) sind dies letztlich im Wesentlichen die vergleichsweise geringen CO₂-Aufwendungen des Diesel-Verbrauchs der Fahrzeuge und Baumaschinen während der Bautätigkeit. In der Nutzungsphase sind dieses die CO₂-Aufwendungen im Zuge des Austausches der Verschleißbauteile wie Fahrbahnbelag, Brückenkappen etc., die sich dem Modul B4 zuordnen lassen. Durch die Berücksichtigungen potenzieller Ressourcen im Recycling-Prozess wird die CO₂-Bilanz des Bauwerks um etwa 10% verbessert.

Größere Abweichungen von der in Bild 4.4a dargestellten CO₂-Verteilung ergeben sich lediglich bei reinen Holzbrücken. Da bei dem Baustoff Holz in der Herstellungsphase das in der Wachstumsphase des Baumes gebundene CO₂ als negativer Abzugswert in der CO₂-Bilanz günstig berücksichtigt wird, fallen hier auch bei additiver Berücksichtigung von CO₂-haltigen Bauteilen aus Überbau wie Aussteifung und Geländer aus Stahl in Summe nahezu keine CO₂-Aufwendungen an (Bild 4.4b links). Bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus gleicht sich der positive Effekt allerdings aus, da das gebundene CO₂ nach dem Abbruch (entweder durch Verbrennung oder Verrottung) wieder entweicht. Wenn das gesamte Brückenbauwerk (also Überbau und Unterbau) betrachtet wird (Bild 4.4b rechts), relativiert sich der Effekt, weil die Unterbauten in Stahlbetonbauweise erstellt und der CO₂-Bedarf prinzipiell

dem Bild 4.4a folgt. Ins Summe fallen hier etwa 40-50% der gesamten CO₂-Emission in der Herstellungsphase an.

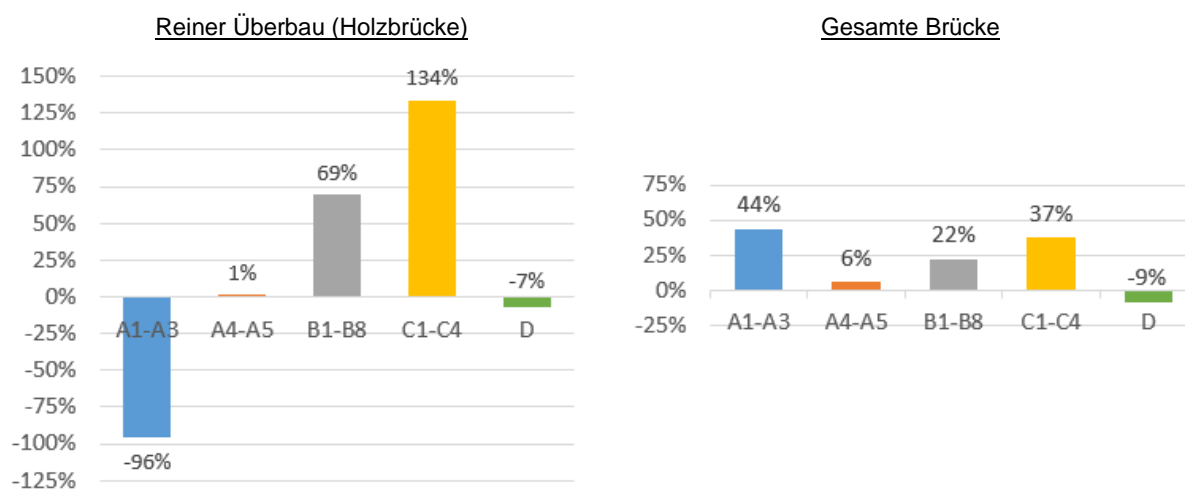


Bild 4.4b CO₂-Emission der Holzbrücken über alle Lebenszyklusphasen: reiner Überbau (links) sowie gesamtes Brückenbauwerk (rechts)

4.3.3 Abhängigkeit der CO₂-Emission von Baustoffen

Im Folgenden ist analysiert worden, welche Baustoffe den Hauptanteil am CO₂-Bedarf der Brückenbauwerke haben. Hierzu ist in Bild 4.5 zunächst einmal dargestellt, welchen CO₂-Bedarf die wesentlichen Baustoffe haben, die im Brückenbau typischerweise zur Anwendung kommen, dieses jeweils unterteilt nach den einzelnen Phasen A bis D bzw. als Summe. Um die Werte vergleichbar zu machen, ist einheitlich die Einheit ein Kubikmeter [m³] verwendet worden, die man sich auch „plastisch“ / „visuell“ gut vorstellen kann.

Gerade metallische Baustoffe weisen bezogen auf den Kubikmeter in der Herstellungsphase einen sehr hohen CO₂-Verbrauch auf, ein Teil kann durch das Recyclingpotential wieder kompensiert werden. Baustoffe wie Holz weisen in der Phase A (Herstellung der Baustoffe) zunächst einmal einen negativen CO₂-Abzugswert auf, da in der Wachstumsphase des Baumes ja zunächst einmal CO₂ gebunden wird. Unter Einbezug aller Phasen, bis hin zum Rückbau bzw. Recycling, relativiert sich dieser Effekt allerdings, da das gebundene CO₂ am Ende der Lebensdauer wieder entweicht, sei es durch eine Verbrennung oder durch eine Verrottung. Da der Rückbau der Bauwerke, die der vorliegende Bericht behandelt, weit in der Zukunft liegt, ist nicht davon auszugehen, dass Holz nach dem Ausbau noch thermisch genutzt wird (bzw. falls doch, die aktuellen Kompensationswerte deutlich geringer ausfallen würden), so dass eine stoffliche Verwertung zugrunde gelegt wurde. Unter Einbeziehung der Verarbeitungsprozesse liegen die CO₂-Kennwerte von Vollholz dann im Bereich von Asphalt bzw. bei Bettschichtholz etwa bei 70% der Werte von Beton.

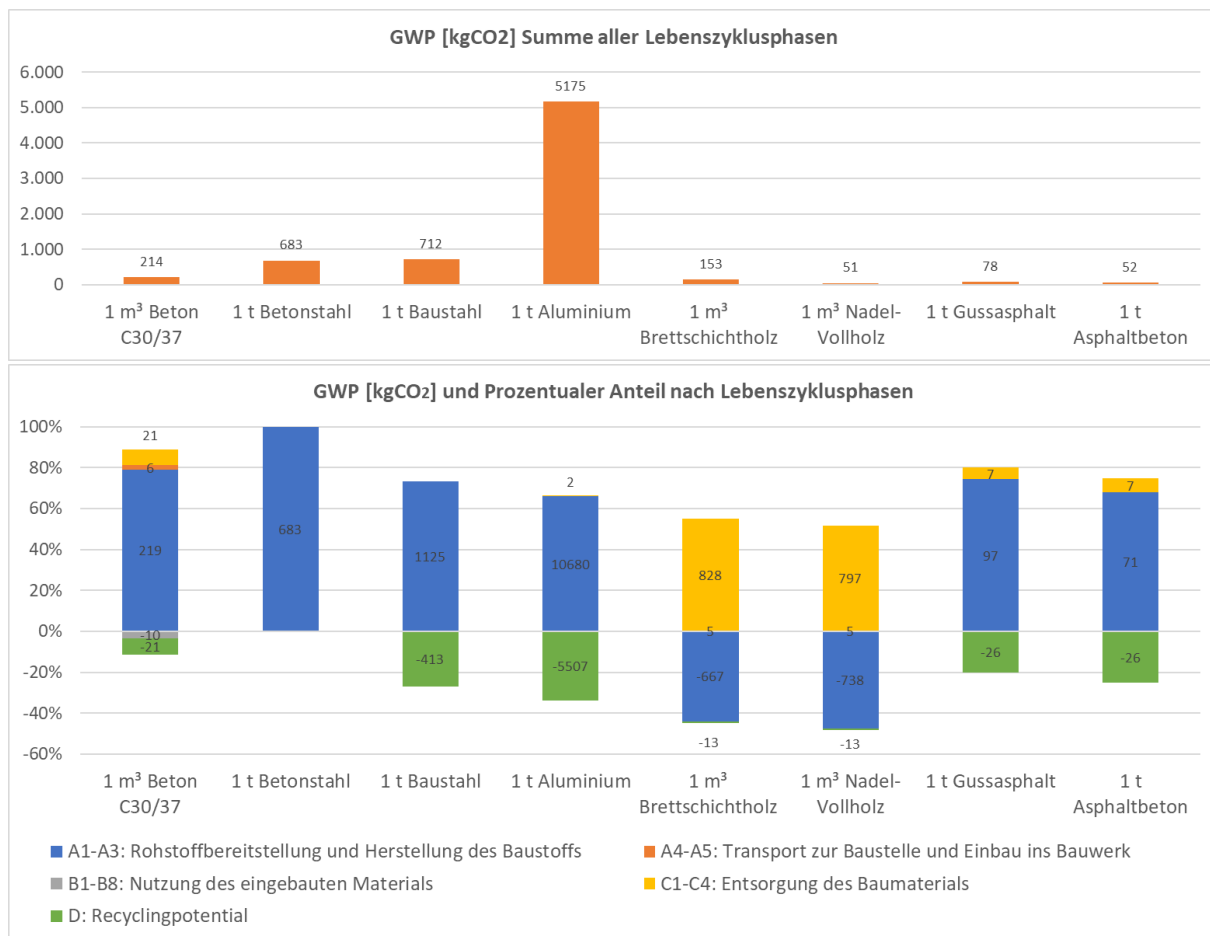


Bild 4.5 Ökobilanzdatensätze der wesentlichen Baustoffe (bezogen auf 1 m³) gemäß der Datensätze der ÖKOBAUDAT [17]: in Summe (oben) bzw. aufgeschlüsselt nach Phasen A bis D (unten)

Mit den, in Bild 4.5 dargestellten, CO₂-Einheitswerten ist auf Bauwerksebene untersucht worden, wie groß der CO₂-Anteil der unterschiedlichen Baustoffe ist. Das Bild 4.6 zeigt dieses für unterschiedliche Brücken (Stahlbeton- bzw. Spannbeton, Stahl, Stahl-Beton-Verbund, Holzbrücke).

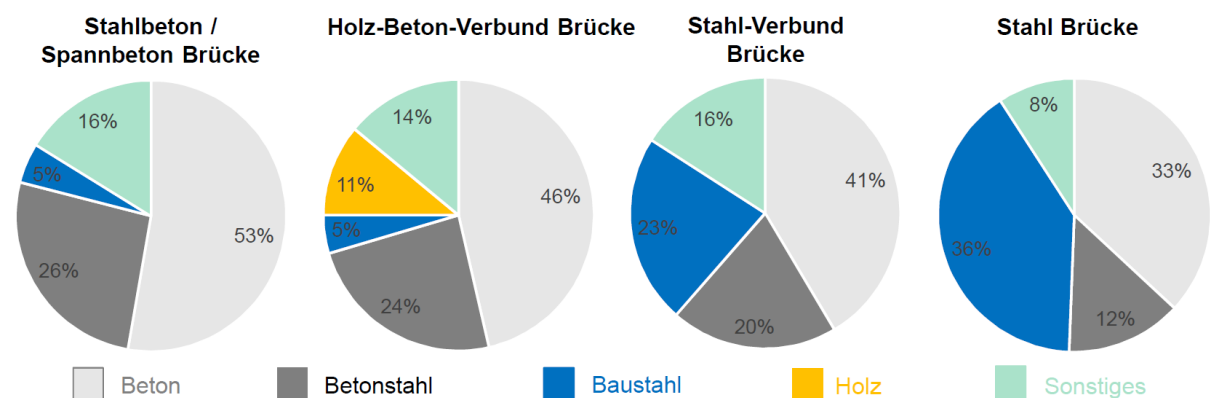


Bild 4.6 Anteil der Hauptbaustoffe an den CO₂-Emissionen für unterschiedlichen Bauwerkstypen

Die Auswertung zeigt relativ offensichtlich, dass die Baustoffe Beton und Stahl mit über 80% für den wesentlichen Anteil der CO₂-Emissionen verantwortlich sind, dies zieht sich durch alle Brückentypen bzw. Baustoffe. Hiernach entfällt mindestens 45% des CO₂-Bedarfs eines

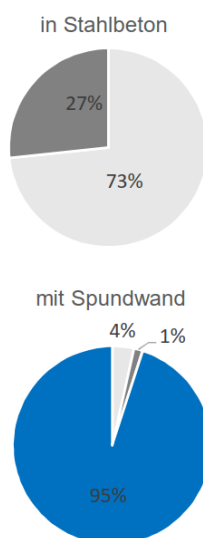
Brückenbauwerks auf den bewehrten Beton. Unter Berücksichtigung, dass bei den betrachteten Brückenbauwerken mit einer Länge bis 40 m in der Realität die meisten in Betonbauweise erstellt werden, lassen sich umgerechnet etwa 65% des CO₂ von Brückenbauwerken dem bewehrten Beton zuweisen.

Die Anteile der Baustoffe wurden auch in Unterbauten und Überbauten getrennt untersucht (Bild 4.7). Bei den Unterbauten in Stahlbetonbauweise ist zu sehen, dass die Stahlbewehrung ca. 30% und der Beton ca. 70% des CO₂-Bedarfs ausmachen.

In der Tragkonstruktion unterschiedlicher Bauweisen lassen sich die Anteile der Haupt-Baustoffe in Bild 4.7 rechts gegenüberstellen. Bei der Holz-Beton-Verbund-Bauweise entfallen die CO₂-Emissionen aus den Holzträgern nur auf etwa 1/4 des gesamten CO₂-Bedarfs, während die Stahlbetonplatte für etwa 3/4 der CO₂-Emission verantwortlich ist. Bei der Verbundbauweise halten sich die CO₂-Aufwendungen von Stahlbauteilen und Stahlbeton die Waage.

Hintergrund ist einerseits der hohe Massenanteil an bewehrtem Beton, der durch die massiven Widerlager und die Gründung (etwa 50 - 60% des gesamten Bauwerks) letztlich bei allen Bauwerkstypen festzustellen ist, und andererseits die hohen CO₂-Aufwendungen des Betons. Ein Kubikmeter bewehrter Beton (im Brückenbau i.d.R. C30/37 bzw. C35/45) verursacht in Summe etwa 300 kgCO₂, hierbei entfallen ca. 70% auf den Beton und ca. 30% auf den Bewehrungsstahl (vgl. Bild 4.7). Der CO₂-Bedarf des Betons steigt in etwa um 10% mit jeder höheren Festigkeitsklasse.

Unterbauten und Gründung



Überbauten - Tragkonstruktion

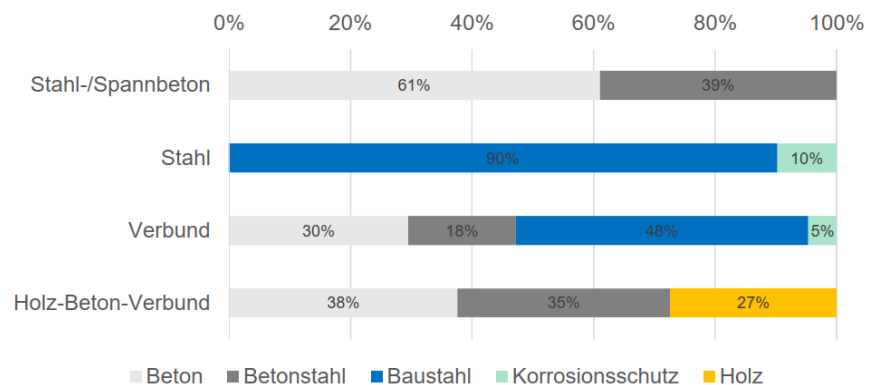


Bild 4.7 CO₂-Anteil der Baustoffe in Unterbauten und Überbauten

4.3.4 Abhängigkeit der CO₂-Emission von geometrischen Grundparametern

In einem weiteren Schritt wird untersucht, ob Abhängigkeiten des Kennwertes CO₂/m² Brückenfläche von der Bauwerksgeometrie (Brückenlänge, -breite, Höhe) erkennbar sind. Hierbei ist eine zunächst überraschende Abhängigkeit der CO₂-Emission von der Brückenlänge feststellbar. Der Effekt wird umso deutlicher, wenn wie in Bild 4.8 dargestellt, auch in der Literatur dokumentierte CO₂-Berechnungen einbezogen werden. Hier wurden in [27] Brückenbauwerke mit vergleichbaren Bauwerkslängen bilanziert, in [28] wurden aber auch Großbrücken mit bis zu 450 m Bauwerkslänge bilanziert.

Ab einer Brückenlänge von etwa 50 m scheinen die CO₂-Emissionen je Quadratmeter Brückenfläche relativ konstant zu sein, aber gerade bei den im Rahmen dieses Projektes betrachteten Brücken mit einer Länge von weniger als 50 m, ergibt sich ein deutlicher Anstieg des CO₂-Gehaltes mit abnehmender Brückenlänge.

Die nähere Analyse zeigt, dass die Abhängigkeit der Bauwerkslänge vornehmlich auf die Unterbauten zurückzuführen ist. Der CO₂-Anteil der Überbauten weist zwar starke Streuungen auf, die aber auf die Verschiedenartigkeit der Bauwerke (unterschiedliche Materialien, Querschnittstypen, Straßenbrücke kombiniert mit Fuß- und Radwegbrücke etc.) zurückzuführen sind, hier ist keine sich abzeichnende Tendenz erkennbar; im Mittel kann für die Überbauten ein mittlerer CO₂-Kennwert von ca. 600 kg/m² Brückenfläche angegeben werden, um den die Werte der einzelnen Bauwerke entsprechend streuen.

Für das gesamte Brückenbauwerk lässt sich (ab einer Länge von 50 m) ein Wert von ca. 1.200 kgCO₂/m² Brückenfläche angeben, der sich etwa zur Hälfte auf die Unter- und Überbauten aufteilt, bei unterhalb von 50 m dann der hohe Anstieg bei Bauwerken geringer Brückenlänge.

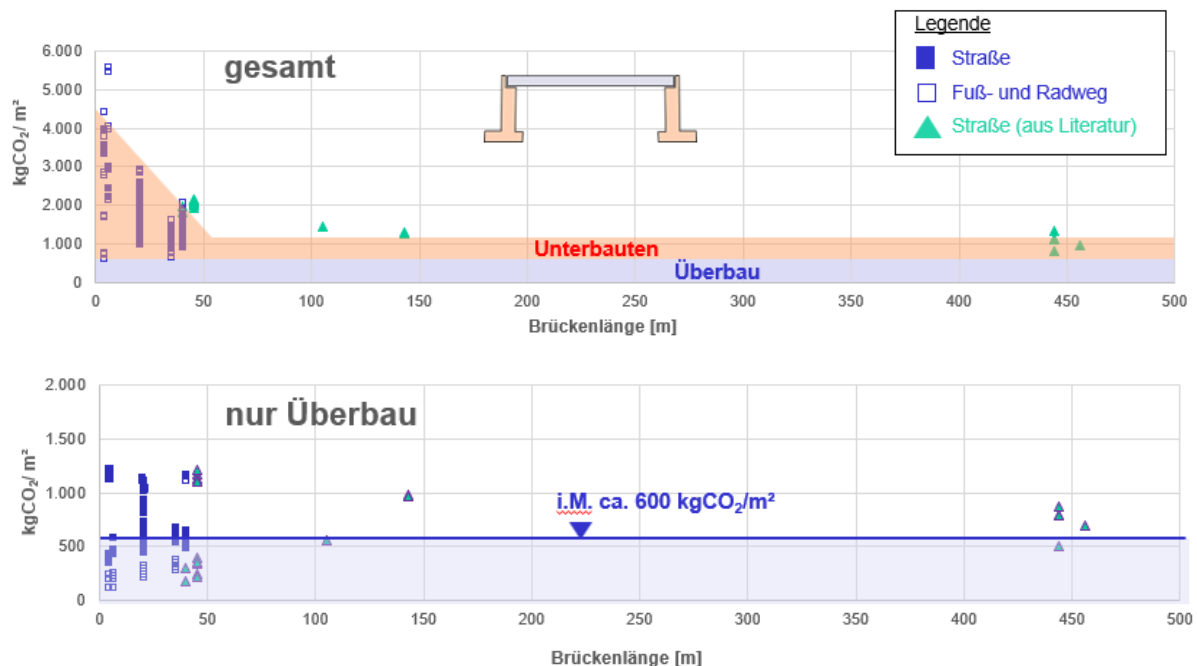


Bild 4.8 Abhängigkeit des Kennwertes CO₂/m² Brückenfläche von der Bauwerkslänge; oben: gesamtes Bauwerk; unten: lediglich Überbau.

Die eingehendere Untersuchung zeigt, dass der Anstieg der CO₂-Kennwerte auf die im Regelfall massiven Betonwiderlager verursacht ist. Je Kastenwiderlager werden zwischen 60 tCO₂ und 110 tCO₂ bei Straßenbrücken, sowie zwischen 30 tCO₂ und 40 tCO₂ bei Fuß- und Radwegbrücken verbraucht (siehe Abschnitt 4.4), dieses erhöht gerade bei geringer Bauwerkslänge den auf die Brückenfläche umgelegten CO₂-Bedarf. Bereits bei Bauwerkslängen von weniger als 40 m überwiegt der CO₂-Bedarf der Widerlager in vielen Fällen, daher sind die Widerlager ein entscheidender CO₂-Treiber. In Bild 4.9 ist zu erkennen, dass der CO₂-Anteil der Unterbauten inklusive Erdarbeiten etwa 50 - 65% des gesamten CO₂-Bedarfs des Bauwerks ausmacht.

CO₂-Anteile nach Bauteilgruppen

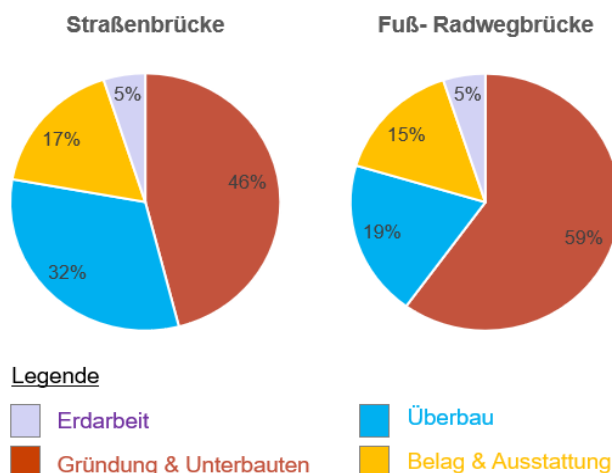


Bild 4.9 links: Anteile an CO₂-Emissionen nach Bauteilgruppen bei Straßenbrücken und Fuß-Radwegbrücken; rechts: Grenzfall - Rahmenbrücke mit ca. 3 m Spannweite - Hauptmassen im Bereich der Widerlager

4.4 CO₂-Emission der Unterbauten und Gründung

4.4.1 Allgemeines

Bereits das vorherige Kapitel hat gezeigt, dass die Unterbauten aufgrund der massiven Stahlbetonkubatur einen sehr großen Einfluss auf den CO₂-Bedarf eines Brückenbauwerks haben. Bei Brücken mit Längen von bis zu 40 m sind dieses im Mittel etwa 50%, der Anteil kann jedoch mit abnehmender Bauwerkslänge nochmal deutlich zunehmen und beträgt bei einer Länge von unter 10 m etwa 75%.

In den folgenden Teilkapiteln wurden die CO₂-Emissionen für ein Widerlager, getrennt für Straßenbrücken bzw. Fuß- und Radwegbrücken, quantifiziert.

4.4.2 CO₂-Emission der Unterbauten und Gründung von Straßenbrücken

Straßenbrücken werden im Regelfall auf massiven Kastenwiderlagern in Stahlbetonbauweise gelagert, die Gründung variiert in Abhängigkeit des Baugrundes zwischen Pfahl- und Flachgründung, wobei – gerade bei dem vergleichsweise schlechten Baugrund in Schleswig-Holstein – im Regelfall eine Pfahlgründung zur Ausführung kommt. Die erforderliche Länge der Stahlbetonpfähle bei Tiefgründung hängt von den Bodeneigenschaften ab. Im Rahmen des Projekts wurden die Pfähle (basierend auf einer Vielzahl realer Brückenbauwerke in Schleswig-Holstein) zwischen 8 m und 18 m Länge variiert, die genauen Mengenangaben sind dem Kapitel 3.5 zu entnehmen.

Es wird davon ausgegangen, dass die massive Gründung und die Unterbauten über 100 Jahren verbleiben und während des Betrachtungszeitraums keine zusätzliche CO₂-Belastung durch Austausch von Bauteilen anfallen wird.

In Bild 4.10 ist der CO₂-Bedarf unterschiedlicher Unterbauten dargestellt. Es wurden hierbei sowohl die Gründungsart (Flachgründung / Tiefgründung) als auch die Breite der Widerlagerung und die Pfahltiefe (8 m bzw. 18 m) variiert. Grundsätzlich werden für ein Widerlager zwi-

schen 100 und 300 tCO₂ verbraucht, wobei die Breite wegen der Flügelwände unterproportional eingeht. Bei allen Varianten fiel die Flachgründung, in der CO₂-Bilanz, um etwa 20% günstiger aus als die Tiefgründung.

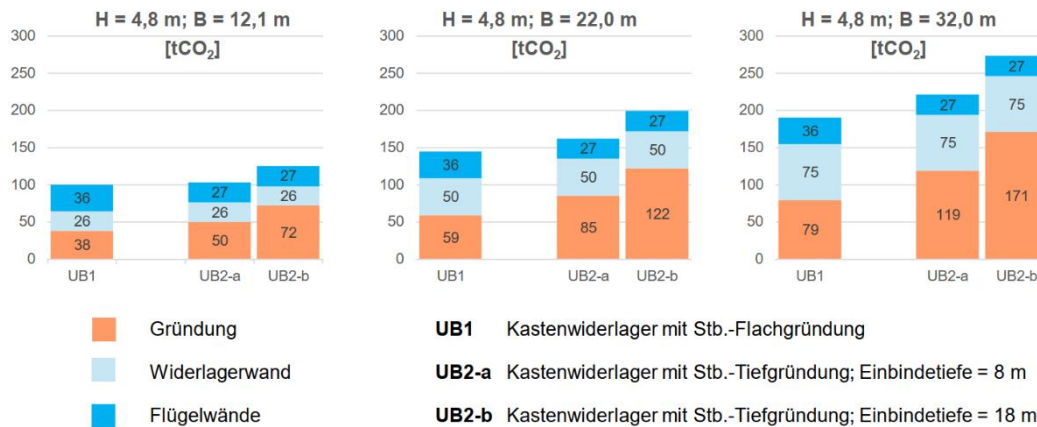


Bild 4.10 CO₂-Emissionen eines Widerlagers mit Gründung der Straßenbrücke bei verschiedenen Varianten

Der entscheidende Eingangsparameter bei der CO₂-Bilanz der Widerlager ist die Ansichtsfläche, daher sind die ermittelten CO₂-Emissionen der Widerlager inkl. Gründung in Bild 4.11 auf die Ansichtsfläche bezogen worden.

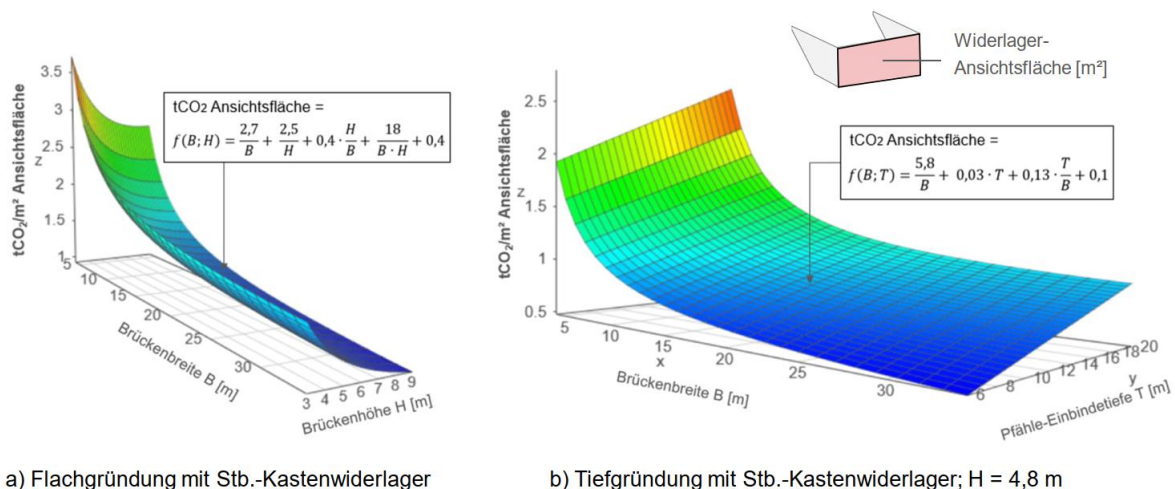


Bild 4.11 CO₂-Bedarf der Unterbauten von Straßenbrücken inklusive Gründung, bezogen auf die Ansichtsfläche eines Widerlagers

Für eine ungefähre Abschätzung im Zuge von vorplanerischen Untersuchungen sind aus den komplexen Verläufen, des Bildes 4.11, Mittelwerte für den CO₂-Bedarf eines Widerlagers bezogen auf die Ansichtsfläche abgeleitet worden (siehe Bild 4.12). Die mittleren CO₂-Emissionswerte schwanken bei Flachgründungen zwischen 1,3 und 1,8 tCO₂ je m² Ansichtsfläche des Widerlagers und liegen im Mittel bei ca. 1,5 t/m². Bei Tiefgründungen liegen die Werte im Bereich von 1,4 t/m² bis 2,2 t/m², mit einem Durchschnitt von ca. 1,8 t/m².

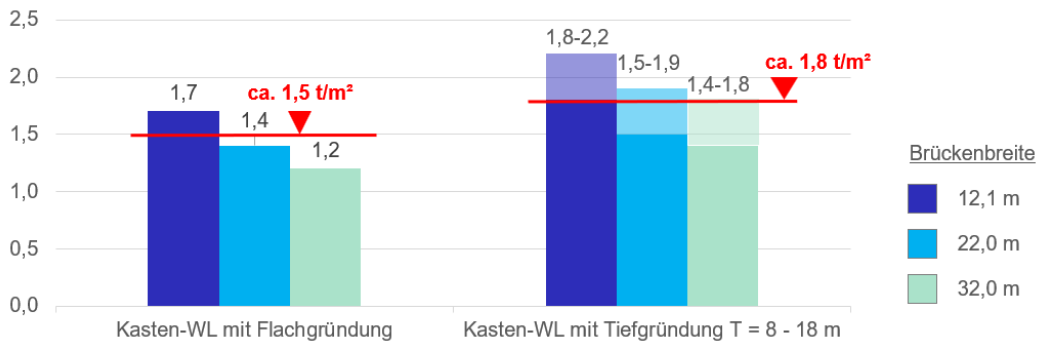


Bild 4.12 CO₂-Bedarf der Unterbauten von Straßenbrücken inklusive Gründung bezogen auf die Ansichtsfläche eines Widerlagers

4.4.3 CO₂-Emission der Unterbauten und Gründung von Fuß- und Radwegbrücken

Bei Fuß- und Radwegbrücken entfallen etwa 60% des gesamten CO₂-Bedarfs des Bauwerks auf die Unterbauten (siehe Bild 4.9). Die CO₂-Treiber sind die seitlichen Flügelwände, deren Abmessungen sich in der Regel nur begrenzt optimieren lassen. Wie in Bild 4.13 dargestellt ist, machen die Flügelwände etwa 40 bis 55% der CO₂-Emission des gesamten Unterbaus aus. Ein Widerlager mit Tiefgründung verursacht insgesamt weniger CO₂ als eines mit einer Flachgründung. Der Grund dafür ist, dass bei einer Tiefgründung die Flügelflächen aufgrund der Geometrie kleiner dimensioniert werden, was zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen führt.

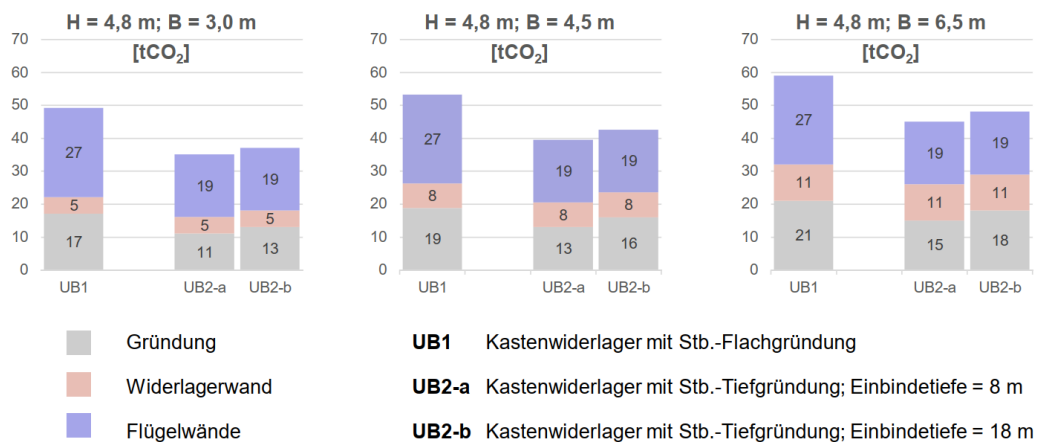


Bild 4.13 CO₂-Emissionen eines Widerlagers mit Gründung der Fuß-Radwegbrücke bei verschiedenen Varianten

Sofern Fuß- und Radwegbrücken ebenfalls auf einem massiven Kastenwiderlager gegründet werden, weisen diese höhere Kennwerte CO₂/m² Widerlageransichtsfläche auf als Straßenbrücken. Obwohl diese wegen der geringeren statischen Beanspruchung um etwa 50% filigraner ausgebildet werden können, überwiegt hier der negative Einfluss, dass die Flügelwände auf eine sehr geringe Brückenbreite zwischen 3,0 m und 6,5 m umgelegt werden müssen. Hierdurch liegt die CO₂-Emission bezogen auf die Ansichtsfläche mit Werten zwischen 1,9 und 3,4 kgCO₂/m² (siehe Bild 4.14) sogar oberhalb der Werte für die Straßenbrücken. Dieser Effekt ist auch ursächlich für die teilweise sehr hohen Kennwerte CO₂/m² Brückenfläche, die bei einige Fuß- und Radwegbrücken in Abschnitt 4.3.1 bzw. Bild 4.3 festgestellt wurden. Hierbei handelt es sich um Brücken mit geringer Brückenlänge und Kastenwi-

derlager. Da das massive und CO₂-intensive Kastenwiderlager auf eine sehr geringe Brückenfläche umgelegt werden muss, sind hier die hohen CO₂-Emissionen von bis zu 5,5 tCO₂/m² Brückenfläche in Bild 4.3 erklärbar.

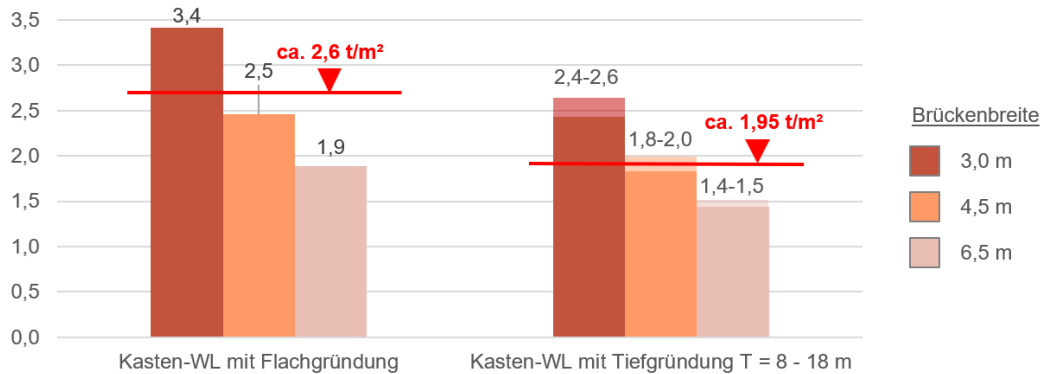


Bild 4.14 CO₂-Bedarf der Unterbauten von Fuß- und Radwegbrücken inklusive Gründung bezogen auf die Ansichtsfläche eines Widerlagers

Bei Fuß- und Radwegbrücken treten derartige massive Kastenwiderlager zwar auf, sind aber nicht der Regelfall. Gerade auch, weil die Gesamtkonstruktionen wegen der geringen Verkehrslasten filigraner ausgebildet sind, wird vielfach versucht, diesen „leichteren“ Eindruck auch bis zur Gründung durchzuführen. Weil der Zuwachs an Brückenfläche nicht in dem hohen Maße ins Gewicht fällt, wie bei massiveren Straßenbrücken, werden hier oftmals zurückgesetzte Widerlager ausgebildet oder die Höhendifferenz durch eine Anrampung realisiert (Bild 4.15). Die verbleibenden Widerlager können dann wegen der geringen Gründungslasten auch mit vergleichsweise geringen Massenaufwendungen ausgeführt werden, siehe z.B. die Gründung über einen Lagersockel und Schachtringe bei einer ca. 15 m langen Fuß- und Radwegbrücke in Bild 4.16.



Bild 4.15 Fuß- und Radwegbrücke zur Überquerung der Bahnstrecke (hier Brücke am Bahnhof Konstanz-Petershausen): Höhendifferenz wird durch Anrampung / Verlängerung des Brückenbauwerks realisiert

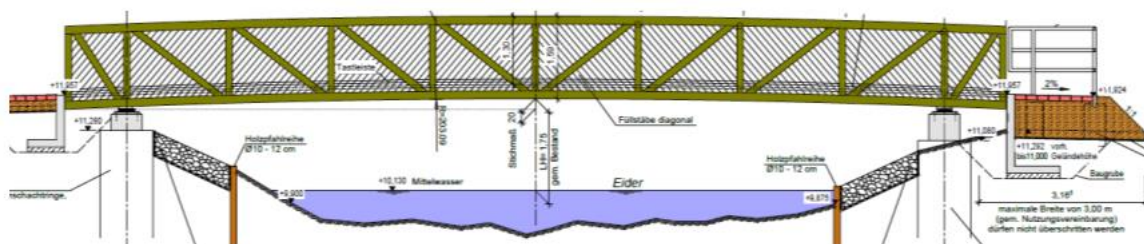


Bild 4.16 Fuß- und Radwegbrücke mit Spannweite von 15,5 m zur Überquerung eines Gewässers; Gründung über Lagersockel und Schachtringe (Planung © Büro Mohn, 2018)

In diesen Fällen eines sehr gedungenen Widerlagers lässt sich der CO₂-Bedarf auch zutreffend auf die Brückenfläche beziehen, dieses gilt sowohl für einen Einfeldträger oder aber auch bei Durchlaufsystemen mit Stützenabständen von ca. 15 - 20 m, z.B. auch im Zuge von Anrampungen.

Die Auswertung der Parameterstudie zeigt, dass der CO₂-Bedarf dieser Gründungen, die gemäß konkreter Ausführungsbeispiele des Ingenieurbüros Mohn dimensioniert worden sind, im Bereich von ca. 0,15 - 0,45 tCO₂/m² Bauwerksfläche liegen. Die Große Streuung ist durch die Vielzahl der Variationsmöglichkeiten erklärbar.

4.5 CO₂-Emission der Überbauten

4.5.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die CO₂-Emissionen der Brückenüberbauten analysiert. Die Untersuchung gliedert sich in:

- CO₂-Emission der Tragkonstruktion für Straßenbrücken in Abschnitt 4.5.2
- CO₂-Emission der Tragkonstruktion für Fuß- und Radwegbrücken in Abschnitt 4.5.3
- CO₂-Emission der Beläge und Brückenausstattung Abschnitt 4.5.4

4.5.2 CO₂-Emission der Überbauten von Straßenbrücken

Im Folgenden sind die CO₂-Emissionen der Tragkonstruktion von Brückenüberbauten verschiedener Straßenbrücken untersucht worden. Der Standardfall ist ein Einfeld-System mit beidseits gelenkiger Lagerung, der Untersuchungsumfang enthält jedoch auch integrale Brücken bzw. bei Spannweiten ab 40 m auch Zweifeld-Systeme (siehe im Detail: Anhang [C]).

Aus Gründen der Vergleichbarkeit bietet es sich an, den CO₂-Bedarf auf die Brückenfläche zu beziehen. Die Darstellung in Bild 4.17 zeigt die Emissionen in kgCO₂/m² Brückenfläche. Hierbei sind die Werte, in einem Fall (Bild 4.17 links) so dargestellt, dass die Lebensdauer aller Überbauten jeweils 100 Jahre beträgt, in einem anderen Fall wurden für die Holz-Beton-Verbund-Brücken eine Lebensdauer von lediglich 50 Jahren angenommen (Bild 4.17 rechts).

Die Auswertung zeigt, dass die CO₂-Anteile der Brücken, die in konventioneller Beton- bzw. Stahlbauweise erstellt werden, bezogen auf den m² Brückenfläche unabhängig von der Wahl des Baustoffs in einer ähnlichen Größenordnung liegen. Der Mittelwert beträgt ca. 375 kgCO₂/m² Brückenfläche. Der Stahlüberbau weist mit ca. 340 kg/m² Brückenfläche den geringsten CO₂-Bedarf auf, dieses ist bei näherer Analyse der Daten vor allem auf den Einfluss der mitgerechneten Gutschrift durch das Recyclingpotential zurückzuführen.



Bild 4.17 Straßenbrücke - Kennwert CO₂/m² Brückenfläche für unterschiedliche Konstruktionsweisen für zwei Grenzfälle

links: alle Brücken weisen eine identische Lebensdauer von 100 Jahren auf

rechts: für die Holz-Beton-Verbund-Variante wird lediglich eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen

Letztlich liegen die Werte der CO₂-Emissionen aller Varianten, zwischen 340 und 420 kgCO₂/m², vergleichsweise dicht beieinander und schwanken damit um ca. 12-15% um den Mittelwert. Die Spannweite der Ergebnisse liegt damit im Bereich der Streuung der Massenansätze (siehe hierzu Kapitel 3.5). Daher kann im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung an Brücken mit Längen bis zu 40 m keine Präferenz hinsichtlich einer Stahl- bzw. einer Betonbauweise ausgesprochen werden, sondern die Varianten sind (innerhalb der hier möglichen Genauigkeit) als gleichwertig im Hinblick auf die CO₂-Bilanz anzusehen.

Auffällig ist lediglich die Holz-Beton-Verbundkonstruktion. 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 (siehe Erfahrungen in [24]), ist der CO₂-Bedarf mit ca. 327 kgCO₂/m² etwas unterhalb des Durchschnittes. Wenn die Lebensdauer allerdings eher im Bereich 50-60 Jahren liegt (die aktuelle Ablöserichtlinie ABBV 2010 legt aktuell 60 Jahre zu Grunde) und der Überbau innerhalb der Lebensdauer von 100 Jahren zweimal erstellt werden muss, schneidet diese Variante sogar am schlechtesten ab. Einerseits geht auch das Brettschichtholz im Falle einer stofflichen Verwertung mit ca. 153 kgCO₂/m³ in die CO₂-Bilanz mit ein, und andererseits ist in diesem Falle auch die ca. 30 cm starke Betonplatte zweimal zu erstellen. Im Falle einer Holz-Beton-Verbund-Konstruktion ist daher die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit ein entscheidender Punkt.

4.5.3 CO₂-Emission der Überbauten von Fuß- und Radwegbrücken

Im Falle von Fuß- und Radwegbrücken kommen für den Überbau einerseits die gleichen Konstruktionsvarianten wie bei Straßenbrücken in Betracht (wegen der geringeren Verkehrslast lediglich filigraner ausgebildet), darüber hinaus sind auch ergänzende Bauweisen herangezogen worden, wie eine reine Holzbauweise bzw. eine Aluminium-Fachwerkkonstruktion, wie sie in den letzten Jahren in Schleswig-Holstein ebenfalls häufig ausgeführt wurde. Bei Holzbrücken wurde in Holzdeckbrücke und Holztrögbrücke unterschieden.

Auch hier ist die CO₂-Emission wieder auf die Brückenfläche bezogen worden und in der Einheit CO₂/m² Brückenfläche dargestellt. Bezüglich der Ergebnisse sind wie bei den Straßenbrücken wieder zwei Betrachtungen ausgewertet worden, in einem Fall wurden für die Holz- bzw. Holz-Beton-Verbundbrücken die gleiche Lebensdauer von 100 Jahren angenommen wie für die konventionellen Stahl- bzw. Betonbrücken (siehe Auswertung in Bild 4.18 links),

im anderen Grenzfall wurde bei von Holzvarianten mit 50 Jahren lediglich von der halben Lebensdauer ausgegangen.

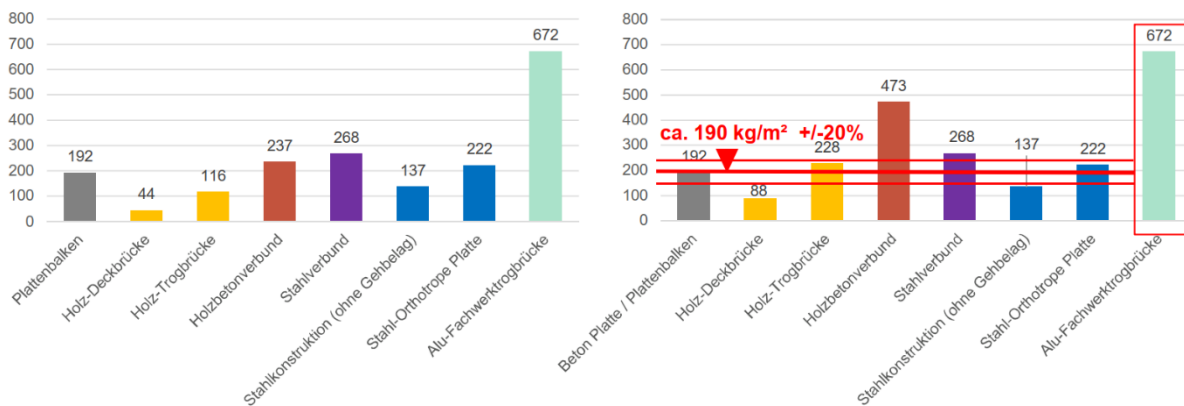


Bild 4.18 Fuß-Radwegbrücke - Kennwert CO₂/m² Brückenfläche für unterschiedliche Konstruktionsweisen für zwei Grenzfälle
 links: alle Brücken weisen eine identische Lebensdauer von 100 Jahren auf
 rechts: für die Holz und Holz-Beton-Verbund-Variante wird lediglich eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bei Fuß- und Radwegbrücken wird infolge der filigraneren Ausbildung weniger CO₂ verbraucht, der Mittelwert liegt mit ca. 190 kgCO₂/m² Brückenfläche, knapp 50% unterhalb der Werte der Straßenbrücken. Auch hier liegt der CO₂-Bedarf der unterschiedlichen Bauwerkstypen wieder relativ dicht beieinander. Unterhalb der Spannweite von +/-20% liegen lediglich Holzbrücken bzw. Stahlkonstruktionen ohne orthotrope Platte.

Vor allem die Holz-Deckbrücken weisen mit einem Wert von ca. 44 kgCO₂/m² Brückenfläche einen sehr geringen CO₂-Bedarf aus. Sofern der konstruktive Holzschutz sichergestellt ist, ist gemäß ABBV von einer Lebensdauer von 60 Jahren auszugehen, wobei in der hier vorgenommenen Berechnung vereinfacht von einer Lebensdauer von 50 Jahren ausgegangen wurde, so dass der CO₂-Bedarf dann bezogen auf die 100 Jahre Betrachtungszeitraum auf 100 Jahre / 50 Jahre Lebensdauer x 44 = 88 kgCO₂/m² Brückenfläche anwächst. Auch hiermit bleibt dieses allerdings die Variante mit der geringsten CO₂-Emission.

Einen ebenfalls geringen CO₂-Ausstoß weisen leichte Stahlkonstruktionen auf, die lediglich aus Längs- und Querträgern bestehen und keine orthotrope Platte aus Stahl ausgebildet wird.

Vergleichsweise schlecht schneiden die Holz-Beton-Verbundvarianten sowie die Aluminiumüberbauten ab. Bei der Holz-Beton-Verbund-Variante ist dieses, wie bereits bei der Straßenbrücke, auf die zweifache Herstellung innerhalb der 100-jährigen Lebensdauer zurückzuführen, was gerade bei der Fuß- und Radwegbrücke nochmals stärker ins Gewicht fällt, weil die Ausbildung einer CO₂-intensiven Betonpatte hier statisch nicht zwingend erforderlich ist. Bei den Aluminiumbrücke ist dieses auf die CO₂-intensive Herstellung des anodisierten Aluminiums zurückzuführen, bei der etwa 10,7 kgCO₂ pro kg Aluminium emittiert werden (vgl. Bild 4.4). Da der Haupt-CO₂-Anteil bei Aluminium allerdings stromabhängig ist, wäre hier mittelfristig eine signifikante Reduzierung möglich, wenn der Strom in einem deutlich höheren Maße CO₂-neutral produziert wird (siehe Abschnitt 4.8). Ebenso weisen die leichten Aluminiumkonstruktionen insofern Potential auf, dass diese in kurzer Zeit eingehoben bzw. montiert werden und keine aufwendigen Korrosionsschutzmaßnahmen erforderlich sind. Gerade

da derartige Tätigkeiten mit einem Eingriff in den Straßenverkehr verbunden sind und zusätzliches CO₂ durch die Emissionen von sich stauenden Fahrzeugen entsteht, kann dieses im Hinblick auf die CO₂-Bilanz ein Vorteil sein.

4.5.4 CO₂-Emissionsanteile der Beläge und Ausstattung

Bei den Überbauten sind auch hinsichtlich der CO₂-Emissionen neben den Anteilen aus der Tragkonstruktion, die Anteile aus den Verschleißbauteilen, wie dem Belag und der Brückenausstattung zu berücksichtigen. Da die Ausstattungselemente für Straßen- bzw. Fuß- und Radwegbrücken sehr verschiedenartig sind, sind auch diese im Folgenden separat betrachtet. Die bei den einzelnen Brücken berücksichtigte Ausstattung ist in Abschnitt 3.5 zusammengestellt.

Bezüglich der angesetzten Lebensdauer bzw. Austauschhäufigkeit der Baustoffe siehe Abschnitt 3.6.

Straßenbrücke

Bei Straßenbrücken sind neben dem Fahrbahnbelag auch die Kappen und Geländer, sowie ein Fahrzeugrückhaltesystem bei einer Entwurfsgeschwindigkeit von größer 50 km/h als wesentliche Komponenten zu betrachten. Die Brückenlager, die vom CO₂-Bedarf vergleichsweise gering sind, wurden mit sonstige Kleinleistungen in einer 5%-Sonstiges-Pauschale indirekt berücksichtigt.

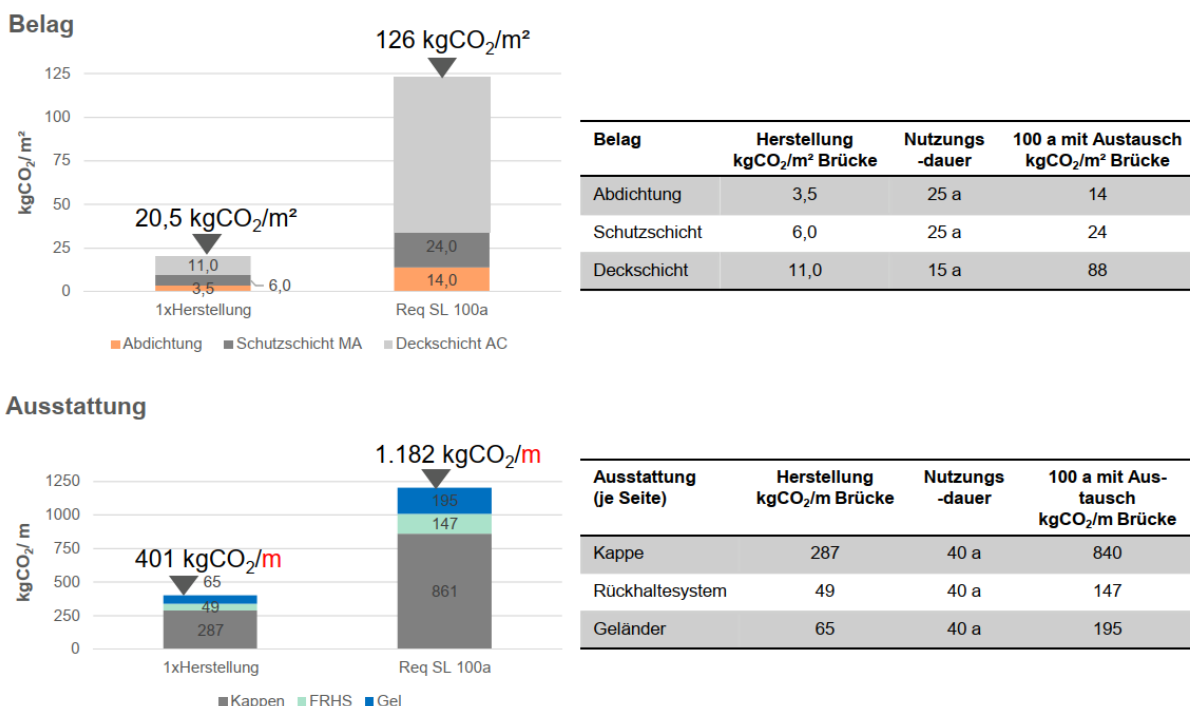


Bild 4.19 CO₂-Werte für die Beläge (oben) und Ausstattung (unten) bei Straßenbrücke

Der Straßenaufbau umfasst in der Regel eine 1 cm dicke Abdichtungslage, eine 3,5 cm dicke Schutzschicht aus Gussasphalt und eine 4 cm dicke Asphaltbetondeckschicht. Hierbei weist ein Quadratmeter Gussasphalts eine CO₂-Emission von 1,8 kg/cm dicke auf, während der Asphaltbeton mit 1,4 kg CO₂/cm dicke etwas günstiger ist. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass die einzelnen Belags-Komponenten im Regelfall unterschiedliche vorgesehene Nutzungsdauern aufweisen (Tabelle 3.4). 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 (siehe Bild 4.19).

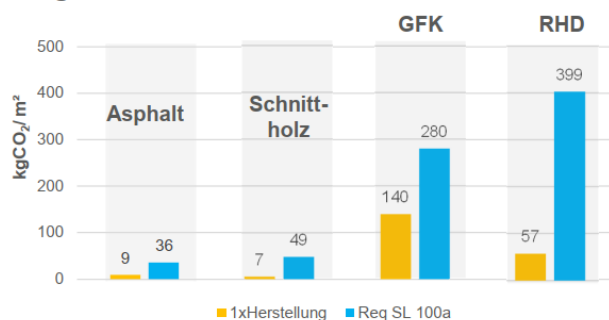
Für das Fahrzeurückhaltesystem wurden ein Stahlsystem (EDSP) mit einer Stahltonnage, von ca. 30kg pro Meter, und eine Betonschutzwand, DB 100AS-R, beide den Freigabelisten der BAST entnommen, variiert. Für das Geländer wurde ein Stahl-Füllstabgeländer Gel 4 gemäß RiZ-ING mit einem Stahlgewicht von etwa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

Die Ergebnisse in Bild 4.19 zeigen, dass die Ausstattung durchaus nicht vernachlässigbar ist. Bereits der Fahrbahnaufbau liegt mit ca. 125kgCO₂/m² Brückenfläche, in der Größenordnung von ca. 30% des Überbaus. Für Kappen inklusive Geländer und Stahl-Fahrzeurückhaltesystem werden ca. 1.200 kgCO₂/m Brücke je Seite ermittelt. Im Fall von Betonschutzwänden, wie zum Beispiel dem DB 100AS-R von BAST (2017), wurde eine CO₂-Aufwendung von etwa 70kg pro laufendem Meter der Wand abgeschätzt, was den Wert des Stahlsystems deutlich übersteigt. Das gewählte EDSP weist eine CO₂-Emission von etwa 25kg CO₂ pro Meter auf. Da das Rückhaltesystem und das Geländer in der Regel bei einem Austausch der Kappen gleichzeitig erneuert werden, kann der Vorteil der längeren Nutzungsdauer eines Stahlbetonbauteils von 100 Jahren in diesem Fall nicht genutzt werden. Bei einer Breite zwischen ca. 12 m und 32 m beträgt der CO₂-Anteil der Ausstattung dann $1\,200 \cdot 2 / (12 \text{ bis } 32) = 75 - 200 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$ Brückenfläche. Somit liegt dieser bei 20 - 55% der CO₂-Werte des Überbaus.

Fuß- und Radwegbrücken

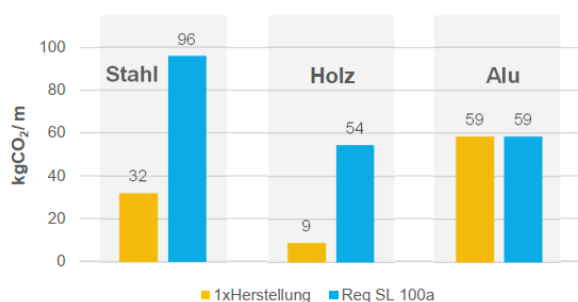
Bei Fuß- und Radwegbrücken wurden der Belag und das Geländer als Ausstattungsmerkmale in der CO₂-Bilanz berücksichtigt. Wie schon bei der Tragkonstruktion des Überbaus liegt auch bei der Ausstattung eine sehr große Bandbreite an Lösungsmöglichkeiten vor, die hier zu beträchtlichen Unterschieden im Hinblick auf den CO₂-Gehalt führen können.

Belag



Belag	Herstellung kgCO ₂ /m ² Brücke	Nutzungs-dauer	100 a mit Austausch kgCO ₂ /m ² Brücke
Asphalt (4cm)	9	25 a	36
Holz-Bohlen	7	15 a	49
GFK-Bohlen	140	50 a	280
RHD-Belag	57	15 a	399

Ausstattung



Geländer (je Seite)	Herstellung kgCO ₂ /m Brücke	Nutzungs-dauer	100 a mit Austausch kgCO ₂ /m Brücke
Stahl	32	40 a	96
Holz	9	20 a	54
Aluminium	59	100 a	59

Bild 4.20 CO₂-Werte für die Beläge (oben) und Ausstattung (unten) bei Fuß- und Radwegbrücke

Die Auswertung in Bild 4.20 zeigt, dass vor allem die Verwendung von kunststoffmodifizierten Belägen wie reaktionsharzgebundener Dünnbelag (kurz RHD) bzw. Glasfaserverstärkter-Kunststoff (kurz GFK) -Bohlenbelag, extrem hohe CO₂-Werte aufweisen, die in der Herstellung der Baustoffe begründet sind. Dort fallen die CO₂-Emissionen hauptsächlich in Form von Energieverbräuchen an, z.B. bei der Raffinierung von Rohstoffen zur Kunststoffherstellung, besonders durch das Steamcracking, wo erhebliche Mengen Energie für die Beheizung des Spaltofens eingesetzt werden. Bei der Herstellung von Glasfasern entfällt der wesentliche Energie- bzw. CO₂-Verbrauch auf die Glasschmelze. Somit werden je Kilogramm GFK etwa 5,3 kgCO₂ benötigt und je kg RHD etwa 5,2 kgCO₂. [17]

Hiermit liegt der CO₂-Bedarf eines Kubikmeters GFK etwa 37-mal höher als der eines Kubikmeters Beton, ähnliches gilt für den RHD-Belag. Damit sind derartige Beläge trotz geringer Einbaustärke (RHD-Belag i.d.R. ca. 6 - 6,5 mm) bzw. langer Lebensdauer (GFK-Bohlen im Regelfall deutlich längere Lebensdauer als Holzbohlenbelag) absolute CO₂-Treiber. Der hieraus resultierende CO₂-Bedarf ist größer als der des gesamten tragenden Überbaus.

Zu beachten ist, dass nicht jeder Überbau mit jeder Ausstattung kombiniert werden kann, daher ist bei der konkreten CO₂-Bilanz immer eine Gesamtbetrachtung (Überbau + Ausstattung) durchzuführen.

4.6 Ergänzende Detailuntersuchungen

4.6.1 Allgemeines

Bevor die Ergebnisse in Abschnitt 4.7 zusammengestellt werden, sind im Folgenden nochmal einzelne Detailuntersuchungen im Hinblick auf die CO₂-Bilanz durchgeführt worden, hierbei handelt es sich um folgende Punkte:

1. Vergleich einer integralen Verbundbrücke mit einer konventionell gelagerten Variante in Abschnitt 4.6.2,
2. Vergleich eines zurückgesetzten Widerlagers mit einem anliegenden Widerlager in Abschnitt 4.6.3,
3. Vergleich eines Spundwandwiderlagers im Vergleich zu einem Stahlbetonwiderlager in Abschnitt 4.6.4,
4. Betrachtung eines Wellstahldurchlasses in Abschnitt 4.6.5.

4.6.2 CO₂-Vergleich einer integralen Brücke mit einer konventionell gelagerten Lösung

Bei einer integralen Brücke wird der Überbau nicht gelenkig (bzw. horizontal verschieblich) auf dem Widerlager gelagert, sondern biegesteif mit diesem verbunden, so dass zwei Rahmenecken entstehen, die einen großen Teil der Biegemomente aufnehmen. Durch die Rahmenwirkung kann der Überbau in Feldmitte wirtschaftlicher dimensioniert werden, ebenso entfallen Lager und wartungsintensive Fahrbahnübergangskonstruktionen. Allerdings ist die Umsetzung der Rahmenecke vergleichsweise aufwendig, da hier im Regelfall große Biegemomente aufzunehmen sind. Durch die Beteiligung am Abtrag des Biegemomentes kommt der Dimensionierung des Widerlagers insgesamt eine größere Bedeutung zu.



Bild 4.21 Eine integrale Verbundbrücke über 6-spurige Autobahn A8-West

Da integrale Brücken in den letzten ca. 15 Jahren gerade bei der Überführung von Verkehrswegen über dichtbefahrene vier- bzw. sechsspurige Straßen zunehmend an Bedeutung gewonnen haben, wurde im Rahmen des Berichtes hierzu nochmal eine separate Untersuchung an zwei konkreten Fällen (12,10 m breite Straßenbrücke mit a) 20 m Spannweite und b) 40 m Spannweite) im Hinblick auf die CO₂-Bilanz durchgeführt. Die Massen wurden basierend auf Planungen des Ingenieurbüros Mohn bzw. des Heinrich Bechert + Partner Ingenieurbüros ermittelt. Die konkreten Ergebnisse sind im Anhang [C] dargestellt, die folgende Tabelle zeigt lediglich eine Zusammenfassung für beide Fälle.

Tabelle 4.5 CO₂-Vergleich zwischen integralen Brücken und gelagerten Brücken

(a) Der zu untersuchende Fall:			
<ul style="list-style-type: none"> - Straßenbrücke, 2-spurig, Breite 12,1 m, Spannweite 20 m - Spannbetonplatte - Tiefgründung 			
Variante	Dicke der Fahrbahnplatte – CO ₂ von Fahrbahnkonstruktion	CO ₂ Gesamt	kgCO ₂ /m ² Brückenfläche
Integrale Brücke	0,7 m / ca. 220 kgCO ₂ /m ²	ca. 385 tCO ₂	ca. 1 500 kgCO ₂ /m ²
Einfeld gelagerte Brücke	1,0 m / ca. 275 kgCO ₂ /m ²	ca. 410 tCO ₂	ca. 1 600 kgCO ₂ /m ²
Vergleich			~ - 6%

(b) Der zu untersuchende Fall:		
<ul style="list-style-type: none"> - Straßenbrücke, 2-spurig, Breite 12,1 m, Brückenlänge 40 m - Tiefgründung 		
Variante / Bauteile	integrale Brücke	2-feldrige gelagerte Brücke
Spannweite	1-Feld, 40 m	2-Felde, je 20 m
Fahrbahnquerschnitt / Konstruktionshöhe h	Spannbetonplattenbalken bzw. Stahlverbund h = 1,35 - 1,50 m	Spannbetonplatte bzw. Stahlbetonplattenbalken h = 1,0 - 1,2 m
Mittelpfeiler	Kein	1x – Stahlbetonpfeiler d = 1,2 m CO ₂ -Anteil von Pfeiler (mit Gründung) = etwa 25 tCO ₂
Fahrbahnkonstruktion	(Mittelwert) = 440 kgCO ₂ /m ²	(Mittelwert) = 320 kgCO ₂ /m ²
CO ₂ Gesamt	ca. 605 tCO ₂	ca. 575 – 625 tCO ₂
kgCO ₂ /m ² Brückenfläche	ca. 1 200 kgCO ₂ /m ²	ca. 1 200 kgCO ₂ /m ²
Vergleich		~ - 0%

Bei der integralen Brücke können die Widerlagerwände und die Fahrbahnplatte, zugunsten des Tragverhaltens von einem Rahmen, der eine höhere Steifigkeit und Stabilität bietet,

schlanker gestaltet werden. Allerdings weisen die Brückenbauteile, wie Widerlager, Fahr-
bahntragkonstruktion und besonders die Rahmenecken, einen höheren Bewehrungsgrad
bzw. Vorspanngrad auf, was zu einem zunehmenden Stahlbedarf führt.

Im Endeffekt ergeben sich bei den betrachteten Berechnungen bei der integralen Brücke ten-
denziell leicht geringere CO₂-Emissionen, im Bereich von < 10%. Unter Beachtung der vor-
handenen Massengenauigkeit von ca. 20%, lässt festhalten, dass der CO₂-Bedarf in einer
ähnlichen Größenordnung liegt, mit tendenziell leichten Vorteilen für die integrale Lösung.

Jedoch bietet die integrale Bauweise gerade im Spannweitenbereich zwischen 35 und 40 m
Vorteile, da hier – mit vergleichsweise geringer Bauhöhe – eine Autobahn o. ä, stützenfrei
überspannt werden kann. Hieraus ergeben sich gegenüber der konventionellen Bauweise
mit Mittelstütze deutliche Vorteile im Hinblick auf den CO₂-Anteil aus bauzeitlichen Stausitua-
tionen (siehe Abschnitt 4.9 bzw. 6.2.2).

4.6.3 Zurückgesetzte Widerlager

Die Ergebnisse der CO₂-Berechnungen in Abschnitt 4.3.4 zeigen, dass gerade für die Wider-
lager wegen der massiven Betonkubator sehr hohe CO₂-Mengen verbraucht werden, die ge-
rade bei Brücken mit einer Länge von < 40 m über 50% der gesamten CO₂-Emission der
Brücke betragen kann.

Daher im Folgenden eine Untersuchung, ob es im Hinblick auf die CO₂-Bilanz sinnvoll sein
kann, das Widerlager, um einen erheblichen Abstand von dem zu überbauenden Lichtraum-
profil in Richtung Böschung abzurücken. Da hierdurch die Gründungsoberkante nach oben
rutscht, können die Widerlagerwand und die Flügelwände mit geringerer Bauhöhe ausgebil-
det werden, so dass sich hieraus eine verminderte Betonkubatur ergibt. Gleichzeitig wächst
allerdings die Länge des Überbaus an, so dass sich die Brückenfläche vergrößert und der
Überbau durch die größere Spannweite zugleich auch massiver oder oft mit einem anderen
Querschnitt ausgebildet werden muss. Unabhängig von der CO₂-Thematik werden diese zu-
rückgesetzten Widerlager gerade bei kurzen Brückenlängen oft aus gestalterischen Gründen
eingesetzt, um die Brücke etwas unauffälliger erscheinen zu lassen. Mit Rücksicht auf die
Wirtschaftlichkeit ist die Variante mit dem anliegenden Widerlager und der geringstmöglichen
Brückenfläche jedoch i.d.R. im Vorteil.

Im Rahmen des hier vorliegenden Projekts wurde die Variante der zurückgesetzten Widerla-
ger bezüglich des CO₂-Aspekts untersucht. Ausgangspunkt war die Planung der Überfüh-
rung einer zweispurigen Straße mit einer 12,10 m breiten Brücke über eine zweistreifige
Bundesstraße. Unter Berücksichtigung der seitlichen Bankette ergab sich für die Brücke eine
frei zu haltende lichte Weite von 21,50 m; die Ursprungsplanung sah eine Lösung mit einer
ca. 95 cm dicken Spannbetonplatte vor.

Als Alternativplanung wurden die Widerlager beidseits um ca. 5,75 m zurückgesetzt. Hier-
durch konnten im Bereich des Widerlagers ca. 50% der Betonmengen (bzw. etwa die gleiche
Menge an Bewehrung) eingespart werden. Gleichzeitig erhöht sich allerdings die Brückenflä-
che um 50%. Da die Spannweite hier in etwa 35 m beträgt, wird der vorgespannte Platten-
querschnitt der Ausgangsvariante durch einen Stahlverbundquerschnitt mit einer Konstruktio-
nshöhe von 1,25 m (inkl. 35 cm Stahlbetonplatte) ersetzt.

Beide Varianten sind in Bild 4.22 im Längsschnitt dargestellt.



Bild 4.22 Darstellung einer Brücke mit anliegenden und zurückgesetzten Widerlagern; oben: anliegende Widerlager, unten: zurückgesetzte Widerlager (Planung © Büro Mohn, 2021)

In Summe ergab sich in der Berechnung, dass durch das Zurücksetzen der Widerlager in Summe 75 tCO₂ (ca. 17%) mehr verbraucht wurden als bei der Variante mit den anliegenden Widerlagern.

Tabelle 4.6 CO₂-Vergleich zwischen Brücken mit anliegenden und zurückgesetzten Widerlagern

	Brücke mit anliegenden Widerlagern	Brücke mit zurückgesetzten Widerlagern
Querschnitt	Spannbetonplatte	Stahlverbund
Geometrie (Abmessungen)	L = 21,50 m; B = 12,10 m; H = 4,80 m	L = 33,30 m; B = 12,10 m; H = 4,80 m
Gründung	Tiefgründung mit Stb.-Pfähle	Tiefgründung mit Stb.-Pfähle
Widerlager	anliegend	Widerlager zurückgesetzt (je Seite 5,75 m)
Höhe der Widerlagerwand	6,30 m	2,40 m
Flügelwand	Dicke = 0,8 m; A = 52 m ²	Dicke = 0,6 m, A = 18 m ²
Gesamte CO ₂ -Emission (inkl. Erdarbeit)	ca. 440 tCO ₂	ca. 515 tCO ₂
CO ₂ Unterbauten	ca. 265 tCO ₂	ca. 205 tCO ₂
CO ₂ Überbauten	ca. 155 tCO ₂	ca. 285 tCO ₂
Vgl. Unterbauten		205 t – 265 t = - 60 tCO ₂
Vgl. Überbauten		285 t – 155 t = + 130 tCO ₂
Einheitswert kg CO ₂ /m ² Brücke	1620 kg CO ₂ /m ²	1240 kg CO ₂ /m ²

Die im Einzelfall ermittelten Ergebnisse sind nicht gänzlich verallgemeinerbar. Bei einem Überbau mit sehr geringer CO₂-Emission, wie beispielsweise einer Fuß- und Radwegbrücke in Holzbauweise kann es durchaus sein, dass der vergleichsweise geringe Zuwachs an CO₂ infolge der vergrößerten Spannweite, durch die Einsparung an Widerlagerhöhe ausgeglichen

wird. Bei massiver Bauweise scheint es jedoch sinnvoll zu sein, das Soll-Lichttraumprofil geringstmöglich einzufassen.

4.6.4 Vergleich Stahlbetonwiderlager mit Spundwandwiderlager

Im Regelfall wird ein Widerlager als massive Stahlbetonkonstruktion ausgebildet. Bei geringer bis mittlerer Spannweite bis etwa 20 m kann allerdings die massive Stahlbetonkonstruktion auch durch ein Spundwandkasten ersetzt werden. Der Brückenüberbau wird dann auf einen Kopfbalken an der Oberseite der Spundwand über eine Schneidenlagerung in diese eingeleitet. Zur Ableitung der Horizontallasten infolge von Erddruck, ist die Spundwand im Regelfall nach hinten verankert.

Im Zuge des hier durchgeführten Vorhabens wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt, ob sich durch die Spundwandlösung eine günstigere CO₂-Bilanz ergibt als bei dem massiven Betonwiderlager. Im Rahmen der Berechnung wurde von folgenden Parametern ausgegangen:

- Als Referenzbrücke wurde ausgewählt: Spannbetonplatten-Straßenbrücke, Breite = 12,10 m, Spannweite = ca. 20 m, lichte Höhe = 4,80 m.
- Baugrund: homogenen, nichtbindigen Boden mit einer Wichte von 18 kg/m³; Reibungswinkel 32,5°.
- Als Stahlgüte des Spundwandprofils wurde S355 angesetzt.
- Die Spundwand wurde an der Oberseite rückverankert, wobei die Verankerung durch einen 5% Erhöhung pauschal in die CO₂-Bilanz eingeflossen ist.
- Die Lebensdauer wurde mit 100 Jahren angesetzt; über die Lebensdauer wurde ein Dickenverlust der Spundwand infolge Abrostung mit 0,02 mm je Jahr angesetzt (gemäß DIN EN 1993-5, Abschnitt 4.4, Absatz 2 bzw. Tabelle 4-1 Zeile 1 bei „Ungestörte natürlich gewachsene Böden“). Hieraus ergibt sich über die Lebensdauer von 100 Jahren ein gesamter Dickenverlust von 2,0 mm.

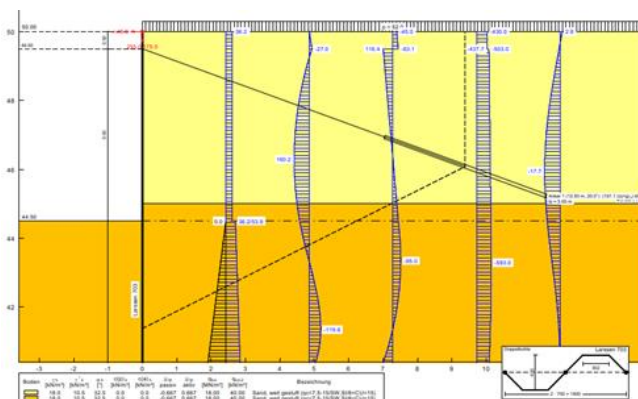


Bild 4.23 Dimensionierung eines Spundwandwiderlagers einer Straßenbrücke
 links: Plot aus Programm GGU-RETAIN
 rechts: ©Tim Zinke, 2019

- Die Spundwand wurde für die Lasten aus dem Überbau und der Beanspruchung durch Erddruck statisch mit dem Programm GGU-RETAIN vorbemessen. Dabei wurden folgende Nachweise durchgeführt:

- Nachweis gegen Versagen des Erdwiderlagers (gemäß dem Grenzzustand GEO-2) nach dem Verfahren II [29]: Hierbei wurde die Einbindetiefe, die zwischen 8,0 m und 18,0 m variiert, überprüft, um sicherzustellen, dass sie ausreichend ist. Die Untersuchung ergab, dass die vorgenommene Einbindetiefe den Anforderungen genügt.
- Nachweis der Vertikalkräfte: Dieser Nachweis beinhaltet den Nachweis der Vertikalkomponente des Erdwiderstands sowie den Nachweis der Abtragung der Vertikalkräfte in den Untergrund. Dabei wurde die Mantelreibung q_{sk} im Bereich von 30 kN/m² bis 60 kN/m² angesetzt.
- Aus der statischen Vordimensionierung ergab sich ein Stahlprofil mit einer Profildicke von 12 mm.
- Die Abmessung des bewehrten Beton-Kopfbalkens ergab sich zu Breite x Höhe = 0,8 m x 1,0 m.

Mit den Ergebnissen der statischen Vordimensionierung wurde eine entsprechende CO₂-Berechnung durchgeführt. Im Hinblick auf den späteren Rückbau wurde angenommen, dass nur der zugängliche Teil der Spundwand zurückgewonnen und recycelt werden kann, während der im Baugrund eingebrachte Teil (ungefähr 70 % der gesamten Stahlmenge der Konstruktion) nach einer Lebensdauer von 100 Jahren im Baugrund verbleibt, so dass für diesen Anteil in der Phase D kein Recyclingpotential ausgewiesen werden kann.

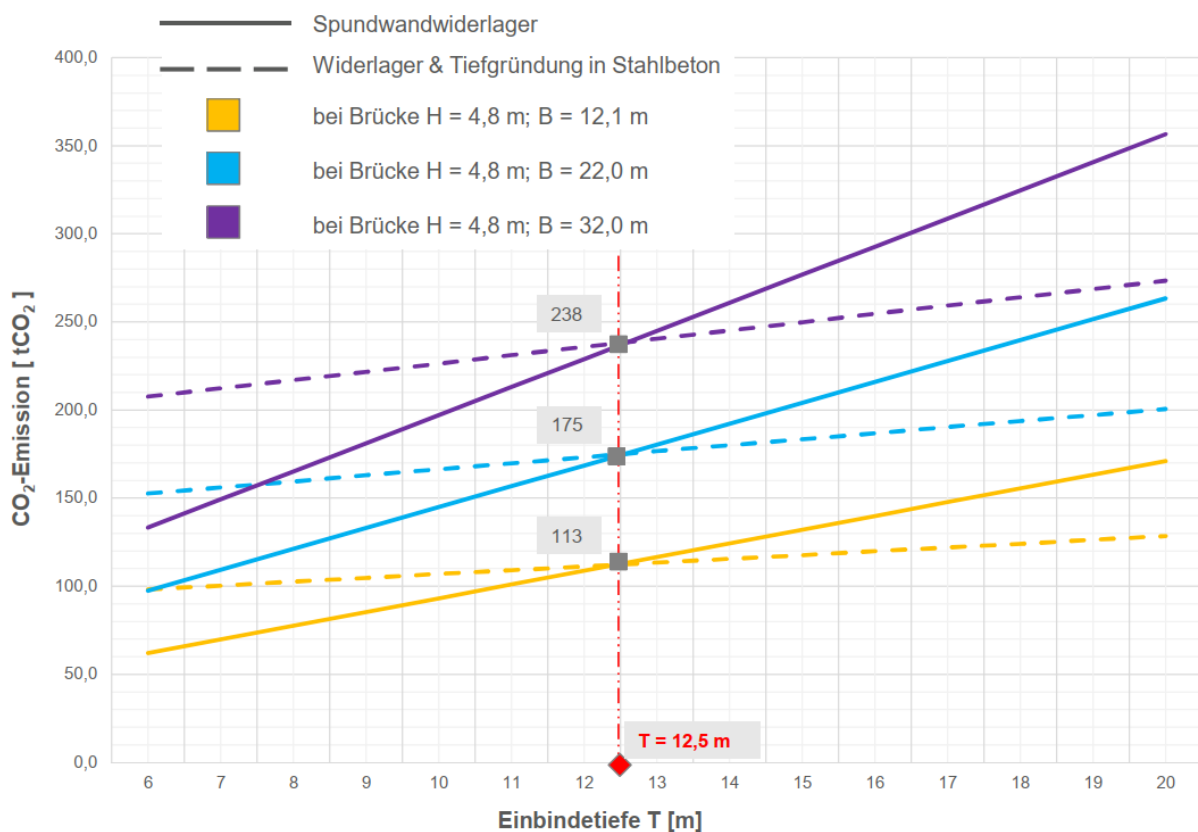


Bild 4.24 CO₂-Bedarf eines Spundwandwiderlagers im Vergleich zu einem Stahlbetonwiderlager mit Tiefgründung in Abhängigkeit der Einbindetiefe

In Bild 4.24 sind die Ergebnisse der durchgeführten CO₂-Berechnungen für verschiedene Situationen bzw. Gründungsvarianten in Abhängigkeit der Einbindetiefe dargestellt. Hiernach

ist bei geringen Einbindetiefen bis ca. $T = 12,5$ m die Spundwandkonstruktion im Hinblick auf die CO₂-Bilanz günstiger. Bei größeren Einbindetiefen ist diese jedoch nachteilig, da der Zuwachs an Material und dem daraus resultierenden CO₂ im Vergleich zu einer Pfahlgründung überwiegt.

4.6.5 Sonderfall Wellstahldurchlass

Als ergänzende Alternative wurde an dieser Stelle die CO₂-Bilanz eines Wellstahldurchlasses untersucht. Da sich diese Variante nicht auf alle der in Abschnitt 3.3 definierten Kreuzungssituationen übertragen lässt, war diese in der bisherigen grundsätzlichen Parameterstudie nicht enthalten gewesen.

Wellstahldurchlässe sind bei der Überquerung kleinerer Hindernisse wie Bächen oder Fuß- und Radwegen effiziente Lösungen, dieses gilt gleichfalls für Fuß- und Radwege als auch für Straßen. Die Konstruktion besteht im Wesentlichen aus einem wellprofilierten biegeweichen Stahlprofil, das durch die allseitige Bodenbettung überwiegend druckbeansprucht wird. Um die Stabilität der Konstruktion zu gewährleisten, ist eine möglichst gleichmäßige Beanspruchung und damit eine ausreichende Überdeckung erforderlich. Die Bemessungsrichtlinien, für Wellstahlbauwerke, werden in [5] Teil 8, Abschnitt 5 geregelt.

Zum Einsatz kommen sowohl geschlossene Kreis- als auch Maulprofile, die erforderliche Wandstärke der gewellten Stahlblechelemente wird anhand statischer Berechnungen ermittelt. Zur Vermeidung von Korrosion werden die Wellstahlrohre innen und außen verzinkt und zusätzlich mit einer Beschichtung, z.B. aus Epoxidharz, versehen. Zur Aktivierung der gleichmäßigen Tragwirkung ist eine bestimmte Mindestüberschüttung erforderlich.

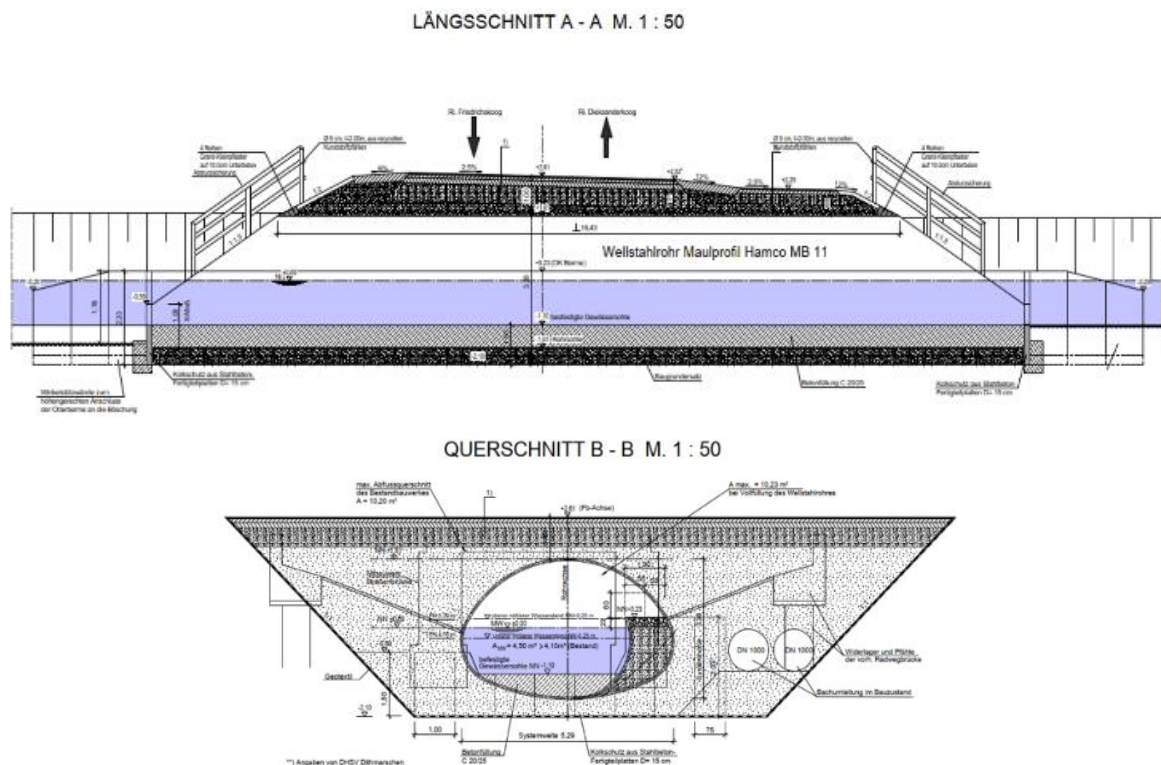


Bild 4.25 Straßenbrücke über Gewässer aus Wellstahlrohr Maulprofil mit einer Spannweite von 5,3 m - Planung © Büro Mohn, 2018

Dadurch, dass – mit Ausnahme des Bodenmaterials – nur sehr geringe Mengen an künstlich hergestellten Materialien verbraucht werden, ist die Vermutung naheliegend, dass diese Bauweise im Vergleich zu konventionellen Brücken in Stahl- oder Betonbauweise nur sehr geringe Mengen an CO₂ emittiert. Daher wurde im Rahmen des Vorhabens zumindest eine grundsätzliche Voruntersuchung durchgeführt.

Im Rahmen der Voruntersuchung wurde von den folgenden Parametern ausgegangen:

- Als Grundsituation wurde – basierend auf einer realen Planungssituation heraus – eine zweispurige Straßenbrücke mit einer seitlichen Breite von etwa 18,20 m (Breite an der Oberseite der Wellstahlrohrkonstruktion, in Bild 4.26 rechts: 18,20 m) betrachtet, die ein etwa 5 m breites Gewässer überquert.
- Für den Durchlass wurde ein Wellstahlrohr des Profils MB 11 von HAMCO mit einer Spannweite von 5,29 m, einer Höhe von 3,28 m und einer Länge von 25,0 m eingebaut. Zusätzlich wurde im Wellstahlrohr eine befestigte Betonsohle eingefügt, um zukünftige Arbeiten im Zuge der Unterhaltung zu erleichtern. Die Überschüttungshöhe beträgt in dem Fall etwa 1,0 m.
- Als Fahrbahnaufbau an der Oberseite wurden 14 cm Asphalttragschicht, 8 cm Asphaltbinderschicht und 4 cm Asphaltdeckschicht vorgesehen.
- Die Nutzungsdauer von einem Wellstahldurchlass beträgt in der Regel 70 Jahre gemäß ABBV (siehe Tabelle 3.4) und ist damit geringer als die für konventionelle Brücken in Stahl- oder Betonbauweise.

Die Ergebnisse der Berechnungen lassen sich Bezug auf die CO₂-Bilanz wie folgt zusammenfassen:

- Da lediglich sehr wenig künstlich hergestelltes Material verwendet wird, ergibt sich ein sehr geringer CO₂-Bedarf der Brückenkonstruktion.
- Die Haupt-CO₂-Emission ist in diesem Fall der Fahrbahnaufbau; in der gewählten Bauweise werden ca. 40 kgCO₂/m² emittiert. Da die Fahrbahnbeläge nur eine Lebensdauer von 15 - 25 Jahren (Tabelle 3.4) aufweisen, ist mehrmaliges Erneuern während der 70 Jahre, Lebensdauer des Tragwerkes, notwendig. Aufsummiert führt dieses zu einer freigesetzten CO₂-Menge von 170 kgCO₂/m² der Fahrbahnfläche.

Tabelle 4.7 Ergebnisse der CO₂-Bilanz von Wellstahldurchlass verglichen mit anderen Varianten

Situation: Straßenbrücke über Bach, Spannweite = 6,0 m, Breite = 12,10 m			
Variante	Gesamt tCO ₂	kgCO ₂ /m ² Brückenfläche	kgCO ₂ / m ² ·a
Wellstahldurchlass (ND 70a)	ca. 95	1600 - 1800	25
Stahlbetonplatte (ND 100a) - Gründung aus Spundwand mit Kopfbalken als Widerlager	ca. 540	3300	33
Situation: Fuß- und Radwegbrücke über Bach, Spannweite = 6,0 m, Breite = 3,0 m			
Variante	Gesamt tCO ₂	kgCO ₂ /m ² Brückenfläche	kgCO ₂ / m ² ·a
Wellstahldurchlass (ND 70a)	ca. 7	450	6,5
Stahlbetonplatte (ND 100a) - Tiefgründung mit Stahlrohr	ca. 11,5	750	7,5
Holzdeckbrücke (ND 100a – Holz 2x Herstellung) - Tiefgründung mit Stahlrohr	ca. 9,5	650	6,5
Stahldeckbrücke (ND 100a) - Tiefgründung mit Stahlrohr	ca. 16,5	1100	11

In der Tabelle 4.7 sind CO₂-Ergebnisse von Brücken aus Wellstahlrohr und anderen Konstruktionen dargestellt. Es ist klar ersichtlich, dass die Wellstahlrohrdurchlassvariante unter Berücksichtigung der CO₂-Emission eine optimale Lösung ist. Gerade bei Straßenbrücken in klassischer Beton- bzw. Stahlbauweise schneidet diese deutlich günstiger ab, unterschreitet aber auch die Werte Fuß- und Radwegbrücken in Holzbauweise.

Die an dem konkreten Beispiel abgeleiteten Ergebnisse sind grundsätzlich auch auf andere Situationen übertragbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Wellstahlösungen für Brücken mit einer Spannweite von bis zu 6,0 m untersucht.

4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ableitung von Anhaltswerten für die CO₂-Emissionen von Brückenbauwerken für die Leistungsphasen 0 und 2

Im Folgenden werden aus den in den Ergebnissen der Abschnitte 4.1 - 4.5 Anhaltswerte abgeleitet, mit denen der CO₂-Bedarf von Brückenbauwerken in frühen Planungsphasen abgeschätzt werden kann. Derartige Kennwerte lassen sich beispielsweise heranziehen, wenn in einer frühen Phase Varianten im Hinblick auf die CO₂-Bilanz miteinander verglichen werden sollen oder aber auch vor Beginn einer Planung abgeschätzt werden soll, wieviel CO₂ für die Maßnahme entsprechend investiert werden muss. Je nach Leistungsphase und vorhandener Detaillierung der Bauwerksplanung werden hier unterschiedliche Schätzwerte angegeben.

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 €/m² Brückenfläche abgeschätzt. Im Folgenden sollen derartige Erfahrungswerte basierend auf den o. g. Untersuchungen auf den CO₂-Bedarf übertragen werden.

Straßenbrücke:

- CO₂-Bedarf Überbau:
ca. 0,38 t/m² Brückenfläche gemäß Abschnitt 4.5.2
- CO₂-Bedarf Belag / Ausstattung:
i. M. ca. 0,30 t/m² Brückenfläche gemäß Abschnitt 4.5.4
- CO₂-Bedarf Gründung-Widerlager:
ca. 1,7 t/m² Widerlager-Ansichtsfläche gemäß Abschnitt 4.4.2

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. 1,2 t/m² gemäß Abschnitt 4.3.4

Hiermit lässt sich der CO₂-Bedarf einer Straßenbrücke wie folgt abschätzen:

$$\boxed{\text{tCO}_2/\text{m}^2_{\text{Brückenfläche}} = 16,5 / L[\text{m}] + 0,70 \geq 1,2 \text{ t/m}^2} \quad (1)$$

Die Darstellung in Bild 4.26 zeigt die gute Übereinstimmung der ermittelten CO₂-Werte der einzelnen Brücken mit der Näherungslösung gemäß Gl. (1). Der Näherungsansatz ist im Übrigen auch konform mit den Ergebnissen von CO₂-Untersuchungen an Brücken, die die BAST durchführen lassen hat (siehe [19] und [30]). Hier sind in [30] in Tabelle 14 an sechs sehr unterschiedlichen Brückenbauwerken, bezogen auf eine Lebensdauer von 100 Jahren, in den Phasen A bis C, auf die Brückenfläche bezogene CO₂-Werte zwischen 7,8 und 13,32

kg/(m²·a) ermittelt worden, als mittlerer Referenzwert wurde ein Wert von 13,7 kg/(m²·a) angegeben. Über die gesamte Lebensdauer sind diese Werte zwischen 0,78 und 1,37 tCO₂/m² Brückenfläche, die von der Größenordnung den Werten den eigenen Untersuchungen entsprechen.

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

$$\boxed{t\text{CO}_2/\text{m}^2_{\text{Brückenfläche}} = 32 / L[\text{m}] + 0,45 \geq 0,7 \text{ t/m}^2} \quad (2)$$

Hierbei ist zu beachten, dass der vordere Term (Gl. (2)) lediglich im Falle eines Kastenwiderlagers anzusetzen ist, bzw. die Streuungen bei Fuß- und Radwegbrücken deutlich größer sind und daher auch der Sockelwert von 0,7 t/m² im Regelfall eher auf der sicheren Seite liegt, bei CO₂-mäßig ungünstigen Konstellationen allerdings auch überschritten werden kann.

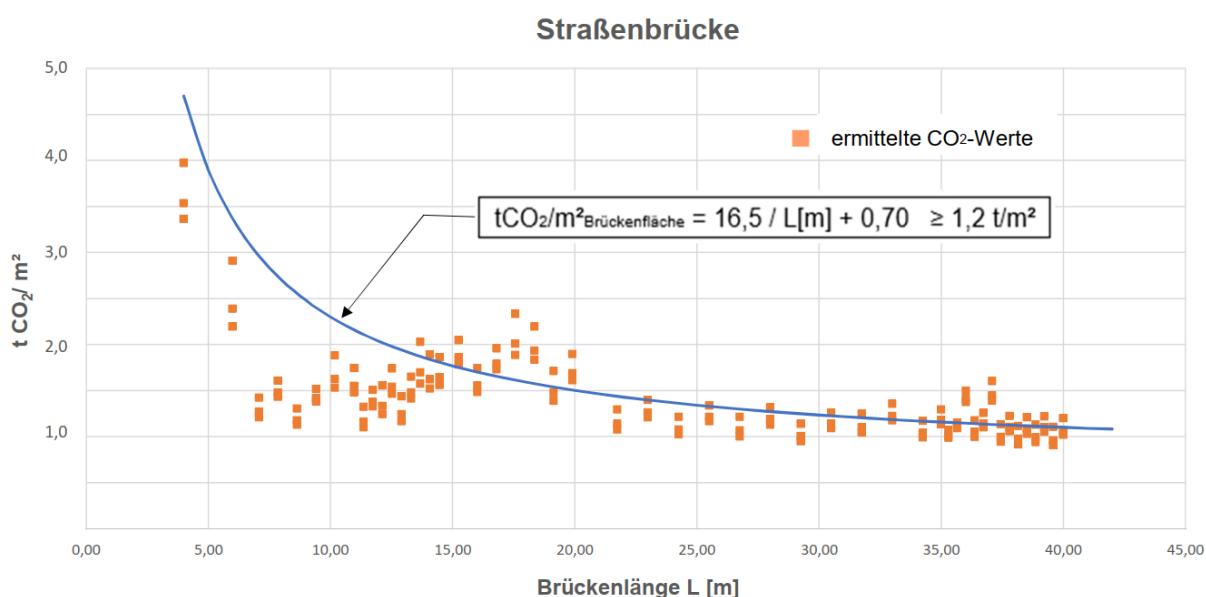


Bild 4.26 Vergleich der berechneten CO₂-Werte mit der Näherungslösung gemäß Gl. (1) für Straßenbrücken

Schätzwerte für die Leistungsphase 2

In der Leistungsphase 2 stehen die Brückenkonstruktion, die Baustoffe und ggf. auch die wesentlichen Ausstattungsmerkmale bereits fest, sodass der CO₂-Bedarf hier bereits spezifischer ermittelt werden kann. Basieren auf den o. g. Untersuchungsergebnissen wird die folgende Formel bzw. Tabelle angegeben:

$$\boxed{t\text{CO}_2 = A [\text{m}^2] \cdot (\text{CO}_{2,\text{ÜB}} + \text{CO}_{2,\text{A}}) + 2 \cdot A_{\text{WL}} [\text{m}^2] \cdot \text{CO}_{2,\text{WL}}} \quad (3)$$

Dabei sind

A: Brückenfläche [m²] mit $A = B[\text{m}] \cdot L[\text{m}]$

A_{WL} : Ansichtsfläche des Widerlagers [m²] mit $A_{\text{WL}} = B[\text{m}] \cdot H[\text{m}]$

$\text{CO}_{2,\text{ÜB}}$; $\text{CO}_{2,\text{A}}$; $\text{CO}_{2,\text{WL}}$: empfohlene CO₂-Werte aus Tabelle 4.8

Die Gleichung (3) und die in Tabelle 4.8 vorgegebenen Werte sind für Straßenbrücken und Fuß- Badwegbrücken mit den folgenden Parametern anwendbar:

- B - Brückenbreite von 6 bis 35 m bei Straßenbrücke und von 3 bis 6,5 m bei Fuß- Radwegbrücke,
- L - Lichte Weite zwischen den Endwiderlagern von 4 bis 40 m,
- H - Lichte Höhe $\geq 4,8$ m, Höhe des Widerlagers von 3,5 bis 6,0 m.

Tabelle 4.8 CO₂-Werte für Bauteilgruppen bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren

	Straßenbrücke	Fuß- und Radwegbrücke
Gründung - Widerlager CO_{2,WL}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachgründung: 1,5 tCO₂/m² oder $(8 / B [m] + 1,0)$ ▪ Tiefgründung: 1,8 tCO₂/m² oder $(10 / B [m] + 0,03 \cdot T [m])$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kastenwiderlager: 2,6 tCO₂/m² ▪ Tiefgründung: 2,0 tCO₂/m²
Überbau CO_{2,ÜB}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton, Stahl, Stahlverbund: 0,37 tCO₂/m² ▪ Holzbetonverbund: $(0,32 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton, Stahl, Stahlverbund: 0,20 tCO₂/m² ▪ Holzbetonverbund: $(0,23 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m² ▪ Holz: $(0,08 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m²
Belag und Ausstattung CO_{2,A}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgemein: $(0,125 + 3,15 / B [m])$ tCO₂/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgemein: 0,15 tCO₂/m² ▪ Zuschläge: <ul style="list-style-type: none"> - RHD-Belag: +0,35 tCO₂/m² - GFK-Belag: +0,25 tCO₂/m²

* Mit B = Brückenbreite [m]
 T = Einbindetiefe der Pfähle bzw. der Spundwände [m]
 a = Jahre
 ND = voraussichtliche Nutzungsdauer von Bauteilen [a]

Leistungsphase 3 - 6:

Ab der Leistungsphase 3 liegen im Regelfall konkrete Massen vor, so dass hier nicht mehr mit den o.g. Anhaltswerten gearbeitet werden muss, sondern eine konkrete CO₂-Bilanz durchgeführt werden kann.

4.8 Untersuchung des Einflusses der „Energiewende“ auf die ermittelten CO₂-Emissionen

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung soll abgeschätzt werden, wie sich die vorgesehene „Energiewende“, hin zur regenerativen Energieerzeugung auf die ermittelten CO₂-Emissionen auswirkt.

Grundsätzlich sind alle Prozesse – und damit auch die CO₂-Emissionen – bei der Herstellung der Baustoffe, dem Bauprozess oder aber auch bei jeglichen Tätigkeiten im Zuge von späteren Instandsetzungen, Umbauten oder dem Rückbau von Bauwerken von (elektrischer) Energie abhängig. Mitunter besteht sogar die Meinung, dass der vorgesehene Umbau der Energieerzeugung von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern im gleichen Maße eine Reduzierung der „grauen Emission“ nach sich zieht und sich die hohen CO₂-Emissionen bei der Erstellung von Bauwerken daher automatisch regulieren würden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass sich der CO₂-Bedarf bei der Herstellung der Baustoffe aus drei Anteilen zusammensetzt:

- chemischer Anteil,
- elektrischer Anteil aus dem erforderlichen Strombedarf,
- thermischer Anteil, durch erforderliche Verbrennungsprozesse, um die für den Herstellungsprozess der Baustoffe erforderlichen Temperaturen zu erzeugen.

Herstellung von 1 m³ Baustoff

Baustoff 1 m ³	Chem. kg CO ₂ -Äq.	Therm. kg CO ₂ -Äq.	Elektr. kg CO ₂ -Äq.	Restl. kg CO ₂ -Äq.
Beton	105	75	25	40
Betonstahl	0	0	5100	270
Baustahl	6340	560	1490	440
Aluminium	2700	0	20250	4050

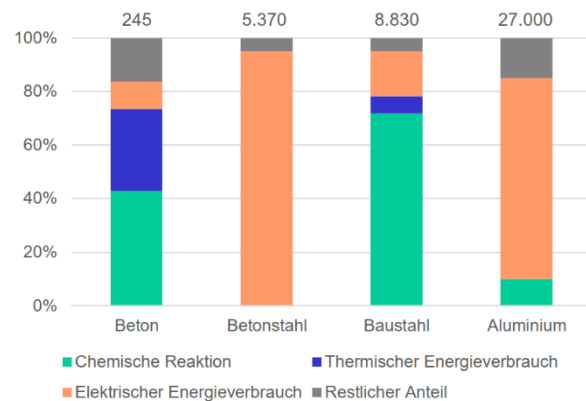


Bild 4.27 Chemischer, elektrischer und thermischer Anteil am CO₂-Bedarf bei der Herstellung eines Kubikmeters der jeweiligen Baustoffe

Hierbei ist allerdings lediglich der elektrische Anteil direkt an den vorgesehenen Energieträgerumbau gekoppelt, der chemische Anteil ist hiervon völlig unabhängig und – unter Aufrechterhaltung der bestehenden Verfahrenstechnik – der thermische Anteil ebenfalls weitestgehend. Auch der Ersatz von fossilen Energieträgern, durch nachwachsende Rohstoffe, führt bei der Verbrennung lediglich zu einem untergeordneten positiven Effekt, weil in der Geschwindigkeit, in der das gebundene CO₂ bei der Verbrennung aus dem nachwachsenden Energieträger entweicht, kein neuer Energieträger nachwachsen bzw. CO₂ gebunden werden kann.

Im Folgenden wurde eine Abschätzung vorgenommen, in welcher Größenordnung ein positiver Einfluss der angestrebten „Energiewende“ auf die Reduzierung der „grauen Energie“ erwartet werden kann. Hierzu wurden verschiedene Prognosen von [31], [32], [33] und [34] ausgewertet, um zu ermitteln, wie sich der CO₂-Ausstoß für eine Kilowattstunde Strom zukünftig reduziert (Bild 4.28 links). Demzufolge könnten sich die CO₂-Emissionen von aktuell ca. 420 g je kWh Strom mittelfristig auf Werte zwischen 25 und 50 g reduzieren, wenn der

Strom verbrennungsunabhängig und aus erneuerbaren Energien gewonnen würde. Auch wenn diese Prognose im Rückblick auf die bislang erzielten Erfolge eher optimistisch scheint, wird im Folgenden dennoch eine Untersuchung durchgeführt, um wieviel sich die „graue Emission“ reduzieren würde, wenn für die Erzeugung einer kWh Strom lediglich 25 g CO₂ emittiert würden.

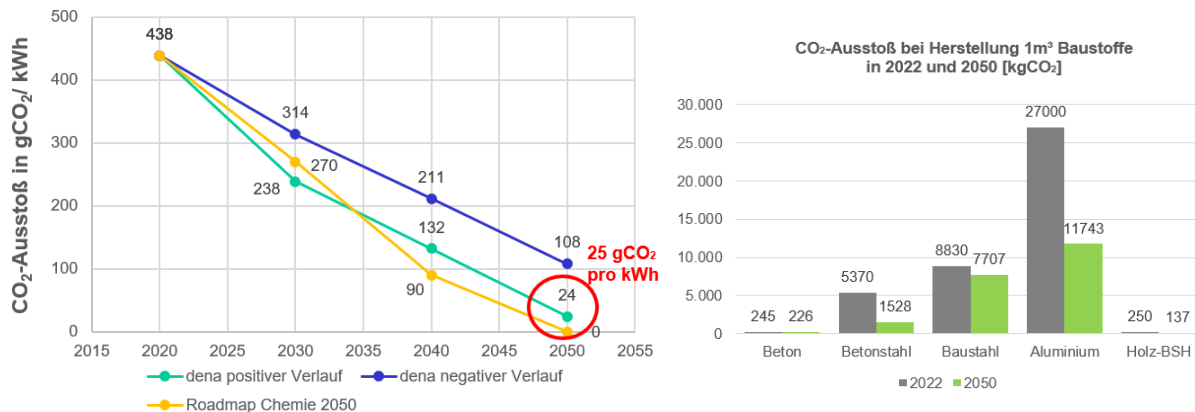


Bild 4.28 Betrachtung der Veränderung des Strommixes in Deutschland

links: Prognose Veränderung CO₂-Emissionen pro kWh Strommix bis 2050 je kWh
 rechts: CO₂-Emission / m³ Baustoff für die Herstellung unter Berücksichtigung der „Energiewende“ mit einem CO₂-Ausstoß von lediglich 25 gCO₂/kWh Strom

Die Ergebnisse in Bild 4.29 zeigen, im Vergleich zur Ausgangssituation im Jahr 2022, dass der Energieumbau, die „graue Emission“, die Erstellung der Brücken lediglich wenig beeinflussen würde. Die CO₂-Emissionen reduzieren sich hierbei im Mittel um ca. 20 - 25%.

Dieses ist in dem geringen Anteil des elektrisch bedingten CO₂ an den Gesamt-CO₂-Emissionen bei der Herstellung der mineralischen Baustoffe wie Beton begründet. Dieses am Beispiel der Herstellung eines Betons C35/45 erläutert (Bild 4.27): Für die Herstellung eines Kubikmeters Beton (C35/45) sind im Durchschnitt 245 kgCO₂ erforderlich. Davon sind ca. 105 kgCO₂ auf chemische Prozesse zurückzuführen, die bei der Umwandlung von Kalkstein zu Zementklinker im Zementherstellungsprozess unvermeidbar anfallen. Weitere 75 kgCO₂ fallen durch erforderliche Verbrennungsprozesse des Zements an und lediglich 25 kgCO₂ sind abhängig von elektrischer Energie. Die restlichen 40 kgCO₂ entstehen bei der Bereitstellung und Aufbereitung der Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe usw. sowie dem Transport zum Werk. Daher reduzieren sich die CO₂-Emissionen – unter Beibehaltung der bisherigen Verfahrenstechnologie – selbst bei fast 100% regenerativer Energieerzeugung lediglich um ca. 10% auf ca. 226 kgCO₂/m³ (Bild 4.28 rechts).

Auch beim Baustahl ist der Einfluss unter Zugrundelegung der aktuellen Herstellungstechnologie gering. Da zurzeit ca. 70% des gesamten Baustahls über die Hochofen-Konverter-Route und nur 30% durch das Elektrostahl-Verfahren produziert werden [17], würde die Nutzung von „grünem“ Strom eher einen untergeordneten Beitrag zur CO₂-Reduzierung in der Stahlproduktion leisten (siehe auch Erläuterung in Abschnitt 5.4.3). Hierbei beträgt der Optimierungsgrad etwa 15% (Bild 4.28 rechts).

Die Energiewende hat allerdings einen erheblichen Einfluss auf den CO₂-Bedarf von Bewehrungsstahl und Aluminium, da beide bei der Materialherstellung einen hohen elektrischen CO₂-Anteil mit Werten zwischen 75% - 90% aufweisen (Bild 4.27). Beim Bewehrungsstahl, der fast zu 100% aus Schrott hergestellt wird, erfolgt die Produktion ausschließlich durch das

Elektrostahlverfahren, welches lediglich elektrische Energie in Form von Strom verbraucht. Die Herstellung von Aluminium ist durch die Schmelzflusselektrolyse eher energieintensiv und erfordert ebenfalls einen hohen Einsatz von elektrischer Energie. Unter der Annahme des CO₂-Emissionsfaktors 2050 von 25 gCO₂/kWh ließe sich der CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Stahlbewehrung um circa 70% reduzieren, während der Ausstoß bei der Herstellung von Aluminium um 55% gesenkt werden könnte (Bild 4.28 rechts).

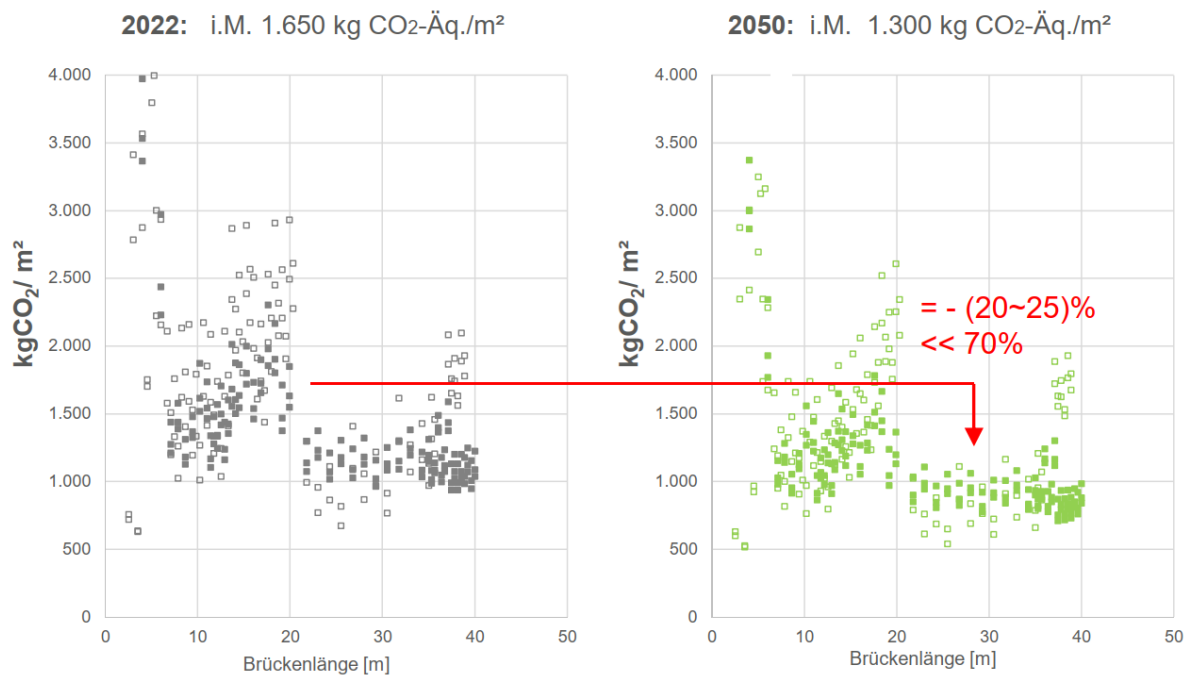


Bild 4.29 Vergleich der berechneten CO₂-Werte 2022 mit den Werten in 2050 unter der Annahme des CO₂-Emissionsfaktors 2050 von 25 gCO₂/ kWh

Die 20%-ige Reduzierung wird allerdings zur Erreichung der Ziele des Pariser Klimaabkommens nicht ausreichen, zumal der angesetzte CO₂-Ausstoß von 25 g/kWh aktuell ohnehin illusorisch scheint. Um die CO₂-Emissionen auf das zulässige Maß von [1] zu reduzieren, müssen daher zwingend andere bautechnische Lösungen ausgearbeitet werden.

4.9 Einfluss der verkehrsbedingten CO₂-Anteile

Da bereits in verschiedenen Beiträgen [30], [35] darauf hingewiesen wurde, dass bei Brückenbaumaßnahmen der CO₂-Anteil aus den bauzeitlichen Stausituationen den CO₂-Anteil, der aus der Bauwerksherstellung / den Baustoffen resultiert, übersteigen kann, wurden hierzu ergänzend und über den geförderten Arbeitsumfang hinaus, Voruntersuchungen zum CO₂-Anteil aus bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen durchgeführt. Hierzu wurden in Zusammenarbeit mit dem Landesbetrieb für Straßenbau- und Verkehr in Schleswig-Holstein zwei konkrete Baumaßnahmen mit unterschiedlicher Verkehrsbeeinträchtigung untersucht, für die beide jeweils konkrete Verkehrszahlen vorlagen. In einem Fall handelte es sich um eine Umleitung, da im Zuge einer Bauwerkserüchtigung der Verkehrsweg vollständig gesperrt werden musste und im anderen Fall um eine Einengung des 2+2-Verkehrs einer vierspurigen Bundesstraße auf eine 2+0-Verkehrsführung, da jeweils wechselseitig eine Fahrbahn infolge Bautätigkeit gesperrt werden musste. Die Einrichtung der 2+0-Verkehrsführung ging mit einer Reduzierung der zulässigen Geschwindigkeit von 80 km/h auf 50 km/h einher.

Die Berechnungen haben lediglich den Charakter einer Voruntersuchung, sollen jedoch an dieser Stelle dennoch zusammenfassend vorgestellt werden.

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

- Ausgangspunkt sind die Verkehrsstärke in [Kfz/24 h] und idealerweise auch die genaue Zusammensetzung (Pkw mit Benzin-Verbrauch, PKW mit Dieserverbrauch, Bus, LKW mit zulässigem Gesamtgewicht zwischen 2,8 t und 3,5 t, LKW mit zulässigem Gesamtgewicht > 3,5 t) bzw. Ganglinie über den Tag. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen lagen lediglich die Verkehrsstärken Kfz/24h vor, für die Ermittlung des CO₂-Verbrauchs wurde von einem Schwerlastverkehrsanteil von 10% ausgegangen und bei den PKW's gemäß [36] zu 32,4% von einem Dieserverbrauch und zu 67,6% von einem Benzin. Als Tagesganglinie wurde der Ganglinientyp D gemäß [37] unterstellt, der für die Tage Dienstag bis Donnerstag auf außerörtliche 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 der Straße (siehe hierzu nach [38]) liegt, so dass daran beurteilt werden kann ob ein freier Fahrfluss in der zulässigen Geschwindigkeit möglich ist oder Stausituationen auftreten. In Stausituationen wurde, gemäß [39] 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 wurden.
- Mit dieser Vorgehensweise kann jedem Fahrzeug eine Geschwindigkeit zugewiesen werden, im Falle einer Umfahrung ist die verlängerte Wegstrecke zu berücksichtigen. Gemäß [39] können hieraus mittels Kraftstoffverbrauchsfaktoren und aktuellen Anpassungsfaktoren aus dem Jahr 2020 näherungsweise der Verbrauch an Benzin bzw. Diesel abgeschätzt werden und durch die Umrechnungsfaktoren, 3,12 kgCO₂ je kg Benzin bzw. 3,25 kgCO₂ je kg Diesel, kann der CO₂-Bedarf ermittelt werden. Durch Abgleich mit der „Normalsituation“ ohne Baustelle ergibt sich der baustellenbedingte CO₂-Bedarf.

Die Ergebnisse der Berechnung sind im folgenden Diagramm festgehalten:

Umleitungsstrecken

- Sofern die Umleitungen nicht zu ergänzenden Stausituationen führen, hängt der zusätzliche CO₂-Bedarf etwa linear von der Länge der Umleitung und der Verkehrsstärke ab (siehe Bild 4.30 links).

Die Größenordnung, in der die CO₂-Aufwendungen aus der Verkehrsbeeinträchtigung liegen können, soll an einem Beispiel illustriert werden: wenn täglich 10.000 Kfz einen Umweg von 4 km fahren, sind dieses CO₂-Mehraufwendungen in Höhe von ca. 41 tCO₂/Woche (siehe Bild 4.30 links). Bei einer angenommenen Dauer der Baustelle von 9 Monaten ergeben sich hieraus CO₂-Belastungen von 1.612 t. Wird gemäß Abschnitt 4.3.1 unterstellt, dass für die Herstellung kleinerer Brücken etwa 1,4 tCO₂/m² Brückenfläche benötigt werden, könnten aus den verkehrlichen CO₂-Mehrbelastungen umgerechnet ca. $1.612 / 1,4 = 1.151$ m² Brückenfläche hergestellt werden, dieses 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 CO₂-Emission weiter überproportional anwachsen, wobei hierzu, für den Fall, keine konkreten Berechnungen durchgeführt wurden.

Die Vergleichsrechnung zeigt, dass bei signifikanten Umleitungen und entsprechenden Verkehrsstärken der CO₂-Anteil aus der Umfahrung schnell größer als der CO₂-Anteil aus dem Brückenbauwerk werden kann.

2+0-Verkehrsführung in Verbindung mit einer Reduzierung der Geschwindigkeit von 80km/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 CO₂. Sofern signifikante Stausituationen vermieden werden können (in diesem Fall bis ca. 15.000 Kfz/24h), überwiegt der CO₂-Anteil aus der Bauwerkserstellung, die Emissionen aus der bauzeitlichen Verkehrssituationen 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 tCO₂/Woche verbraucht. Bei einer angenommenen Dauer der Baumaßnahme von 9 Monaten sind dieses etwa 203 t. Bei einem CO₂-Bedarf eines kleineren Brückenbauwerks mit einer erforderlichen CO₂-Emission von ca. 1,4 t/m² Brückenfläche könnten aus den 203 t umgerechnet ca. 145 m² Brückenfläche hergestellt werden, dieses entspricht einem Brückenbauwerk mit einer Breite von 12 m und einer Länge von 12 m.
- Bei einer Überschreitung von 20.000 Kfz/24 h nehmen die Dauer der Stausituation und damit auch der CO₂-Anteil deutlich überproportional zu. Der CO₂-Anteil aus den bauzeitlichen Stausituationen übersteigt hier schnell den CO₂-Bedarf aus der Erstellung des Bauwerks.

Somit ist sowohl bei großen Verkehrsstärken (von etwa 5.000 Kfz/24h je Fahrstreifen) als auch bei langen Umfahrungen der CO₂-Anteil aus den bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen höher als der Anteil aus der Bauwerkserstellung. Dieses deckt sich grundsätzlich mit den Untersuchungen aus [30] und [35].

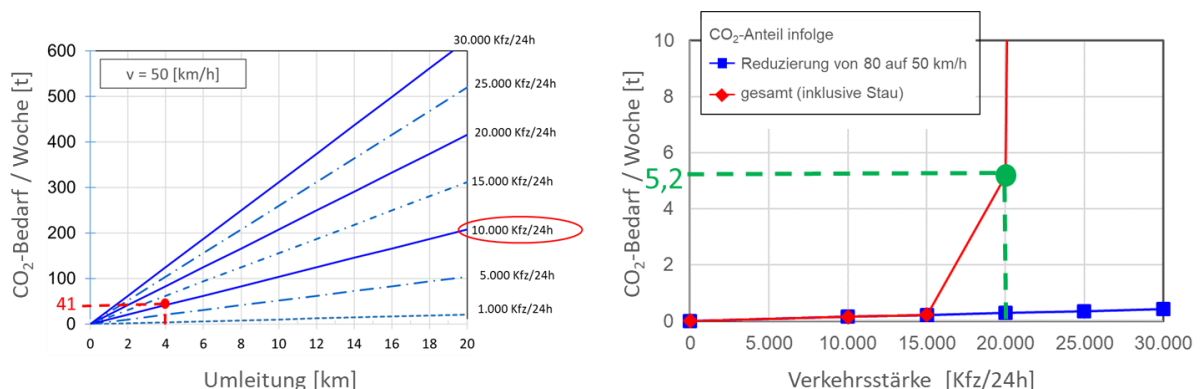


Bild 4.30 CO₂-Emission / Woche infolge bauzeitlicher Verkehrsbeeinträchtigung

links: Fall Komplettsperrung und Umleitung

rechts: Einrichten einer 4+0-Verkehrsführung bei einer 4-spurigen Straße

5. Untersuchung von Optimierungsvorschlägen hinsichtlich der CO₂-Bilanz

5.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der in Kapitel 4 vorgestellten CO₂-Berechnungen an konventionellen Brückenkonstruktionen lassen im Hinblick auf die CO₂-Bilanz folgende Optimierungspotentiale erkennen:

1. Insbesondere bei dichtbefahrenen Straßen (i.A. Bundesstraßen, Autobahnen), bei denen durch die Bauwerkserstellung i.d.R. mit gravierenden Stausituationen zu rechnen ist, ist hinsichtlich des CO₂-Bedarfs von zentraler Bedeutung, die Bauzeit und den hiermit verbundenen verkehrsbedingten CO₂-Anteil infolge der resultierenden Stau-Situation zu minimieren, weil dieser durchaus beträchtlich über dem der Bauwerkserstellung liegen kann. Da die Ermittlung der verkehrsbedingten CO₂-Anteile nicht im Untersuchungsumfang enthalten war und hierzu in Abschnitt 4.9 lediglich erste grobe Voruntersuchungen durchgeführt wurden, erfolgt im Rahmen des vorliegenden Berichtes hierzu keine detaillierte Untersuchung von Optimierungsvorschlägen, sondern es werden allein in Abschnitt 6.2 einige Vorschläge zusammengestellt.
2. Ein wesentlicher Anteil des CO₂-Bedarfs wird durch die Erstellung der massiven Brückenwiderlager verbraucht. Hier liegt zugleich auch technisch das größte Potential, entweder CO₂-Emission über optimierte Massen einzusparen oder ggf. auch die konventionelle Bauweise zu variieren.
3. Der Überbau bietet, zumindest bei Straßenbrücken, zunächst einmal weniger Optimierungspotential. Zum einen ist bei einem zu schlanken Überbau mit einer zu hohen Durchbiegung zu rechnen, darüber hinaus sollten auch gewisse Reserven für eine eventuelle weitere Zunahme des Schwerlastverkehrs verbleiben, daher sollte dieser nicht zu knapp dimensioniert werden. Auch in Bezug auf die Baustoffwahl fällt keine eindeutige Präferenz aus. Der CO₂-Anteil der Beton- und Stahlbrücken liegt in einer ähnlichen Größenordnung. Holz-Beton-Verbundbrücken weisen zunächst einmal geringfügig geringere CO₂-Emissionen auf, wenn allerdings die Lebensdauer kürzer ist und die Betonplatte innerhalb der üblichen Lebensdauer zweimal erstellt werden muss, hat die Holz-Beton-Verbund-Variante sogar eine höhere CO₂-Emission.
Im Bereich von Fuß- und Radwegbrücken können ggf. nochmal innovative Bauweisen in Bezug auf die CO₂-Bilanz beleuchtet werden.

Um einen möglichst geringen CO₂-Bedarf zu erzielen, werden daher folgende Bauweisen untersucht:

- (1) In Abschnitt 5.2 werden zunächst Möglichkeiten betrachtet, die Widerlager bezüglich der CO₂-Bilanz zu optimieren. Im Einzelnen hierzu folgende Untersuchungen:
 - Optimierung der Beton- und Stahlmengen bei konventionellen Stahlbetonwiderlagern,
 - Erstellung eines Widerlagers als Gabionenkonstruktion,
 - Erstellung eines Widerlagers als Konstruktion aus bewehrter Erde.
- (2) In Abschnitt 5.3 werden anschließend verschiedene Überbau-Varianten hinsichtlich einer verbesserten CO₂-Bilanz untersucht. Konkret wird Folgendes betrachtet:
 - Untersuchung einer Holz-Beton-Verbundbrücke mit wieder verwendbarer Betonplatte für den Fall, dass die Holzkonstruktion eine verminderte Lebensdauer aufweist,

- Untersuchung, ob sich durch eine filigrane textilibewehrte Konstruktion eine CO₂-einsparung erzielen lässt,
 - Untersuchung einer Fuß- und Radwegkonstruktion aus BSH-Längsträgern und filigranerer Platte aus Basalt- oder Carbongelegen zur Quertragwirkung,
 - Vorüberlegungen zur Realisierung von Fuß- und Radwegbrücken aus vorgespannten Naturstein-Blöcken.
- (3) Optimierung der Hauptbaustoffe Beton- und Stahl im Hinblick auf die CO₂-Bilanz in Abschnitt 5.4.
- (4) Überlegungen zur Kompensation von CO₂-Emission durch Integration von Photovoltaik-Elementen zur Stromerzeugung in Abschnitt 5.5.

5.2 Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Widerlager

5.2.1 Allgemeines

Klassischerweise werden Widerlager aus massiven Stahlbetonkonstruktionen erstellt, die damit einen sehr hohen CO₂-Anteil aufweisen. Zur Optimierung der Widerlagerbauweise wurden folgende Lösungen konzeptionell ausgearbeitet und diese statisch und massenmäßig vordimensioniert und anschließend im Hinblick auf die CO₂-Bilanz bewertet:

- Optimierung der Beton- und Stahlmengen bei konventionellen Stahlbetonwiderlagern,
- Erstellung eines Widerlagers als Gabionenkonstruktion,
- Erstellung eines Widerlagers als Konstruktion aus bewehrter Erde.

Die statische Vorbemessung erfolgte exemplarisch an den folgenden beiden konkreten Typen, wobei die hieran gewonnenen Erkenntnisse im Anschluss in allgemeine Aussagen überführt werden:

- Straßenbrücke [SB-1]: Spannbetonplatte, Breite = 12,10 m, Spannweite = ca. 20 m, lichte Höhe = 4,80 m.
- Fuß- Radwegbrücke [FB-2]: Holzkonstruktion, Breite = 4,5 m, Spannweite = ca. 20 m, lichte Höhe = 4,80 m.

Als Baugrund wurde von einem homogenen, nichtbindigen Boden mit einer Wichte von 18 kg/m³ und einem Reibungswinkel 32,5° ausgegangen.

5.2.2 Massenmäßige Optimierung von Betonwiderlagern

Die Ergebnisse der Berechnungen in Kapitel 4.3.4 zeigen, dass gerade bei Brücken mit einer Länge von weniger als 40 m der wesentliche Anteil des CO₂-Bedarfs durch die Widerlager emittiert wird. Zentraler Grund ist die massive Stahlbetonbauweise.

In Bezug auf die Optimierung der CO₂-Bilanz, durch eine Reduzierung des Materialverbrauchs, liegt hier das meiste Potential. Der Überbau wird – allein schon zur Minimierung der Eigengewichtsbeanspruchung – ohnehin im Regelfall möglichst schlank ausgebildet. Eine weitere Optimierung der Bauteilabmessungen würde (bei Betonbrücken) die Stahltonnage erhöhen, die Durchbiegung vergrößern und vor allem mögliche Reserven für zukünftige Erhöhung des Schwerlastverkehrs mindern.

Demgegenüber sind Widerlager im Hinblick auf eine Biegebeanspruchung statisch oft weniger hoch ausgenutzt und die Abmessungen ergeben sich vielfach aus Erfahrungswerten bzw. auch unter baupraktischen Gesichtspunkten. Die Dicken der Widerlagerwände liegen im Regelfall zwischen 1,5 - 2,0 m, während die Flügelwände eine Dicke von 0,8 - 1,0 m aufweisen. Übliche Bodenplatten haben eine Dicke von 1,0 - 1,5 m.

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 dieses zu einer signifikanten bzw. grenzwertigen Erhöhung der Stahltonnage geführt hätte.
- Wesentliches Einsparpotential liegt, gemäß den durchgeführten Untersuchungen, vor allem in der Widerlagerwand. Hier können die üblichen Dicken vom 1,5 - 2,0 m auf Werte um ca. 1,20 m reduziert werden, das sind Einsparungen im Bereich von 25% - 40%.
- Gerade bei der Widerlagerwand wird die Dicke vielfach geometrisch aus der Kammerwand entwickelt, so dass sich an der Rückseite des Widerlegers eine durchgehende bzw. gerade Schalkante ergibt, was baupraktisch eine einfache Lösung darstellt. Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz wäre es jedoch zielführender die Massen auf die tatsächlich statisch erforderliche Soll-Geometrie zu begrenzen. Hierdurch lassen sich (je Meter Breite) ca. 2,5 m² Stahlbeton bzw. 750 kgCO₂ einsparen.
- Bei den Flügelwänden ergaben sich, zumindest bei Brücken mit einem zu überwindenden Lichtraumprofil von 4,80 m, weniger Einsparpotential, da die Flügelwände hier große Kragmomente aufnehmen müssen. Bei geringerer Bauhöhe und damit geringerer Auskragung der Flügelwände ist es jedoch sinnvoll, die Wanddicken deutlicher zu optimieren.

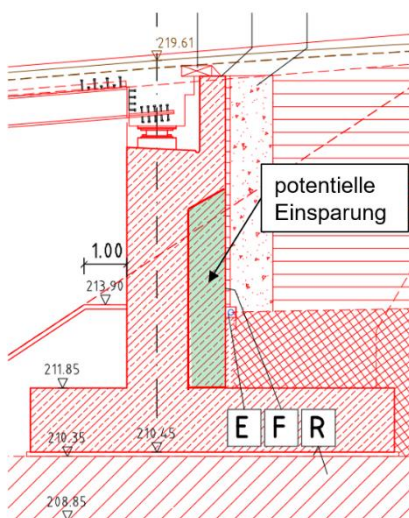


Bild 5.1 Potenzielle Einsparmöglichkeit von Betonmengen an der Rückseite der Widerlagerwand

Grundsätzlich waren an den betrachteten Beispielen, allein durch die Reduzierung der Massen, Einsparungen von ca. 20% möglich. Weitere nennenswerte Einsparpotentiale ergeben sich, wenn im Folgenden die Betonrezeptur im Hinblick auf die CO₂-Bilanz optimiert wird (siehe Abschnitt 5.4.2).

5.2.3 Alternative Variante: Widerlager aus bewehrter Erde

In den letzten Jahren sind, vor allem von der Firma HUESKER, Widerlager aus bewehrter Erde als Alternative zu massiven Bodenwiderlagern entwickelt worden. Durch den Wegfall der massiven Betonkonstruktion liegt es nahe, diese Lösung hinsichtlich der CO₂-Bilanz zu bewerten.

Bei dieser Lösung wird die Belastung aus dem Brückenüberbau in ein Streifenfundament in den Erdkörper eingeleitet. Die komplette Vertikal- und Horizontalbeanspruchung aus dem Überbau und dem Erddruck werden durch den reinen Erdkörper aufgenommen, der in regelmäßigen Abständen von ca. 40 - 50 cm durch Geogitter bewehrt und somit am seitlichen Ausbrechen gehindert wird. Der Erdkörper selbst besteht im Regelfall aus einem abgestuften

Kies-Sand-Gemisch, im Idealfall kann direkt der anstehende Baugrund verwendet werden. Die Bauweise ist z. B. in [40] und [41] beschrieben. Der Einsatz ist sowohl bei Fuß- und Radwegbrücken, als auch bei Straßenbrücken möglich. Es hat hierzu in den letzten Jahren vor allem einige ausgeführte Projekte in den Niederlanden geben, als auch einige realisierte Projekte in Deutschland, hierzu seien das Pilotprojekt Brücke Stokkumer Straße bei Emmerich [42], die Swistbachbrücke bei Heimerzheim [43] und die Erftbrücke in Euskirchen [44] genannt. Bei den neueren in Deutschland realisierten Projekten wurde der Baugrund aus Sorge vor Langzeitsetzungen, bislang allerdings immer ergänzend durch ein Füllmaterial, verstärkt. Hierbei wurden im Regelfall etwa 3-4 Massen-% des Erdkörpers Spezialbindemittels „Dorosol“ beigegeben, dieses ist im Wesentlichen ein Gemisch aus Zement und Kalk.

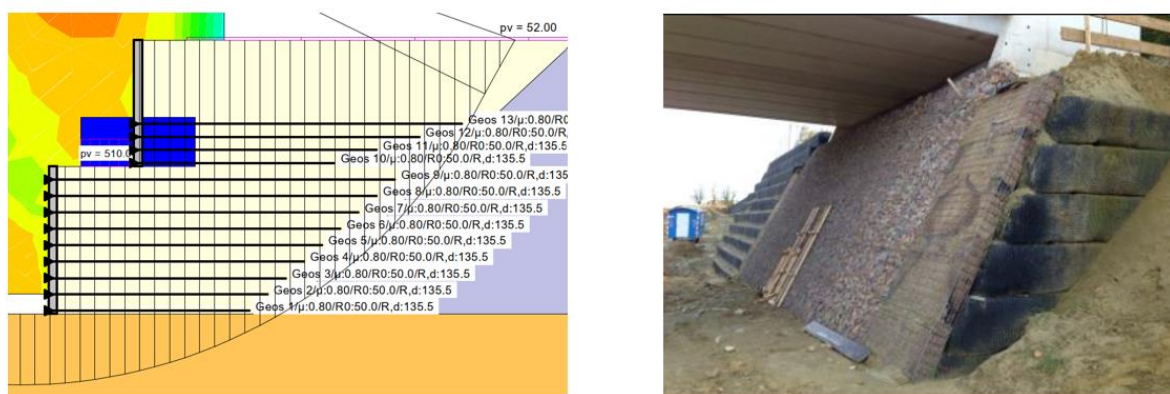


Bild 5.2 links: Dimensionierung eines Widerlagers aus bewehrter Erde Straßenbrücke (Plot aus Programm GGU-STABILITY); rechts: Ansicht eines ausgeführten Widerlagers mit bewehrter Erde (hier Projekt K40 Hommersterweg te Schinnen in Niederlande, © HUESKER, 2014)

Im Zuge des hier durchgeführten Vorhabens wurden rechnerische Voruntersuchungen durchgeführt, wie sich ein Widerlager aus bewehrter Erde gegenüber einem konventionellen Stahlbetonwiderlager bezüglich der CO₂-Bilanz verhält. Um die Massen zu ermitteln, wurde im ersten Schritt zunächst eine rechnerische Voruntersuchung durchgeführt. Im Rahmen der Berechnung wurde von folgenden Parametern ausgegangen:

- Straßenbrücke [SB-1]: Spannbetonplatte, Breite = 12,10 m, Spannweite = ca. 20 m, lichte Höhe = 4,80 m.
- Baugrund: homogener, nichtbindiger Boden mit einer Wichte von 18 kg/m³; Reibungswinkel 32,5°.
- Die Höhe der Auflagerbank des Überbaus bzw. des Streifenfundaments aus Stahlbeton wurde in Anlehnung an bereits ausgeführte Projekte zu 1,30 m festgelegt.
- Die statische Vordimensionierung des bewehrten Erdkörpers erfolgte mit dem Programm GGU-STABILITY. In der Vorbemessung wurden die Nachweise der Gleitsicherheit (GZ GEO-2) und Geländebruchsicherheit des bewehrten Erdkörpers (GZ GEO-3) gemäß DIN EN 1997-1 für die Bemessungssituation BS-P (Endzustand) durchgeführt. Für die Berechnung des Böschungsbruchs wurde das Bishop-Verfahren (Kreise / Lamellen) verwendet.
- Basierend auf der statischen Vorbemessung wurde als Geogitter das Produkt „Fortrac R“ (von der Firma HUESKER) als Bewehrungselement für den Erdkörper ausgewählt. Insgesamt ergaben sich 13 Lagen mit einer Länge von 10 m, die in einem Abstand von 40 cm angeordnet wurden. Laut Herstellerangabe beträgt die Lebensdauer

der Geogitter 120 Jahre, so dass im Rahmen der durchgeführten Berechnung von einer planmäßigen 100-jährigen Lebensdauer wie für die anderen Bauteile ausgegangen werden kann.

- Das Füllmaterial im Erdkörper besteht grundsätzlich aus Sand, Kiessand und wird durch das Spezialbindemittel „Dorosol“, bestehend aus Zement und Kalk, stabilisiert. Für die Bilanzierung wurde der Typ C50 angesetzt, der zu gleichen Teilen aus Kalk und aus Zement besteht, die Gesamtbeigabemenge beträgt etwa 3 - 4 Massen% des Erdkörpers.
- Die Ansichtsfläche der Konstruktion wird durch eine dünne Betonplatte oder eine Gabione bzw. einen Steinvorsatz ausgebildet. Dieses Facing hat nicht nur optische Gründe, sondern dient auch als Schutzschicht für die Geogitter, besonders gegen Sonneneinstrahlung.

Die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen lassen sich in Bezug auf die CO₂-Bilanz wie folgt zusammenfassen:

- Die Zugabe der Stabilisierung hat einen großen Einfluss auf die CO₂-Bilanz. Ohne das Bindemittel beträgt die CO₂-Emission, die sich aus den Erdarbeiten, den Füllmaterialien (Kies, Schotter) und den Geotextilien ergibt, umgerechnet etwa 35 kgCO₂/m³ Erdkörper. Durch die Zugabe des Bindemittels erhöht sich die CO₂-Emission um ca. 20 kgCO₂/m³ auf insgesamt 55 kgCO₂/m³ Erdkörper deutlich. Wenn statt dem Typ Dorosol Typ C50 der Typ C30 angesetzt worden wäre, der zu 30% aus Kalk und zu 70% aus Zement besteht, würde dieses zu nochmals höheren CO₂-Emissionen führen. Somit hat das Bindemittel einen entscheidenden Einfluss auf die gesamte CO₂-Bilanz.
- Inwieweit sich die CO₂-Bilanz des Stahlbeton-Widerlagers durch eine Konstruktion aus bewehrter Erde verbessern lässt, hängt (neben der Beigabe der Stabilisierung) in entscheidendem Maße von der Breite der Brücke ab (siehe Bild 5.3). Bei der Lösung mit der bewehrten Erde nimmt die CO₂-Emission mit zunehmender Brückenbreite etwa linear zu. Bei der Stahlbeton-Lösung ist die Zunahme jedoch unterproportional; der CO₂-Anteil, der sich aus der Verbreiterung der Widerlagerwand bzw. der Gründung ergibt, ist etwa linear, aber der Einfluss der Flügelwände wird mit zunehmender Breite immer geringer.
- Mit Ansatz des Bindemittels ergeben sich im Vergleich zum Stahlbetonwiderlager folgendes (vgl. Bild 5.3):
 - Bei einer ca. 6 m breiten Brücke kann der CO₂-Bedarf gegenüber der Stahlbetonlösung, etwa um 25%, reduziert werden.
 - Ab einer Brückenbreite von 12 m liegt die CO₂-Emission bei der Lösung mit der bewehrten Erde jedoch nur noch geringfügig unter den Werten des Stahlbeton-Widerlagers. Bei größeren Breiten weist die Stahlbeton-Lösung tatsächlich eine günstigere CO₂-Bilanz auf.
- Wenn allerdings vollständig auf das Bindemittel verzichtet wird (wie dieses bei den bislang in den Niederlanden realisierten Projekten der Fall war) sieht die CO₂-Bilanz des Widerlagers aus bewehrter Erde jedoch deutlich positiver aus: Hier reduziert sich der CO₂-Bedarf gegenüber der Stahlbetonvariante bei der 6 m breiten Brücke um ca. 60%. Bei Brücken mit Breiten von 12 m, 22 m und 32 m beträgt die Reduzierung des CO₂-Verbrauchs ebenfalls 45%, 35% und 30% (siehe Bild 5.3).

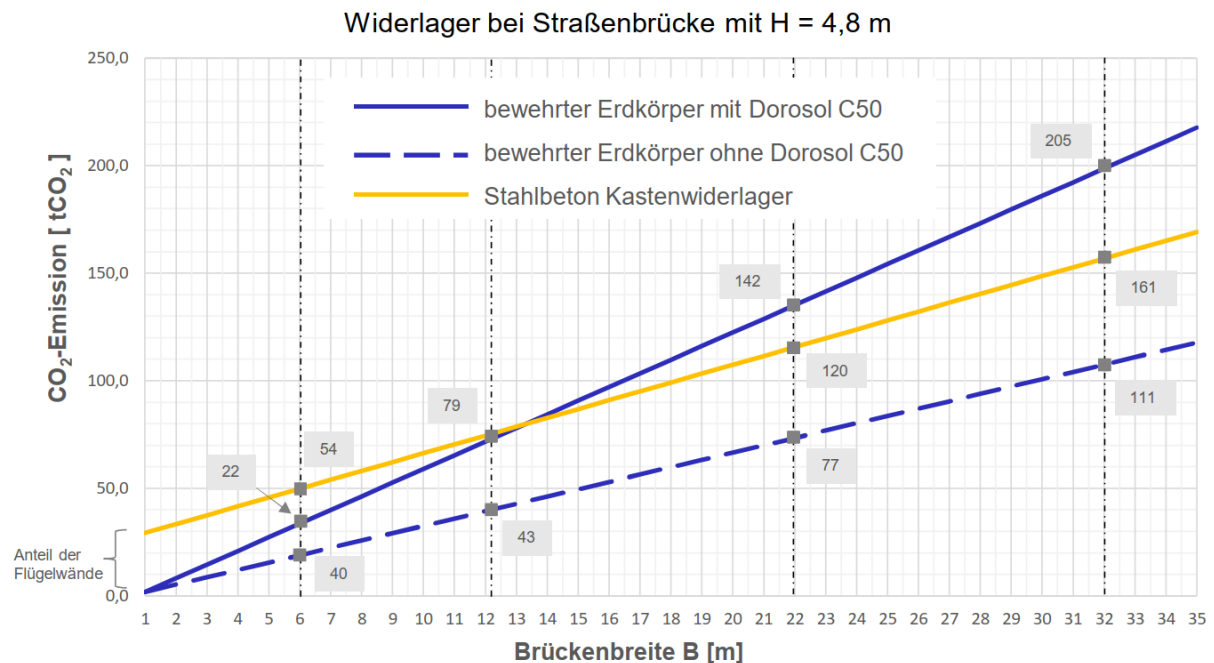


Bild 5.3 Schätzwerte für die CO₂-Emission von einem Widerlager in unterschiedlichen Bauweisen

Bei Straßenbrücken (die im Regelfall eine Breite von mindestens 12 m aufweisen) ist der Einsatz der Konstruktion aus bewehrter Erde im Hinblick auf die CO₂-Bilanz vor allem sinnvoll, wenn die Stabilisierung des Bodenmaterials optimiert oder ggf. komplett eliminiert werden kann. Hier steckt viel Potential in der Bauweise.

Weitere Vorteile der Bauweise, unter Berücksichtigung des CO₂-Aspekts, können allerdings der schnelle Einbau sein, durch den sich eine kurze Bauzeit bzw. Eingriffszeit in den Straßenverkehr ergibt und damit bauzeitliche Stausituationen begrenzt werden. Ebenso sei auf die leichtere Rückbaufähigkeit bzw. Wiederverwendung im Falle temporärer Lösungen hingewiesen.

5.2.4 Alternative Variante: Gabionenwiderlager

Eine andere Möglichkeit, die Beanspruchungen mit möglichst wenig CO₂-Emissionen in den Baugrund abzuleiten, sind Gabionenwände. Diese bestehen aus verzinkten Drahtgitterkörben, die mit Natursteinen gefüllt werden. Da es sich bei dem volumenmäßigen Hauptelement – der Steinfüllung – um ein natürliches Produkt handelt, das nicht industriell hergestellt werden muss, weist die Gabione mit ca. 50 kgCO₂/m³ im Vergleich zu einem Stahlbetonblock eine geringe CO₂-Emission auf.

Üblicherweise werden Gabionenkörbe durch eine massive Ausführung als Schwergewichtswand als Böschungssicherung eingesetzt. Die Bemessung erfolgt gemäß dem Merkblatt über Stütz- und Lärmschutzkonstruktion aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen [45]. Die zulässigen Vertikalbeanspruchungen sind verglichen mit Beton deutlich geringer und liegen etwa bei $f_{m,d} = 300 \text{ kN/m}^2$. Daher kommen für ein Gabionenwiderlager lediglich sehr leichte Überbauten in Betracht, wie beispielsweise Fuß- und Radwegbrücken als Holz- oder auch Aluminiumkonstruktion. Eine Ausführung im Zuge einer Straßenbrücke scheint allein schon wegen der hohen Setzungen ausgeschlossen.

Basierend auf den folgenden Randbedingungen wurde eine statische Vorbemessung mit dem Programm GGU-GABION durchgeführt:

- Es wurde von einer 6 m hohen Gabionenwand ausgegangen, wobei 1,0 m im Erdreich eingebettet ist; die Wand wird mit 6° gegen die Vertikale leicht geneigt ausgeführt.
- Die Gabionen bestehen aus 1,0 m hohen Einzelementen; die Drahtgitterkörbe bestehen aus verzinktem Draht mit einer Dicke von 4,5 mm und einer Maschenweite von 5 cm x 10 cm. Die Körbe werden mit gut verdichtetem Bruchstein gefüllt.
- Die Konstruktion ist an der Oberseite schubfest mit dem Überbau verbunden, so dass hier in der statischen Berechnung ein horizontales Auflager angesetzt werden kann.
- Die Bemessung erfolgte gemäß DIN EN 1997 bzw. dem Merkblatt über Stütz- und Lärmschutzkonstruktion aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen [45].
- Die mittlere charakteristische Vertikalspannung wurde an der Oberseite auf 75 kN/m² begrenzt, so dass die Setzungen an der Oberseite unterhalb von 2 cm bleiben sollten.

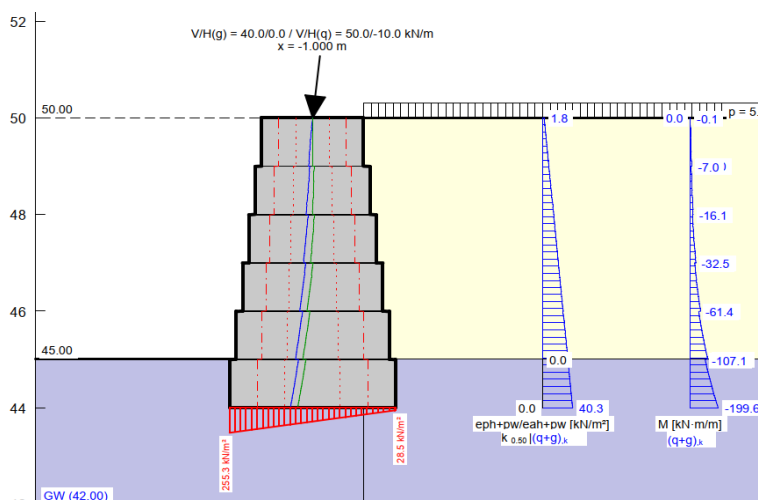


Bild 5.4 Dimensionierung eines Gabionenwiderlagers, einer Fuß- und Radwegbrücke (Plot aus Programm GGU-GABION)

Unter Berücksichtigung der oben genannten Annahmen, lassen sich die Konstruktion wie folgt vordimensionieren:

- Die Breite der Körbe in der untersten Lage liegt bei ungefähr 3,50 m, während sie in der obersten Lage 2,0 m beträgt (siehe Bild 5.5).
- Die maximalen Vertikallasten aus dem Überbau (Bemessungswert von ca. 130 kN/m je Seite) lassen sich bei Fuß- und Radwegbrücken aus Holz oder Aluminium mit einer Brückenlänge von bis zu etwa 20 - 25 m realisieren.

Mit den ermittelten Gabionenmassen wurde im Anschluss eine CO₂-Bilanzierung durchgeführt. Im Falle einer 4,5 m breiten Fuß- und Radwegbrücke ergab sich eine CO₂-Emission von ca. 4 tCO₂, hiermit werden die Werte für eine konventionelle Stahlbetonkonstruktion, die bei ca. 35 tCO₂ je Widerlager liegen, deutlich unterschritten.

Zu beachten ist allerdings die voraussichtlich kürzere Lebensdauer der Gabionenkonstruktion. Ausschlaggebend ist hier die Verzinkung der Gabionengitter. Die Herstellerangaben zur Lebensdauer schwanken aktuell zwischen 25 und 50 Jahren, die Gütegemeinschaft für Gabionen geht von einer Lebensdauer zwischen 50 und 60 Jahren aus.

Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren erhöht sich der CO₂-Bedarf (bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren) auf 8 tCO₂ je Widerlager, ist aber immer noch deutlich geringer als die 35 tCO₂ für die Stahlbetonbauweise. Zweckmäßigerweise würde diese Widerlagervariante mit einem Überbau kombiniert, deren Lebensdauer in einer ähnlichen erwartbaren Größenordnung liegt, wie beispielsweise bei einer Holzkonstruktion. Anderenfalls – z. B. im Falle

eines Überbaus aus Aluminium, mit einer höheren zu erwartenden Lebensdauer – sollte dieser so ausgebildet werden, dass dieser bei einem etwaigen Ersatzneubau der Unterbauten unproblematisch ausgebaut und wiederverwendet werden kann.

Bei Fuß- und Radwegbrücken mit einer Spannweite von bis zu 25 m kann eine Gabionenwand in Bezug auf die CO₂-Bilanz eine geeignete Alternative zu Stahlbetonwiderlagern sein.

5.3 Untersuchung von Optimierungsmöglichkeiten für Überbauten

5.3.1 Allgemeines

Der Überbau bietet, zumindest bei Straßenbrücken, zunächst einmal weniger Optimierungspotential. Zum einen ist bei einem zu schlanken Überbau mit einer zu hohen Durchbiegung zu rechnen, darüber hinaus sollten auch gewisse Reserven für eine eventuelle weitere Zunahme des Schwerlastverkehrs verbleiben, daher sollte dieser nicht zu knapp dimensioniert werden. Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchung wird dennoch folgendes untersucht:

- Untersuchung einer Holz-Beton-Verbundbrücke mit wieder verwendbarer Betonplatte für den Fall, dass die Holzkonstruktion eine verminderte Lebensdauer aufweist,
- Untersuchung, ob sich durch eine filigrane textilbewehrte Konstruktion eine CO₂-Einsparung erzielen lässt,
- Untersuchung einer Fuß- und Radwegkonstruktion aus BSH-Längsträgern und filigraner Platte aus Basalt- oder Carbongelegen mit zur Quertragwirkung,
- Vorüberlegungen zur Realisierung von Fuß- und Radwegbrücken aus vorgespannten Naturstein-Blöcken.

5.3.2 Holz-Beton-Verbund-Brücke mit demontabler Betonplatte

Die Ergebnisse der Berechnungen in Abschnitt 4.5 haben zwar gezeigt, dass durch die Holz-Beton-Verbund-Varianten bei Straßenbrücken ca. 15% weniger CO₂ emittiert wird als bei Brücken in konventioneller Stahl- bzw. Betonbauweise. Wenn allerdings berücksichtigt wird, dass die Holz-Beton-Verbundvariante voraussichtlich eine geringere Lebensdauer aufweist, kehrt sich dieser Effekt um, zumal dann – innerhalb der planmäßigen Lebensdauer von 100 Jahren – auch die bewehrte Betonplatte der HBV-Konstruktion zweimal erstellt werden muss. Daher die Überlegung, die Verbindung zwischen den BSH-Holzträgern und der bewehrten Betonplatte demontabel auszubilden, so dass bei reduzierter Lebensdauer der Holzkonstruktion die Betonplatte ausgebaut und wiederverwendet werden kann.

Die vorgeschlagene Konstruktion ist wie in Bild 5.5 dargestellt. Die Vordimensionierung der Bauteile orientiert sich an einer Straßenbrücke mit einer Spannweite von etwa 35 m in Haslach, die vom Miebach Ingenieurbüro (2021) entwickelt wurde [46]. Die Konstruktion setzt sich aus einzelnen Komponenten zusammen:

- Der Holzträger wird mittels Vollgewindeschrauben fest mit einer Stahlkappe verbunden. Die Stahlbetonfertigteilm-Fahrbahnplatte ist mit den Übergangsstahlbauteilen, die sich an beiden Seiten befinden, durch Kopfbolzendübel verbunden (Bild 5.5 a).
- Beim Zusammenfügen der Komponenten vor Ort werden die Betonplatten durch zusätzliche Stahlbleche miteinander verschweißt. Der zwischen den Betonplatten entstehende Luftraum mit einer Breite von etwa 20 cm bietet ausreichend Platz für die Durchführung der Schweißarbeiten. Die schubfeste Verbindung zwischen den Holzträgern und der Fahrbahnplatte wird durch Schrauben an beiden Seiten der Stahlkappe gewährleistet.

- Diese Verbindungsmethode kann eine stabile und zuverlässige Verbindung zwischen den einzelnen Bauteilen sicherstellen (Bild 5.5 b).
- Zum Abschluss wird ein Abdichtungslage verlegt und eine Asphalttschicht aufgebracht. Die gesamte Konstruktion wird dadurch effektiv vor Feuchtigkeit und anderen schädlichen Einflüssen geschützt (Bild 5.5 c).

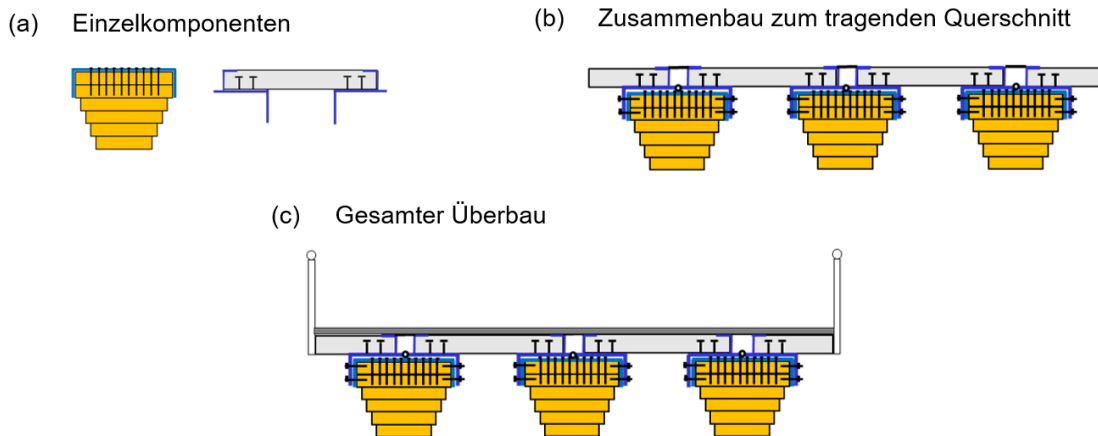


Bild 5.5 Idee für eine Holz-Beton-Verbundkonstruktion mit demontabler Betonplatte

Nach Abschluss der Vordimensionierung ist die Lösung allerdings weder technisch noch im Hinblick auf die CO₂-Bilanz eine zu favorisierende Lösung. Um allseits schubfeste Verbindungen her zu stellen, sind sehr massive Stahllösungen erforderlich. Auch im Hinblick auf die CO₂-Bilanz schneidet diese Variante schlecht ab und liegt beim untersuchten Beispiel (Bild 5.5) mit ca. 650 kgCO₂/m² Brückenfläche (bei angenommener 50-jähriger Lebensdauer der Holzkonstruktion) deutlich oberhalb der Standardlösungen aus Stahl bzw. Beton.

5.3.3 Untersuchung eines Überbaus aus textilbewehrtem Beton

Um die Jahrtausendwende wurden im Rahmen von zwei Sonderforschungsbereichen, an der RWTH Aachen und der TU Dresden, die Grundlagen für textilbewehrte Betonkonstruktionen geschaffen. Hierbei wird die Stahlbewehrung durch (inzwischen getränkte) hochfeste Faserleuge aus Glas, Carbon oder Basalt ersetzt. Die Bewehrungselemente sind wenige Millimeter dick, so dass sich hierdurch sehr dünnwandige Betonkonstruktionen mit Abmessungen im Bereich von 1-2 Zentimetern realisieren lassen.

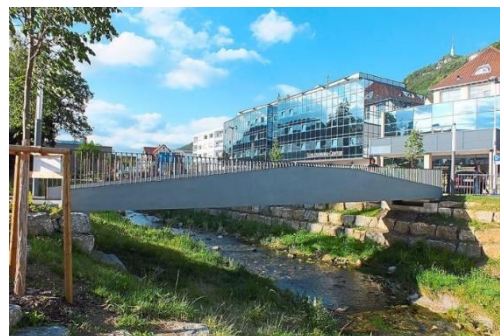
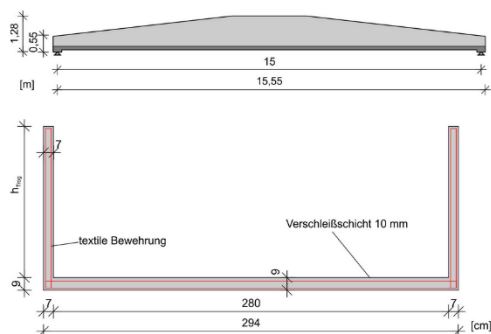


Bild 5.6 Fußgängerbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen (2015) [47]
 links: Brückenquerschnitt in Längs- und Querrichtung [47]; rechts: Bild: © Schwarzwälder Bote

Es wurden hierzu bereits einige erste Fuß- und Radwegbrücken mit Breiten von bis zu ca. 3,0 m und Spannweiten von bis zu ca. 15,50 m realisiert [47]. Da seitens des Deutschen

Ausschuss für Stahlbeton aktuell eine Richtlinie zur Nichtmetallischen Bewehrung erstellt wird, wird die Ausführung zukünftig deutlich erleichtert.

Die hier durchgeführten Vergleichsrechnungen zeigen, dass der CO₂-Bedarf für den Überbau und die Ausstattung etwa im Bereich 200 - 220 kgCO₂/m² Brückenfläche liegt, also ca. 30% geringer als bei konventionellen Brückenbauwerken. Daher kann die Bauweise bei Fuß- und Radwegbrücken im Hinblick auf eine positive CO₂-Bilanz tatsächlich eine geeignete alternative darstellen. Nachteilig ist allerdings, dass die bisherigen Brückenbreiten auf ca. 3,0 m begrenzt sind.

5.3.4 Untersuchung der Kombination aus Brettschicht-Holz-Längsträger und Basaltplatte

Eine Alternative ist, wie bei den Brücken in Remstal [48], die Holzbauweise mit einer Textilbetonplatte zu kombinieren, die den konstruktiven Holzschutz sicherstellt und die Lastverteilung in Querrichtung gewährleistet. Eine weitere Optimierung könnte erzielt werden, wenn die verwendete Carbonbewehrung durch eine Basaltfaserbewehrung ersetzt wird, die hinsichtlich der CO₂-Emission günstiger [49] ist und zugleich auch der Beton im Hinblick auf die CO₂-Bilanz optimiert wird. Die Platte kann ggf. demontabel ausgebildet werden, so dass selbst bei einer geringeren Lebensdauer der Holzkonstruktion die bewehrten Betonplatten wiederverwendet werden können.

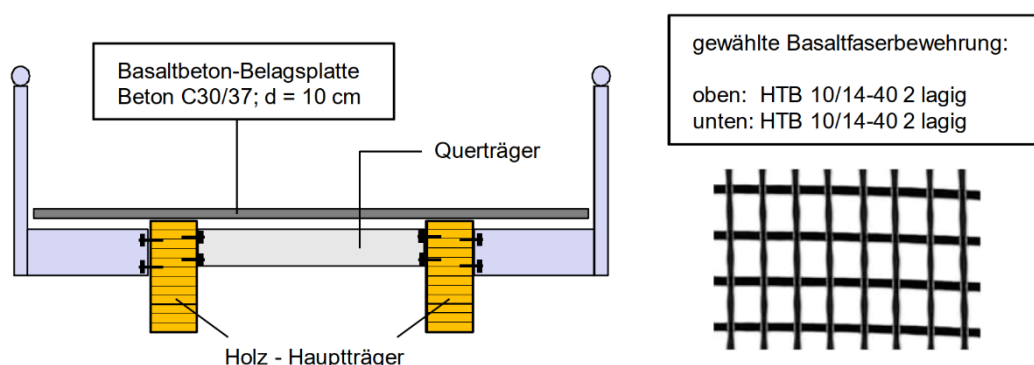


Bild 5.7 Fuß- und Radwegbrücke mit Gehbelagsplatte aus Basaltbeton nach Vorbemessung

Aus dieser Idee wurde eine Fußgängerbrücke mit einer Spannweite von ca. 20 m entworfen. Das Längssystem besteht aus zwei Brettschichtholz-Balken GL28h mit einem Querschnitt von $b \times h = 50 \times 120$ cm. Die 6,0 m breite tragende Belagsplatte liegt auf den Längsholzträgern und bildet in Querrichtung ein Einfeldträger-System mit Kragarmen (Bild 5.7). Als Verkehrslastfall wurde für diese Brücke eine normale Nutzlast von 5,0 kN/m² angenommen. Die Betrachtung einer einwirkenden Einzellast, beispielsweise einer Radlast von Räumungsfahrzeugen, wurde gezielt ausgeschlossen. Die Dicke der Betonplatte wurde nach der Vorbemessung auf 10 cm bestimmt. Als Biegebewehrung wurden oben und unten zwei Lagen Basaltgelege verwendet. In der Platte ist keine zusätzliche Querkraftbewehrung erforderlich.

Der CO₂-Bedarf pro Quadratmeter Fläche der Basaltbelagsplatte beträgt etwa 30 kgCO₂. Bei einer herkömmlichen Variante des Brückenbelags, bestehend aus Furnierschichtholz als Belagsträger und Asphaltenschicht, liegt der CO₂-Wert bei ca. 35 kgCO₂/m² für eine einmalige Herstellung. Allerdings ist zu beachten, dass diese Belagskonstruktion, aufgrund ihrer geringen Lebensdauer von 25 Jahren, mehrmals ausgetauscht werden muss. Über einen Zeitraum von 100 Jahren ergibt sich daher ein Gesamtwert von 140 kgCO₂/m². Im Vergleich

dazu weist die Basaltplatte als alternative Lösung eine bessere CO₂-Bilanz auf. Mit einer CO₂-Bilanz von 30 kgCO₂ pro Quadratmeter und einer längeren Lebensdauer kann die Basaltplatte über einen Zeitraum von 100 Jahren eine geringere Gesamtemission von Treibhausgasen verzeichnen. Gemäß eigenen Berechnungen beträgt der CO₂-Bedarf der Überbauten (ohne Geländer) etwa 80 kgCO₂/m² Brückenfläche und ist damit deutlich günstiger als klassische Fuß- und Radwegbrücken in Stahl- bzw. Betonbauweise.

5.3.5 Fuß- und Radwegbrücken aus vorgespannten Natursteinblöcken

Bei der konventionellen bewehrten Betonbauweise werden dem Beton die Druckspannungen zugewiesen und die Zugspannungen vollständig von der Bewehrung übernommen. Die hohen CO₂-Aufwendungen des Betons sind vor allem auf den CO₂-Bedarf des Bindemittels Zement zurückzuführen.

Im Vergleich zu Beton weisen Natursteine sehr hohe Druckfestigkeiten auf, die teilweise sogar noch deutlich über denen von Beton liegen. Da der Naturstein bereits als fertiges Produkt zur Verfügung steht, und im Hinblick auf die CO₂-Bilanz lediglich der Energieaufwand für den Abbau bzw. den Transport einzurechnen ist, sind die CO₂-Aufwendungen vergleichsweise gering und liegen im Bereich von 30 - 35% der für Normalbeton üblicherweise erforderlichen CO₂-Aufwendungen. Als weitere positive Eigenschaften seien an dieser Stelle auch die hohe Dauerhaftigkeit und die hohen Mengen an Ressourcen genannt. Wichtig ist vor diesem Hintergrund die Auswahl von Steinen mit entsprechender Frost- und Tausalzbeständigkeit.



Bild 5.8 Prinzipskizze Natursteinbrücke [50]

Sowohl in Paderborn als auch in Hildesheim sind zwei Projekte dokumentiert, bei denen Natursteinblöcke mittels Spannstahllitzen ohne Verbund vorgespannt wurden, in Analogie zum Betonbau wurde die Vorspannung dem Momentenverlauf angepasst (siehe Bild 5.8). Die komplette Fertigung des Überbaus erfolgte werksmäßig und wurde dann zur Baustelle transportiert und eingehoben (siehe Bild 5.9).



Bild 5.9 Einheben der Natursteinbrücke in der Königsstraße in Paderborn (Bild: © Marc Köppelmann)

Bei dem Projekt in Paderborn wurden zwei Brücken mit unterschiedlicher Spannweite realisiert, wobei die Spannweite der Größeren 18,30 m betrug. Die Brücke muss im Nachgang

lediglich mit einem Geländer ausgestattet werden, da der Naturstein bei entsprechender Bearbeitung ausreichend rutschfest ist, ist kein ergänzender Belag erforderlich.

Bei der Realisierung werden die CO₂-Gehalte vornehmlich auch durch die aufwendigen Transporte beeinflusst, der einerseits von der Entnahme- bzw. Verarbeitungsstelle des Natursteins abhängig ist und andererseits, inwiefern – gerade bei großen Brückenlängen – die direkten Zuwege für den Transport geeignet sind.

Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung erfolgt eine überschlägige Vorbetrachtung der Bauweise unter CO₂-Aspekten. Die CO₂-Ermittlung des Überbaus umfasst die Hauptbauteile der Brücke, also die 30 - 35 cm dicken Natursteinplatten und die Spannstadlglieder. Als Gesteinsart wurde von einem Granit ausgegangen, der neben der für das Aufbringen großer Vorspannkräfte erforderliche Festigkeit auch eine hohe Säure- und Frostbeständigkeit aufweist, sodass auf einen ergänzenden Brückenbelag verzichtet werden kann. Da – ausgehend von Schleswig-Holstein – die nächsten Vorkommen im Erzgebirge bei Aue, Plauen zu finden sind, sind für das Material allerdings ca. 650 km Transportweg einzurechnen. Dieses im Modul A4 (Transport) mit eingerechnet ergibt sich für einen Kubikmeter Naturstein ein Einheitswert von ca. 140 kgCO₂. Bei der Ermittlung des Gesamt-CO₂-Bedarfs der vorgespannten Natursteinbrücke sind vor allem auch die Spannglieder relevant, die etwa zu 50% in die Gesamt-Bilanz eingehen. Insgesamt lassen sich die CO₂-Aufwendungen des Naturstein-Überbaus über eine Nutzungsdauer von 100 Jahren mit ca. 105 kgCO₂/m² Brückenfläche abschätzen, wobei der Belag hier schon integriert ist. Hiermit nähert sich der Überbau dem der Holzbrücke an, deren CO₂-Bedarf mit etwa 88 kg/m² Brückenfläche abgeschätzt wurde (siehe Bild 4.18). Nochmal günstiger im Hinblick auf die CO₂-Bilanz würde die Variante ausfallen, wenn geeignetes Gestein direkt vor Ort wäre.

5.4 Optimierung der Hauptbaustoffe

5.4.1 Allgemeines

In den vorgenannten Abschnitten sind Maßnahmen aufgezeigt worden, den CO₂-Bedarf durch alternative Konstruktionsprinzipien zu reduzieren. In einigen Fällen werden sich hierbei Stahlbetonkonstruktionen zu alternativen Bauweisen verändern. Dennoch werden im Brückenbau die Baustoffe Stahl und Beton die Hauptbaustoffe bleiben. Da beide sehr CO₂-intensiv sind, gilt es in den Abschnitten 5.4.2 und 5.4.3 nochmals diese mit Rücksicht auf die CO₂-Bilanz zu optimieren. Im Abschnitt 5.4.4 darüber hinaus nochmal einige Aspekte zum Baustoff Holz.

5.4.2 Beton

Die Auswertung der Ergebnisse der Parameterstudie in Arbeitsschritt 4 zeigt, dass ein wesentlicher CO₂-Treiber der Baustoff Beton und hierbei im speziellen der Zement ist. Da man auch mittelfristig nicht auf den Einsatz von Beton verzichten kann, gilt es neben der Optimierung der Abmessungen auch die Rezepturen unter CO₂-Gesichtspunkten zu optimieren.

Im Zement ist der Portlandzementklinker (nachfolgend: Klinker) für den größten Teil der freigesetzten CO₂-Menge verantwortlich. Bei der Herstellung von Klinker entstehen ungefähr 50% der CO₂-Emissionen durch den chemischen Prozess, in dem Kalkstein gebrannt wird und das überschüssige Kohlendioxid entweicht. Weitere 35% fallen bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe (hier Braunkohle, Steinkohle) beim Hochofenprozess an. Die verbleibenden

ca. 15% entfallen auf die anderen Prozesse, wie das Zermahlen und die Transporte im Werk.

Tabelle 5.1 Einteilung der CO₂-Emissionen bei Herstellung einer Tonne Zement

Herstellungsphase	Elektrisch bedingtes CO ₂	Brennstoffbedingtes CO ₂	CO ₂ infolge chemischer Reaktionen
1. Brennen		205 kgCO ₂	288 kgCO ₂
2. Mahlen	70 kgCO ₂		
3. Transport		24 kgCO ₂	
Summe		587 kgCO ₂ /t Zement*	

*) Wert Durchschnittsprodukt Deutschland 2015 [17]

Um die enorme CO₂-Belastung, die von der Zementherstellung ausgeht, zu reduzieren, muss der Klinkeranteil im Zement durch einen alternativen Rohstoff ersetzt werden, wobei die Festigkeit, die Dauerhaftigkeit und andere Qualitätsmerkmale weiterhin zielsicher erreicht werden müssen [51]. Grundsätzlich gibt es hier zwei Wege:

- a) Den erforderlichen Anteil an Zementleim zu reduzieren, z.B. durch
- Optimierung der Packungsdichte durch Anpassung der Sieblinie, sodass weniger Zementleim erforderlich wird,
 - Einsatz von Zusatzstoffen zur Zementsubstitution,
 - Einsatz von Zusatzmitteln, um z.B. den Wasserbedarf (und damit den Zementleimgehalt) herabzusetzen.

- b) Ersatz des CO₂-intensiven Portlandzementklinkers durch andere reaktive Stoffe

Hierbei ist die Variante b) die deutlich effektivere. Als Ersatz eignet sich vor allem Hüttensand, der als Abfallprodukt bei der Roheisenherstellung anfällt. Das Material entsteht, nach dem die Hochofenschlacke aus dem Hochofen genommen und schnell abgekühlt wurde.

Da es sich um ein ohnehin anfallendes Abfallprodukt handelt, werden bei der CO₂-Bilanz von Hüttensand Synergien mit einbezogen. In dem Ansatz der geschätzten Allokation der Ökobilanz der Stahlherstellung werden die entstehenden Emissionen anteilig dem jeweiligen Hauptprodukt „Stahl“ und dem Nebenprodukt „Schlacke“ zugerechnet [52]. Für den Einsatz im Zement wird Hüttensand durch weitere Prozesse, wie z.B. Granulation und Zermahlen, zum Hüttensandmehl aufgearbeitet, bei denen weitere CO₂-Emissionen entstehen. Lässt sich der Hüttensand getrennt zermahlen, wird er anschließend mit Klinkermehl zum fertigen Hochofenzement gemischt. I. A. wird die CO₂-Emission von Hüttensand mit 0,114 kgCO₂/kg Hüttensand angegeben (siehe z.B. [53], S.47), also deutlich geringer als von Portlandzement. Die CO₂-Bilanz von Zement lässt sich daher durch entsprechenden Ersatz des Portlandzementklinkers durch Hüttensand entscheidend verbessern.

In Tabelle 5.2 sind die CO₂-Mittelwerte von verschiedenen Zementarten aus eigener Ermittlung dargestellt, wobei ein ansteigenden Anteil an Hüttensand berücksichtigt wurde. Der CO₂-Ausstoß in der Herstellung des üblicherweise verwendeten Portlandzementes CEM I, liegt bei ca. 850 kg/t Zement. Bei Portland-Hüttenzement, CEM II (A und B), sinkt die CO₂-Emission auf ca. 600 kg/t Zement. Mit einem Hüttensand-Anteil von ca. 80%, dementsprechend Zement CEM III B, kann der CO₂-Ausstoß mit einem niedrigen Wert von ca. 250 kg/t Zement gerechnet werden [54]. Hier sind allerdings eine verzögerte Festigkeitsentwicklung bzw. eine längere Nachbehandlungsdauer einzurechnen. Dieses muss vom Bauablauf möglich sein bzw. sollte die CO₂-Emissionen aus bauzeitlichen Stau-Situationen nicht erhöhen.

Bis zu einem Hüttensandanteil von 65%, der einem CEM III/A entspricht, ist gemäß ([55], S. 6) noch davon auszugehen, dass Festigkeitsentwicklung und Nachbehandlungsdauer vergleichbar wie bei Normalbeton sind.

Durch Verwendung von Hochofenzement der Betonmischung würde ein Kubikmeter Beton C30/37 etwa 40% weniger CO₂ ausstoßen, als üblicher Beton, der nahezu ausschließlich aus Portlandzement besteht (siehe Tabelle 5.2).

Tabelle 5.2 CO₂-Emission in der Herstellung von Zement und Beton (Durchschnittswerte)

	CEM I Portlandzement	CEM II Portland-Hüttenze- ment	CEM III/A Hochofenzement
Portlandzementklinker M.-%	95 – 100	65 – 94	35 – 64
Hüttensand M.-%	-	6 – 35	36 – 65
kgCO ₂ /t Zement	850	720	450
kgCO ₂ /m ³ Beton C30/37	304	262	175
		-14%	-42%

Bei der Verwendung von Hochofenzement sind die in der DIN 1045-2 geregelten Anwendungsbereiche zu beachten. Im Brückenbau, gemäß ZTV-ING (2017), dürfen Zemente CEM III für Beton von Kappen nicht verwendet werden. Bei Betonschutzwänden darf nur Zement CEM III/A mit höchstens 50 M.-% Hüttensand-Massenanteil eingesetzt werden.

Zu beachten ist allerdings, dass die Verfügbarkeit des Hüttensandes mittelfristig sinken wird, da Eisen zukünftig vermutlich zu einem höheren Anteil aus Stahlschrott über die sogenannte Sekundärroute hergestellt wird als über den Hochofenprozess. Parallel laufen allerdings auch große Anstrengungen der Zementindustrie, die bei der Zementherstellung anfallenden CO₂-Emissionen zu senken. So ist davon auszugehen, dass sich Technologien, wie z.B. zur Abscheidung und Nutzung des anfallenden CO₂'s, die sich aktuell noch in der Test- und Entwicklungsphase befinden, mittelfristig zum Einsatz kommen.

5.4.3 Baustahl und Betonstahl

Neben Beton ist Stahl einer der Hauptbaustoffe im Brückenbau, sei es in Form von Profilen bei Stahl oder Stahl-Verbundbrücken oder als Bewehrung in Betonkonstruktionen. Auch dieser ist bedingt durch die Herstellung sehr CO₂-intensiv.

Die Stahlindustrie produziert ungefähr 50 Mio. tCO₂ [56] und hat somit einen Anteil von ca. 5% an den deutschlandweiten CO₂-Emissionen. Üblicherweise wird Rohstahl im Hochofen mit einem nachgeschalteten Konverter hergestellt. Bei der Herstellung einer Tonne Rohstahl werden rund 1,7 tCO₂ freigesetzt [57].

Aufgrund exothermer Reaktionen im Hochofen wird beim Prozess nur wenig zusätzliche Energie benötigt. Die CO₂-Emissionen fallen hauptsächlich auf erforderliche chemische Reaktionen an, die entstehen, wenn die Eisenerze mit Kohlenstoffmonoxid (CO) aus Verbrennung von Koks als Reduktionsmittel zu Roheisen reduziert werden. Im Konverter wird Roheisen durch das Sauerstoff-Aufblasverfahren in Rohstahl umgewandelt, wobei die Begleitelemente, einschließlich des Kohlenstoffanteils im Roheisen (C), durch Oxidation entfernt werden. Dabei bildet sich CO₂ als Endprodukt der chemischen Reaktionen. In den beiden Phasen beläuft sich der CO₂-Ausstoß auf etwa 1,6 tCO₂ pro Tonne Stahl [57], was bereits über 90% der gesamten CO₂-Emissionen während des Herstellungsprozesses ausmacht.

Eine Alternative Möglichkeit ist, Stahl aus Stahlschrott ggf. in Kombination mit Eisenschwamm und flüssigen Roheisen über das Elektrostahlverfahren herzustellen. Die gängigste Umsetzung dieses Verfahrens ist das Elektrolichtbogenofen-Verfahren. Je größer der Anteil an Stahlschrott ist, desto geringer ist der Bedarf an Roheisen aus dem Hochofen, wodurch der größte Teil der CO₂-Emissionen reduziert wird.

Zum aktuellen Zeitpunkt werden ca. 70% des gesamten Baustahls über die Hochofen-Konverter-Route produziert und 30% durch das Elektrostahl-Verfahren. Bewehrungsstahl wird sogar fast zu 100% aus Recyclingstahl hergestellt. [17]

Wenn kein Stahlschrott zur Verfügung steht, hat Eisenschwamm als Rohstoffersatz eine größere Bedeutung. Eisenschwamm wird aus Eisenerz mit dem Direktreduktionsverfahren gewonnen. Beim Direktreduktionsverfahren kann Wasserstoff (H₂) als Reduktionsmittel verwendet werden. So entstehen als Endprodukte der Reaktion Eisen (Fe) und Wasser (H₂O) anstatt CO₂. Dadurch werden die CO₂-Emissionen gegenüber dem herkömmlichen Prozess im Hochofen stark reduziert.

Sowohl das Elektrolichtbogenofen-Verfahren als auch die Herstellung von Eisenschwamm, mit dem Direktreduktionsverfahren mit 100% Elektrolyse-Wasserstoff, verbrauchen überaus viel elektrischen Strom. Würde der benötigte Strom durch regenerative Stromquellen erzeugt werden, wäre das Elektrostahl-Verfahren eine bedeutsame Maßnahme für die Reduzierung des CO₂-Ausstoßes in der Stahlindustrie.

5.4.4 Aspekte zum Holz

Vielfach wird CO₂-reduziertes Bauen allein auf Holz als „natürlichen“ bzw. nachwachsenden Baustoff zugespitzt. Da Holz im Zuge der Entstehungs- bzw. Wachstumsphase als Baum CO₂ bindet, wird diesem im Modul A1 (Rohstoffbereitstellung) sogar ein negativer GWP-Wert von -762,5 kgCO₂/m³ angegeben [17], so dass mitunter sogar die Meinung vorherrscht, dass bei Verwendung von Holz das Bauen an sich sogar einen positiven Beitrag zum Klimaeffekt liefert.

Ungeachtet der vielen ökologischen Vorteile, die Bauen mit Holz (z.B. vor allem im Hochbau mit sich bringt), sei hier allerdings auf folgende Aspekte hingewiesen:

1. Der Ansatz, für Holz im Modul A1 der CO₂-Bilanz einen negativen CO₂-Wert in Höhe von -762,5 kgCO₂/m³ auszuweisen ist nur unter den beiden folgenden Randbedingungen gerechtfertigt:
 - a) Da allein durch das Fällen und Verarbeiten eines Baumes noch kein CO₂-Speichereffekt entsteht, der als CO₂-Abzugswert rechnerisch in Ansatz gebracht werden kann, muss sichergestellt sein, dass für jeden gefällten Baum auch wieder ein neuer gepflanzt wird. Dieses kann zumindest für einheimische Hölzer als sichergestellt angenommen werden, bei externem Holz ist dieses kritisch zu hinterfragen bzw. zu klären.
 - b) Die Lebensdauer des Holzes (bzw. der Zeitraum, bis zu dem das gebundene CO₂ wieder entweicht) muss in der Größenordnung der Hiebreeife des Baumes – also etwa bei 80 Jahren – liegen. Diese Zeitspanne wurde zumindest im Bereich von Holzbrücken in der Vergangenheit im Regelfall nicht erreicht. Von daher kommt dem konstruktiven Holzschutz auch im Hinblick auf den Klimaschutz eine hohe Bedeutung zu. Wenn die Lebensdauer des Brückenbauwerks die Hiebreeife nicht erreicht, muss zumindest sichergestellt sein, dass das Holz im Sinne einer Kaskadennutzung

an anderer Stelle (z.B. in Form von Spanplatten oder in der Papierindustrie) weiter genutzt wird.

2. Dass während der Wachstumsphase gespeicherte CO₂ entweicht am Ende der Lebensdauer wieder, sei es durch eine thermische Verwertung oder durch eine allmähliche Verrottung. Dieses ist bei der Aufsummierung der CO₂-Anteile zu berücksichtigen.
3. Vielfach wird in Summe über den gesamten Lebenszyklus für Holz allerdings trotzdem eine negativer Abzugswert in der CO₂-Bilanz berücksichtigt, weil im Modul D (Recyclingphase) von einer thermischen Verwertung ausgegangen wird. Hier wird davon ausgegangen, dass Holz am Ende der Lebensdauer durch Verbrennung in Energie umgewandelt wird, so dass hierdurch fossile Brennstoffe eingespart werden. Der Einspareffekt wird gemäß [17] mit einem Abzugswert von -305 kgCO₂/m³ für Brettschichtholz in Abzug gebracht. Wenn man bedenkt, dass dieses Szenario, der Rückbau von Holzbauwerken, die zukünftig erst noch geplant und gebaut werden müssen, in ferner Zukunft liegt, ist es nach Meinung der Autoren nicht realistisch, von einer Verbrennung von Holz zur Gewinnung von Energie auszugehen. Daher scheint es lediglich zulässig das Recyclingpotential einer stofflichen Verwertung anzusetzen, dass in der ÖKOBAUDAT mit -13,16 kgCO₂/m³ Holz angegeben wird.

Da es sich bei Holz im Ingenieurbau weitestgehend um Brettschichtholz handelt, dass neben der Trocknung auch noch verleimt wird, ist die CO₂-Bilanz, im Vergleich zu anderen Baustoffen, nicht mehr so außergewöhnlich positiv. In Summe fließt Brettschichtholz mit 153 kgCO₂/m³ Holz in die Bilanz ein, auch hier ist weiterhin die Voraussetzung, dass das Holz mindestens durch eine Kaskadennutzung so lange genutzt werden kann, bis der nachwachsende Baum nach ca. 80 Jahren die Hiebreife erreicht hat.

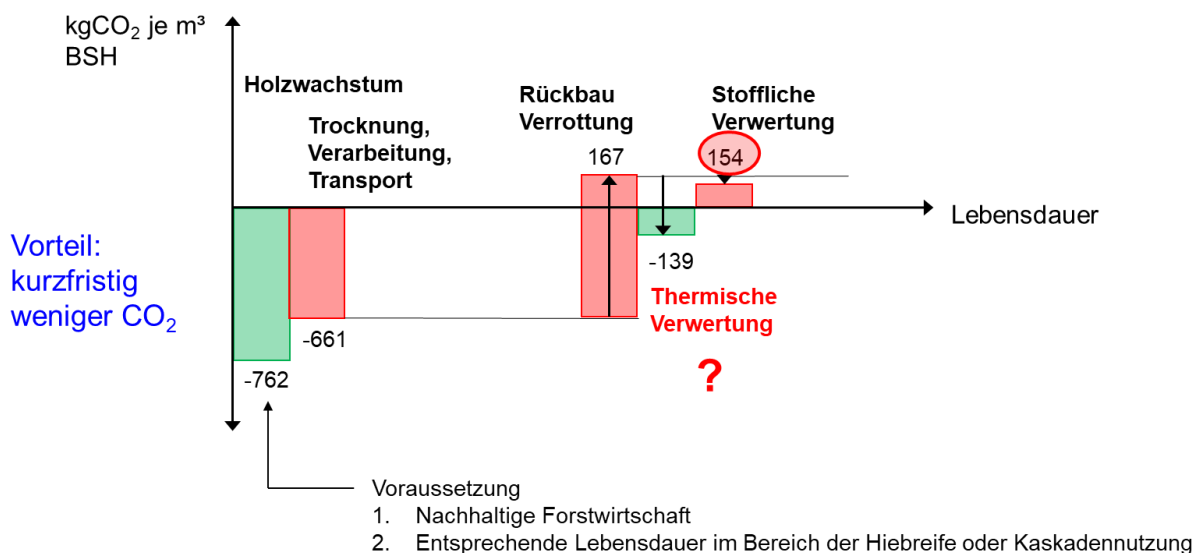


Bild 5.10 CO₂-Bilanz von 1m³ Brettschichtholz über die Lebensdauer (schematische Darstellung)

5.5 Untersuchung zur Kompensation des CO₂-Anteils durch Photovoltaik-Elemente

Im Folgenden soll untersucht werden, ob im Zuge der Erstellung von Brückenbauwerken auf indirekte Weise sinnvoll CO₂ eingespart werden kann, in dem Photovoltaik-Elemente integriert werden, so dass als Kompensation zu den CO₂-Emissionen Strom produziert wird, und somit an anderer Stelle weniger CO₂ zur Stromerzeugung emittiert werden muss.

Der Strombedarf kann durch das Brückenbauwerk selbst im Regelfall nicht verwendet werden (allenfalls für die Straßenbeleuchtung), kann allerdings als überschüssige Energie ins Netz einspeist werden. Durch den „selbsterzeugten“ Strom lässt sich die CO₂-Emission der Brücke kompensieren und die CO₂-Bilanzierung kann somit vergünstigt werden.

Zur Integration der Photovoltaik-Elemente in das Brückenbauwerk kämen beispielsweise folgende Lösungen in Betracht:

- (L1) Integration im Geländer,
- (L2) Integration seitlich mit 30° Neigung zur Horizontale (siehe Bild 5.11),
- (L3) Module als Straßenbelag mit speziellen Solar-Straßen-Module (siehe z.B. Produkt Solmove unter www.solmove.com).

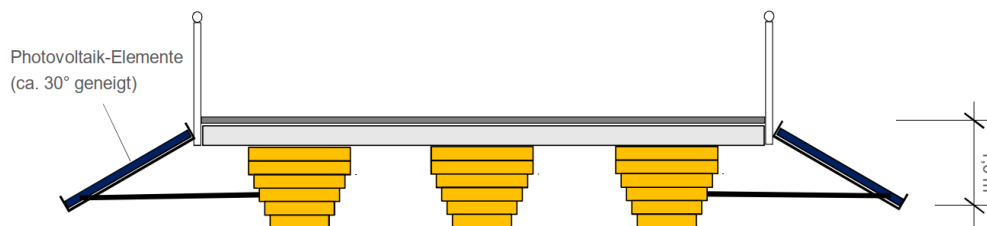


Bild 5.11 Darstellung Photovoltaik-Elemente seitlich integriert

Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden alle drei Möglichkeiten exemplarisch ausgearbeitet, um abzuschätzen, inwieweit der CO₂-Bedarf der Brückenkonstruktion durch integrierte Photovoltaik-Elemente reduziert werden kann.

Bei der Verlegung der Photovoltaik-Elemente ist zu entscheiden, ob es eine Reihenschaltung, eine Parallelschaltung oder eine gemischte Schaltung werden soll. Sinnvoll wären hier Varianten, in denen man mehrere Module in Reihe schaltet und diese „Pakete“ dann parallel verschaltet.

Für die Integration von Photovoltaik-Elementen ins Geländer auch über eine Rahmenkonstruktion seitlich am Überbau anliegend integriert (siehe Bild 5.11), lassen sich kristalline Photovoltaik-Elemente einsetzen. Je nach Leistung der Produkte und deren Ausrichtung ist der Stromertrag pro m²-Modulfläche pro Jahr unterschiedlich. Insgesamt können pro verbauten Modul, mit circa 1,6 m² Fläche, im Durchschnitt 300 kWh Strom pro Jahr erzeugt werden. Unter Berücksichtigung, dass gemäß aktuellem Strommix (Jahr 2021 angesetzt) je kWh Strom etwa 0,485 kgCO₂ verbraucht werden, könnten hiermit je Modul 145 kgCO₂ pro Jahr eingespart werden.

Bezüglich der Integration von Modulen in den Straßenbelag ist in Deutschland aktuell lediglich das Modul Solmove bekannt (siehe www.solmove.com). Hier werden spezielle Solar-Straßen-Elemente hergestellt, die eine tragfähige und rutschfeste Glasoberfläche aufweisen und daher in Fahrbahnplatten von Fuß- und Radwegbrücken bzw. im Kappenbereich von Straßenbrücken verklebt werden können. Nach Angabe des Herstellers liegt der Stromertrag bei 100 kWh/m² Fläche pro Jahr.

Der Energie- bzw. CO₂-Ertrag wurden an einem konkreten Rechenbeispiel mit den folgenden Parametern untersucht. Die Ergebnisse sind auf andere Bauwerke übertragbar:

- Es wurde eine 20 Meter lange Straßenbrücke mit seitlichen Kappen von jeweils 2,05 m betrachtet.

- Für die kristallinen Photovoltaik-Elemente wird das 1680 x 990 mm groß Panel der Firma Solarwatt gewählt. Damit werden je Längsseite der Brücke 19 Einheiten im Geländer und 19 Einheiten seitlich integriert. Die Nennleistung von einem Element nach Herstellerangabe kann bis zur 365 Wp erreichen. Mit Hilfe der Software meteoblue (<https://www.solarserver.de/pv-anlage-online-berechnen/>) lässt sich der geschätzte Energieertrag pro Modul über das ganze Jahr berechnen. Hierbei ergibt sich der Gesamtwert von ca. 325 kWh / Modul / a.
- Auf den Brückenkappen lassen sich 100 Solar-Straßen-Module mit der Größe 0,6 m x 0,6 m anordnen. Die Verschaltung der Zellen folgt einer parallelen Reihe. Im Durchschnitt könnte ein durch die Solmove-Solar-Module erzeugter Stromertrag von ca. 90-100 kWh / m² / a generiert werden.
- Die Nutzungsdauer von einem Photovoltaik-Element beträgt i.d.R. 20 - 25 Jahre.
- Der Orientierungswert [17] für den CO₂-Ausstoß in der Produktherstellung liegt bei ca. 310 kgCO₂/m² Fläche Photovoltaik-Element. Er wurde in der CO₂ Berechnung eingesetzt, sowohl für normale kristalline Photovoltaik-Elemente als auch für Solar-Straßen-Module.

Bei der Berechnung des Netto-Stroms, der von PV-Anlagen erzeugt und letztendlich ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird, müssen folgende Verluste berücksichtigt werden:

- Leistungsminderung der Photovoltaik-Elemente: Über die Zeit hinweg unterliegen PV-Elemente einer Leistungsminderung von etwa 0,5% pro Jahr. Insgesamt kann dies über einen Zeitraum von 20 Jahren zu einer Minderung von 10% bis 20% führen.
- Verlust durch den PV-Wechselrichter: PV-Wechselrichter weisen in der Regel einen Wirkungsgrad von etwa 85 - 90% auf. Dies bedeutet, dass ein gewisser Prozentsatz der erzeugten Energie beim Wechselrichter verloren geht.
- Verluste beim Transport des Stroms durch das Netz: Die hängen von der Entfernung zur nächsten Einspeisestelle, der Netzinfrastruktur und der Netzbelastung ab. Im Allgemeinen werden die Verluste als Prozentsatz des eingespeisten Stroms angegeben und können zwischen 1% und 5% liegen. Diese Verluste entstehen hauptsächlich durch den Widerstand der Übertragungsleitungen und andere Netzkomponenten.

Insgesamt wurde bei der Berechnung des tatsächlichen Netto-Stroms ein Verlust von etwa 30% eingerechnet. Dieser Wert dient als grobe Schätzung für den Gesamtverlust bei der Stromerzeugung durch PV-Anlagen.

Die Ergebnisse wurden in der Tabelle 5.3 dargestellt.

Hiernach lässt sich durch Integration der seitlichen Photovoltaik-Elemente durchaus ein nennenswerter Stromertrag erzielen, der zum aktuellen Zeitpunkt einem nicht vernachlässigbaren CO₂-Äquivalent entspricht.

Da Strom zukünftig mit geringerem CO₂-Ausstoß produziert werden soll, sinkt der Wert entsprechend, die Variante wird im Folgenden jedoch weiter konzeptionell mit bedacht.

Tabelle 5.3 Gesamte CO₂-Einsparung durch Einrichtung von Photovoltaik-Elementen über 20 Jahre

Lösungen	Modul 1,60 m² seitlich α zur Horz. = 30°	Modul 1,60 m² im Geländer (α = 90°)	Modul 0,36 m² als Belag auf Kappen
Anzahl	38	38	100
LCA*) [tCO ₂]	22	22	11
Stromertrag pro Jahr [kWh]	12 500	10 200	2 900
Netto-Strom pro Jahr [kWh]	8 750	7 140	2 030
Wert A*) [tCO ₂]	63	47	8,5
Eingespartes kgCO ₂ pro (Meter Brückenlänge · Jahr) (bzgl. 2021)	157,5	117,5	21,25
Wert B*) [tCO ₂]	8,5	3,0	-4
Eingespartes kgCO ₂ pro (Meter Brückenlänge · Jahr) (bzgl. 2035)	21,25	7,5	-10

*) LCA: CO₂-Verbrauch bei der Herstellung des Produkts

*) Wert A, Wert B: Eingesparte tCO₂ über einen Zeitraum von 20 Jahren, zurückgerechnet anhand des Einheitswerts des Strommix 2021 (Bild 4.28 links) von 0,485 kgCO₂/kWh (bei Wert A) und des prognostizierten Einheitswerts des Strommix 2035 (Bild 4.28 links) von 0,175 kgCO₂/kWh (bei Wert B).

6. Zusammenstellung der Ergebnisse

6.1 CO₂-Emission von Brückenbauwerken

Die CO₂-Emissionen, die auf die Erstellung und den Betrieb von Brückenbauwerken zurückzuführen sind, liegen durchaus in einer größeren Spannbreite von Werten zwischen 0,3 und 5,5 tCO₂ je m² Brückenfläche. Dennoch lassen sich anhand der durchgeführten Untersuchungen an landestypischen Brückenbauwerken in Schleswig-Holstein mit Längen von bis zu 40 m folgenden Anhaltswerte ableiten, anhand derer der CO₂-Bedarf von Brückenbauwerken in frühen Planungsphasen abgeschätzt werden kann:

Schätzwerte für die Leistungsphase 0 (noch keine Planung vorhanden):

Die CO₂-Emission über die Lebensdauer einer Brücke lässt sich wie folgt abschätzen:

- Straßenbrücke: $t\text{CO}_2/\text{m}^2_{\text{Brückenfläche}} = 16,5 / L[\text{m}] + 0,70 \geq 1,2 \text{ t/m}^2$
- Fuß- und Radwegbrücke: $t\text{CO}_2/\text{m}^2_{\text{Brückenfläche}} = 32 / L[\text{m}] + 0,45 \geq 0,7 \text{ t/m}^2$

Die Werte beziehen sich auf die gesamte Lebensdauer der Brücke, wobei die reine Herstellungsphase des Bauwerks (gemäß [14]) mit 90% abgeschätzt werden kann, lediglich bei Holzbrücken ist der Wert in der Herstellungsphase deutlich geringer.

Wegen der Vielzahl der Variationsmöglichkeiten sind die Streuungen bei Fuß- und Radwegbrücken im Regelfall deutlich größer, daher die o. g. formelmäßige Angabe hier im Regelfall deutlich stärker auf der sicheren Seite.

Schätzwerte für die Leistungsphase 2:

In der Leistungsphase 2 sind die grundsätzliche Brückenkonstruktion, die Baustoffe und ggf. auch die wesentlichen Ausstattungsmerkmale bereits bekannt, sodass der CO₂-Bedarf hier bereits spezifischer ermittelt werden kann. Basierend auf den o. g. Untersuchungsergebnissen lässt sich der CO₂-Bedarf über die Lebensdauer wie folgt abschätzen:

$$t\text{CO}_2 = A [\text{m}^2] \cdot (\text{CO}_{2,\text{ÜB}} + \text{CO}_{2,\text{A}}) + 2 \cdot A_{\text{WL}} [\text{m}^2] \cdot \text{CO}_{2,\text{WL}}$$

Dabei sind

A	Brückenfläche [m ²] mit $A = B[\text{m}] \cdot L[\text{m}]$
A _{WL}	Ansichtsfläche des Widerlagers [m ²] mit $A_{\text{WL}} = B[\text{m}] \cdot H[\text{m}]$
CO _{2,ÜB}	CO ₂ -Kennwert Überbau gemäß Tabelle 6.2
CO _{2,A}	CO ₂ -Kennwert Ausstattung gemäß Tabelle 6.2
CO _{2,WL}	CO ₂ -Werte Widerlager gemäß Tabelle 6.2

Die o.g. Formel und die in Tabelle 6.1 vorgegebenen Werte sind für Straßenbrücken und Fuß- Badwegbrücken mit den folgenden Parametern anwendbar:

- B - Brückenbreite von 6 bis 35 m bei Straßenbrücke und von 3 bis 6,5 m bei Fuß- Radwegbrücke,
- L - Lichte Weite zwischen den Endwiderlagern von 4 bis 40 m,
- H - Lichte Höhe $\geq 4,8$ m, Höhe des Widerlagers von 3,5 bis 6,0 m.

Tabelle 6.1 CO₂-Werte für Bauteilgruppen bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahre

	Straßenbrücke	Fuß- und Radwegbrücke
Gründung - Widerlager CO_{2,WL}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachgründung: 1,5 tCO₂/m² oder $(8 / B [m] + 1,0)$ ▪ Tiefgründung: 1,8 tCO₂/m² oder $(10 / B [m] + 0,03 \cdot T [m])$ 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kastenwiderlager: 2,6 tCO₂/m² ▪ Tiefgründung 2,0 tCO₂/m²
Überbau CO_{2,ÜB}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton, Stahl, Stahlverbund: 0,37 tCO₂/m² ▪ Holzbetonverbund: $(0,32 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beton, Stahl, Stahlverbund: 0,20 tCO₂/m² ▪ Holzbetonverbund: $(0,23 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m² ▪ Holz: $(0,08 \cdot (100a / ND))$ tCO₂/m²
Belag und Ausstattung CO_{2,A}	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgemein: $(0,125 + 3,15 / B [m])$ tCO₂/m² 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Allgemein: 0,15 tCO₂/m² ▪ Zuschläge: <ul style="list-style-type: none"> - RHD-Belag: +0,35 tCO₂/m² - GFK-Belag: +0,25 tCO₂/m²

* Mit B = Brückenbreite [m]
 T = Einbindetiefe der Pfähle bzw. der Spundwände [m]
 a = Jahre
 ND = voraussichtliche Nutzungsdauer von Bauteilen [a]

Auch hier lässt sich die CO₂-Emissionen für die reine Herstellung des Bauwerks mit 90% des oben ermittelten Wertes abschätzen.

Vorgehen ab der Leistungsphase 3:

Ab der Leistungsphase 3 liegen im Regelfall konkrete Massen vor, so dass hier nicht mehr mit den o.g. Anhaltswerte gearbeitet werden sollte, sondern eine konkrete CO₂-Bilanz durchgeführt werden kann.

6.2 Optimierungsvorschläge

6.2.1 Allgemeines

Im Folgenden sind Vorschläge zusammengestellt, wie der CO₂-Bedarf von Brückenbauwerken reduziert werden kann. Hingewiesen sei darauf, dass die Vorschläge nicht als „pauschales Kochrezept“ zu verstehen sind, da jede Brückensituation individuell ist. Dennoch bieten die Vorschläge ein Repertoire an Möglichkeiten, die im Zuge der Planung kritisch hinterfragt und ggf. herangezogen werden können.

Die Maßnahmen sind so zusammengestellt, dass diese zunächst die grundsätzliche Konzeption des Bauwerks betreffen und im folgenden sukzessive nachgelagerte Gesichtspunkte wie Ausführung der Widerlager und Optimierung der Baustoffe des Überbaus behandelt werden. In Abschnitt 6.2.9 sind die Maßnahmen nochmals zusammengefasst.

6.2.2 Generelle Maßnahmen

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass bezüglich des Brückenbauwerks nahezu 85 - 90% der CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase der Baustoffe (Module A1-3) emittiert werden. Ebenso zeigen die Untersuchungen, dass bei dichtbefahrenen Verkehrswegen der CO₂-Anteil aus bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen deutlich höher sein kann als der Anteil aus der Erstellung des Bauwerks. Daher sollten in jedem Fall folgende generelle Maßnahmen angewendet werden.

Lange Lebensdauer

Grundsätzlich sollte eine möglichst lange Lebensdauer von Brückenbauwerken angestrebt werden. Durch den hohen Anteil, den die Baustoffe an der Gesamt-CO₂-Emission aufweisen, fließt die Lebensdauer bzw. die Umlegung der CO₂-Emission auf diese fast linear in die CO₂-Bilanz ein. So reduziert sich der CO₂-Anteil einer durchschnittlichen 30 m langen Straßenbrücke als Beispiel von ca. 15 kgCO₂/(m²·a) auf 8,5 kgCO₂/(m²·a) fast um die Hälfte, wenn die Lebensdauer von 80 Jahren auf 160 Jahre gesteigert wird.

Daher sollte folgendes beachtet werden:

- Bei Bestandsbrücke: Ertüchtigung statt Ersatzneubau
 - Bei maroden Brückenbauwerken sollten im Zuge der Diskussion Ertüchtigung oder 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 zu einem längeren Zeitraum zu entsprechenden Stausituationen führt. Dieses lässt sich anhand einer CO₂-Bilanz untersuchen.
 - Wenn möglich sollte jedoch untersucht werden, ob ggf. auf einen bautechnischen Eingriff, durch intelligente Berechnungsverfahren, die in der Stufe 4 der Nachrechnungsrichtlinie für Brückenbauwerke zugelassen sind, ggf. in Verbindung mit einem Bauwerksmonitoring vollständig verzichtet werden kann.
- Verlängerung der Lebensdauer
 - Grundsätzlich sollten neue Brücken für eine möglichst lange Lebensdauer bemessen werden. Durch eine Anhebung der Lebensdauer von 100 Jahre auf 150 Jahre kann der jährliche CO₂-Bedarf eines Bauwerks wegen den geringen CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase fast linear um 1/3 reduziert werden. Bei Betonbrücken hat dieses im Regelfall allenfalls eine etwas größere Betondeckung zur Folge; dieses muss die Bauteilabmessungen nicht zwingend tangieren, die Bewehrung rutscht ggf. geringfügig weiter nach Innen. Die Zunahme der Lastwechsel sollten bei Beton- bzw. Verbundbrücken ebenfalls nicht zu geänderten Querschnittsabmessungen führen, Stahlbrücken kommen bis 40 m Länge tendenziell vornehmlich bei Fuß- und Radwegbrücken zur Anwendung, wo die Ermüdung keine Rolle spielt.
 - Grundsätzlich sollten alle Vorschriften, die auf eine lange Lebensdauer abzielen (für Betonbauteile: ausreichende Betondeckung, Mindestbetonfestigkeit, ausreichende Mindestbewehrung bzw. Rissbreitenbewehrung; bei Stahlbrücken: ausreichender Korrosionsschutz), penibel berücksichtigt werden.

Minimierung des staubedingten CO₂-Anteils durch schnellen Baufortschritt

Gerade bei dichtbefahrenen Strecken kann der CO₂-Anteil aus baubedingten Stausituationen resultiert, höher sein als die CO₂-Emissionen aus der Herstellung des Bauwerks. Daher gilt

es – vor allem bei dichtbefahrenen Bundesstraßen bzw. Autobahnen mit Verkehrsstärken von 20.000 Kfz/24h und mehr – den Eingriff in den Straßenverkehr auf ein Minimum zu reduzieren. Hierzu können vielfach die Bauverfahren bzw. Überlegungen, die im Bereich von Brücken über Bahnstecken angewendet werden, auf Brücken im Zuge von Straßen übertragen werden; auch bei Bahnstrecken sind die Eingriffszeiten im Regelfall auf kurze Zeitfenster in nächtlichen Sperrpausen begrenzt.



Bild 6.1 Brücke über eine Autobahn
 oben: Zweifeldsystem mit Mittelstützen, großer Nachteil z.B. bei erforderlichen Instandsetzungen des Mittelpfeilers
 unten: stützenfreie Lösung über eine integrale Bauweise

Für Bauverfahren mit reduziertem Eingriff in den Straßenverkehr im Folgenden einige Vorschläge:

- Bauverfahren so konzipieren, dass zumindest ein selbsttragender Teil des Überbaus (Längsträger bei Spannbeton- bzw. Verbundbrücke) außerhalb des Straßenbereichs hergestellt wird und z. B. zu Nachtzeiten mit geringem Verkehr eingehoben werden kann. Ggf. kann auch bereits eine verlorene Schalung der Betonkappe integriert werden (siehe [35]) so dass auch der spätere Eingriff für das Ein- und Ausheben des Kappengerüsts entfällt.
- Herstellung des Widerlagers in Halbfertigteildebauweise. Durch die reduzierten Schal- und Bewehrungsarbeiten auf der Baustelle kann der Eingriff in den Straßenverkehr und damit die CO₂-Emission aus baustellenbedingtem CO₂ reduziert werden.
- Im Falle eines Zweifeldsystems mit Mittelpfeiler: sofern statisch möglich: Verzicht auf den Mittelpfeiler durch Einspannung in die Widerlager als integrale Brücke. Die durchgeführten Berechnungen in Kapitel 4.6.2 zeigen, dass sich die integrale Bauweise in etwa CO₂-neutral im Vergleich zu dem Zweifeldsystem verhält. Der Vorteil ist allerdings, dass sich durch den Wegfall der Mittelstütze die staubedingten CO₂-Anteile reduzieren; dieses gilt

sowohl für die Erstellungsphase (bzw. Rückbau am Ende der Lebensdauer) des Mittelpfeilers aber auch für die Nutzungsphase, da der etwaige Mittelpfeiler im Zuge von Bauwerksprüfungen handnah begutachtet werden muss bzw. auch ein typischer Angriffspunkt für Tausalzeintrag mit entsprechender Instandsetzungserfordernis ist; sowohl die Bauwerksprüfung als auch etwaige Instandsetzungen ziehen CO₂-Emissionen infolge Stausituationen nach sich.

Durch die o. g. Maßnahmen sollten sich der Anteil aus dem bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigungen gegenüber einer klassischen Herstellung im, mit halbseitiger Sperrung und 4+0-Verkehrsführung, um mindestens 60% reduzieren lassen. Weitere Einsparungen ergeben sich durch den Wegfall des Mittelpfeilers.

6.2.3 Wahl des Bauwerktyps

Da im Rahmen des Projektes landestypische Brückenbauwerke mit einer Spannweite von bis zu 40 m untersucht wurden, ist die Variationsmöglichkeit hinsichtlich des generellen Bauwerktyps gering. Im Regelfall handelt es sich um eine Balkenbrücke (ggf. bei kurzer Spannweite alternativ um eine Plattenbrücke), die auf zwei Widerlagern gelagert ist, bei großer Spannweite ggf. eine ergänzende Mittelstütze. Im Folgenden einige Hinweise, die teilweise einige Überschneidungen mit denen der Folgeabschnitte aufweisen:

- **Generell**
 - Sofern es von den geometrischen Abmessungen möglich ist, wird im Regelfall bei einem Wellstahldurchlass deutlich weniger CO₂ emittiert als bei konventionellen Balkenbrücken; dieses ist in den geringen Mengen an industriell hergestellten Baustoffen begründet (siehe Abschnitt 4.6.5).
 - Wenn durch den Brückenneubau der Verkehrsfluss behindert wird, ist bei hohen Verkehrsstärken (ab ca. 20.000 KFz/Tag) der Bauablauf im Hinblick auf die Vermeidung von Stausituationen zu optimieren. Dieses schließt auch spätere Eingriffe aus dem Erhaltungszeitraum mit ein, wie z.B. Bauwerksprüfungen oder etwaige Instandsetzungsarbeiten, die ebenfalls Stausituationen verursachen können. Hier sollte (auch bei größeren Spannweiten) möglichst auf Bauteile innerhalb des Verkehrsraums, wie z.B. einen Mittelpfeiler verzichtet werden (siehe Abschnitt 6.2.2).
- **Fuß- und Radwegbrücken**
 - Neben einem Wellstahlrohrdurchlass scheinen hier Brücken in Holzbauweise am CO₂-neutralsten zu sein. Wichtig ist jedoch durch einen ausreichenden konstruktiven Holzschutz eine möglichst lange Lebensdauer von mindestens 40 Jahren zu erzielen. Ebenso können durchaus auch innovative Bauweisen wie z.B. Textilbeton oder Naturstein im Hinblick auf die CO₂-Bilanz eine sinnvolle Alternative sein (siehe auch Abschnitt 6.2.5).

6.2.4 Ausbildung der Widerlager

Gerade bei geringer Bauwerkslänge resultiert ein Großteil der CO₂-Emission aus der Herstellung der Brückenwiderlagern, die im Regelfall in massiver Stahlbetonbauweise ausgebildet sind.

Zur Reduzierung der CO₂-Bilanz im Folgenden einige Vorschläge:

A) Alternative Bauweise:

Grundsätzlich sollte versucht werden, ob ggf. eine alternative Bauweise technisch möglich ist, durch die sich der CO₂-Bedarf ggf. senken lässt. Hierzu folgende Möglichkeiten:

a) Bewehrte 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 [42], [43] und [44], bei den neueren in Deutschland realisierten Projekten wurde hierbei allerdings das Bodenmaterial durch ein Zement-Kalk-Bindemittel „Dorosol“ ergänzend stabilisiert. Im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung konnte gezeigt werden, dass sich durch diese Bauweise gerade bei schmaleren Brücken mit Breiten zwischen 6,0 m und 8,5 m etwa 20% CO₂ einsparen lässt. Bei größerer Breite reduziert sich der Effekt zunehmend.

Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz besteht deutliches Einsparpotential, wenn ggf. auch in Deutschland auf die Stabilisierung verzichtet oder diese zumindest im Hinblick auf die CO₂-Bilanz optimiert werden kann. Hierbei ist die Setzung sorgsam zu untersuchen.

b) Sonderfall: leichte Fuß- und Radwegbrücke mit Spannweite bis ca. 20 m

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) als Gabionenwand realisieren. Die Gabionenwand sollte am Kopf durch den Überbau horizontal gelagert werden 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 - 3 cm tolerabel sind.

Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich die CO₂-Werte eines Stahlbetonwiderlagers, mit Werten im Bereich von 1,6 tCO₂/m² Ansichtsfläche, auf ca. 0,4 tCO₂/m² reduzieren lassen. Selbst wenn die Lebensdauer in Abhängigkeit der Verzinkung der Gabionen lediglich im Bereich von 40 - 50 Jahren liegt, wäre dieses eine CO₂-Einsparung von 75%.

c) Sonderfall: Brücke mit geringem frei zu haltendem Lichtraumprofil (z. B. über Bach)

Im Falle einer Brücke, bei der unterhalb kein großes Lichtraumprofil zu unterführen ist, wie z.B. bei der Überquerung eines Bachs, ist es technisch durchaus möglich, ein Widerlager auch aus Naturstein zu realisieren. Die CO₂-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/mm² erzielen. In der Region sind eher Sandstein oder Kalkstein realistischer, auch hiermit lassen sich Festigkeiten von bis zu 70 N/mm² erreichen; zur Vermeidung von Spannungsspitzen muss ggf. eine umlaufende bewehrte Betonschale betoniert werden. Bei rein druckbeanspruchten Konstruktionen mit lichten Höhen im Bereich von 1,0 - 1,50 m scheint eine Anwendung realisierbar, der CO₂-Bedarf dürfte sich (trotz dünner Stahlbetonschale) etwa halbieren.

B) Optimierung der Stahlbetonkonstruktion

Wenn das Widerlager dennoch als Stahlbetonkonstruktion ausgeführt wird, sollte im Hinblick auf die CO₂-Bilanz versucht werden, die Betonabmessungen zu minimieren. Nach Vergleichsrechnungen können bei Widerlagerabmessungen (mit Wanddicken im Bereich von 1,5 - 2,0 m bzw. 0,80 m im Bereich der Flügelwände) durchaus 15 - 20 % der Betonmengen eingespart werden, ohne dass die Standsicherheit gefährdet wäre bzw. die Betonstahlmenge überproportional anwächst.

Ebenso wird aktuell die Rückseite des Widerlagers vielfach mit der Kammerwand bündig ausgebildet, was sicherlich bautechnisch einfacher umsetzbar ist; im Hinblick auf die Betonmengen bzw. die CO₂-Bilanz wäre es allerdings zielführender das Widerlager lediglich in der unmittelbar erforderlichen Soll-Geometrie auszuführen, auch wenn dieses einen Versprung an der Rückseite nach sich zieht.

Aufgrund des hohen Anteils, den das Widerlager an der gesamten CO₂-Emission des Brückenbauwerks hat, zieht eine Reduzierung der Betonmengen des Widerlagers um 20% eine Reduzierung des Gesamt-CO₂-Bedarfs der Brücke um ca. 10% nach sich. Eine weitere Reduzierung lässt sich durch eine CO₂-Optimierung des Betons erzielen (siehe Abschnitt 6.2.7).

6.2.5 Überbauten

a) Straßenbrücke

Gemäß den durchgeführten Untersuchungen liegt der CO₂-Bedarf für Überbauten in Stahl- und Betonbauweise im Bereich von ca. 375 kg/m² 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 Straßenbrücke statisch (bzw. zur Sicherstellung des konstruktiven Holzschutzes) eine entsprechende Stahlbetonplatte erforderlich, so dass die CO₂-Einsparungen im Bereich von maximal 15% liegen. Unter der Annahme einer verminderten Lebensdauer kann die Holz-Beton-Verbundbrücke sogar höhere CO₂-Aufwendungen nach sich ziehen.

Daher wird bezüglich Optimierungen im Hinblick auf die CO₂-Bilanz eher auf die Folgekapitel verwiesen.

b) Fuß- und Radwegbrücken

Aufgrund der geringeren Verkehrslasten ist bei Fuß- und Radwegbrücken ein deutlich größerer Gestaltungsspielraum möglich als bei Straßenbrücken. Diese öffnet Möglichkeiten, die Brückenüberbau in innovative Bauweisen zu erstellen, deren CO₂-Anteil die mittleren Werte von ca. 190 kg/m² deutlich unterschreitet. Hierzu folgende Möglichkeiten:

- Sofern sich durch einen ausreichenden konstruktiven Holzschutz eine Lebensdauer von zumindest 40 Jahren sicherstellen lässt, lassen sich Fuß- und Radwegbrücken in Holzbauweise mit sehr geringer CO₂-Emission realisieren; gemäß den hier vorgestellten Untersuchungen lässt sich die CO₂-Emission bei einer Lebensdauer zwischen 40 und 60 Jahren um etwa 45% - 60% reduzieren. Voraussetzung ist allerdings, dass das Holz – sofern die Lebensdauer der Holzkonstruktion unterhalb der Hiebreife eines Baumes, von ca. 80 Jahren, liegt – im Sinne einer Kaskadennutzung weiter eingesetzt wird.
- Im Vergleich klassischer Beton- und Stahlbauweisen ziehen möglichst materialoptimierte Bauweisen die geringsten CO₂-Emissionen nach sich. Hier sind Varianten bestehend aus Längs- und Querträgern mit Holzbohlenbelag statt Deckblech die CO₂-reduzierteste Konstruktion, wenn gleich 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, die CO₂-Bilanz zu reduzieren. Im Folgenden einige Möglichkeiten:

- Brücke aus Brettschichtholz-Trägern, bei der die Quertragwirkung und der konstruktive Holzschutz durch eine filigrane Betonplatte mit Basaltfaserbewehrung sichergestellt ist. Gemäß eigenen Berechnungen liegt der CO₂-Bedarf hier bei etwa 80 kgCO₂/m² Brückenfläche.
- Eine alternative unkonventionelle Bauweise ist auch die Bauweise aus vorgespannten Natursteinblöcken. In Paderborn konnte hiermit eine Brücke mit einer Spannweite von über 18 m realisiert werden. Sofern die Transportwege nicht zu groß werden, ist für den Überbau ein CO₂-Bedarf im Bereich 100 - 110 kgCO₂/m² Brückenfläche zu erwarten.
- Ebenso können unter CO₂-Aspekten materialoptimierte Fuß- und Radwegbrücken aus Textilbeton eine geeignete Alternative sein. Aufgrund der besseren CO₂-Bilanz sollte hierbei überprüft werden, ob gegenüber der aktuell sehr verbreiteten Carbonbewehrung ggf. eine Basaltbewehrung eine technisch und ökologisch sinnvolle Alternative sein kann.

6.2.6 Ausstattung

Straßenbrücken

- Die Ausstattung sollte möglichst wartungsarm sein.
- Bei Brückenkappen kann beispielsweise eine nichtmetallische Bewehrung die Lebensdauer erhöhen. Untersuchungen hierzu finden aktuell in [58] statt.; der CO₂-Anteil der Brückenkappen beträgt ca. 30 - 35% an der gesamten Ausstattung.

Fuß- und Radwegbrücken

Bei Fuß- und Radwegbrücken nimmt die Ausstattung einen deutlich höheren Anteil an der CO₂-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 vor allem die Kunststoffbeläge wie ein GFK-Bohlenbelag oder ein RHD-Belag (Reaktionsharzgebundener Dünnbettbelag) sehr hohe CO₂-Aufwendungen auf, die fast im Bereich der Tragkonstruktion liegen. Diese sollten im Hinblick auf die CO₂-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.

6.2.7 Optimierung der Baustoffe

In den vorgenannten Abschnitten sind Maßnahmen aufgezeigt worden, den CO₂-Verbrauch durch alternative Konstruktionsprinzipien zu reduzieren. In einigen Fällen werden daher zukünftig Konstruktionen, die bislang in Stahlbeton erstellt wurden, in alternativer Bauweisen errichtet werden. Dennoch werden im Brückenbau die Baustoffe Stahl und Beton die Hauptbaustoffe bleiben. Da beide sehr CO₂-intensiv sind, im Folgenden nochmal Maßnahmen zusammengestellt, diese zu optimieren.

Beton

Der CO₂-Anteil von Beton lässt sich vor allem durch die Reduzierung des Portlandzementklinkers optimieren. Neben einigen Maßnahmen, die in Abschnitt 5.4.2 beschrieben worden

sind, ist vor allem der Einsatz von Hüttensandzement am effektivsten. Aktuell ist in Deutschland der Zement CEM II/A mit einem Hüttensandanteil von ca. 6 - 20% am verbreitetsten. Durch Verwendung eines CEM III/A mit einem Hüttensandanteil von 36 - 65% lässt sich der CO₂-Anteil nochmals um 30% reduzieren.

Hingewiesen sei allerdings darauf, dass die Vorkommen an Hüttensand, als Abfallprodukt der Stahlherstellung im Hochofen, endlich sind und sich mittelfristig durch die Reduzierung des Stahlanteils, der über den Hochofenprozess gewonnen wird, reduzieren wird. Hier müssen alternative Lösungsmöglichkeiten gefunden werden.

Stahl

Die CO₂-Emissionen von Stahl können erheblich reduziert werden, wenn dieser nicht im Hochofen produziert wird, sondern mittels Recyclingstahl und Eisenschwamm durch das Elektrolichtbogen-Verfahren (siehe Abschnitt 5.4.3). Hierbei wird sehr viel Strom benötigt, der jedoch zur Reduzierung des CO₂-Bedarfs möglichst regenerativ erzeugt werden kann.

Ein beispielhaftes Produkt dafür sind die „XCarb-recycelt und erneuerbar hergestellten“-Stähle von ArcelorMittal, die gemäß Herstellerangaben (Stand 2021) mit 100% recyceltem Material (Stahlschrott) und erneuerbarem Strom produziert werden. Dadurch werden in der Herstellungsphase statt der üblichen 1 125 kgCO₂ pro Tonne Stahl (siehe [17]) nur etwa 330 kgCO₂ emittiert. Über alle Phasen hinweg beträgt die CO₂-Bilanz einer Tonne XCarb-Stahl lediglich 550 kgCO₂.

Auch die Verwendung von Stahl mit hoher Festigkeit (wie zum Beispiel S460, S690 und S960) kann zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen führen. Aufgrund der höheren Festigkeit des Stahls ist weniger Material erforderlich, um die gleiche Tragfähigkeit zu erreichen, was wiederum zu geringeren CO₂-Emissionen führt. Beispielweise wird bei einer Stahlverbundkonstruktion die Stahltonnage von 250 kg/m² für S355 auf 150 kg/m² für S460 verringert. Voraussetzung ist jedoch, dass die Durchbiegung nicht zu groß wird, weil der materialoptimierte Querschnitt sich natürlich deutlicher verformt.

Gemäß Vergleichsrechnungen kann der CO₂-Bedarf von Stahlüberbauten durch den Einsatz von CO₂-reduzierten Stahlprodukten mit hoher Streckgrenze von etwa 440 kg/m² (vgl. Kennwerte im Bild 4.17) auf ca. 180 kg/m² gesenkt werden und im Fall einer Stahlverbundbrücke von 400 kg/m² auf ca. 285 kg/m².

6.2.8 Kompensationsmaßnahmen durch Photovoltaik

Durch Integration von Photovoltaik-Elementen lässt sich ein Teil des CO₂-Bedarfs kompensieren. Die in Abschnitt 5.5 durchgeführten Vergleichsrechnungen zeigen, dass sich sowohl im Falle einer seitlich unter 30° geneigten aufgeständerten Konstruktion, als auch bei einer Integration ins Gelände signifikante CO₂-Einsparungen von jährlich ca. 120 - 150 kg/(m Brückenlänge · Jahr) erzielen lassen. Wenn der Strom mittelfristig überwiegend regenerativ erzeugt wird, reduziert sich der Anteil auf ca. 10 - 20 kgCO₂/(m Brückenlänge · Jahr).

Unter der Randbedingung, dass eine Fuß- und Radwegbrücke ca. 700 kg/m², also zwischen 2 100 – 4 550 kgCO₂/m bzw. 20 - 45 kgCO₂/(m·a), und eine Straßenbrücke ca. 1 400 kgCO₂/m², also zwischen 17 000 - 44 800 kgCO₂/m bzw. 170 - 450 kgCO₂/(m·a), emittiert, sind die Kompensationsanteile durchaus beträchtlich. Dieses sollte zukünftig in einem stärkeren Maße berücksichtigt werden.

6.2.9 Zusammenfassende Kurzübersicht

Im Anhang [E] sind die identifizierten CO₂-Einsparmaßnahmen nochmals in Form einer Checkliste zusammengestellt. Hier werden die Gründung bzw. verschiedene Überbauvarianten zeilenweise aufgeführt, der CO₂-Bedarf für die Standardlösung abgeschätzt und Optionen für CO₂-Einsparungen vorgeschlagen, die ggf. im Einzelfall sinnvoll sein können, im anderen Fall ggf. aber auch keine sinnvolle Lösung sind. Bild 6.2 zeigt das Grundprinzip der Darstellung in Anhang [E].

CHECKLISTE

1	2	3	4	5	6	7
Bauwerk: Straßenbrücke Spannweite von 4 m bis 40 m						
Gründung - Unterbauten						
Status-Quo (Regelfall) Art / Bauteil	Beton	Bewehrung kg/m³	kgCO ₂ /m³ bewehrter Beton	Dicke / Durchmesser (D) m		Hinweis
						Optimierungsmöglichkeit
Fachgründung	C30/37	120	295			Vorschlag
Tiefgründung - Stb.-Pfeiler	C30/37	100	280	D 0,8 m		a) Verwendung von Hochofenzement CEM III/A
Tiefgründung - Pfahlkopfplatte	C30/37	150	320			b) Massenmäßige Optimierung
						CO ₂ - Einsparpo- tential %
						Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
Widerlagewand	C30/37	130	305	1,0 - 1,5		
Flügelwand	C30/37	120	295	0,8		c) Spundwandwiderlager anstatt Stahlbetonwiderlager mit Tiefgründung
Pfeiler (2-feldiger DLT)	C30/37	120	295	1,2		d) Ersatz der Stahlbetonkonstruktion durch ein Widerlager aus bewehrter Erde
						20 - 30%
						Im Bauablauf sind eine etwas längere Nachbehandlungsdauer bzw. eine etwas verzögerte Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen.
						Massen auf die tatsächlich statisch erforderliche Soll-Geometrie zu begrenzen: z.B. Widerlagewand mit üblichen Dicken von 1,5 - 2,0 m auf Werte um ca. 1,20 m zu reduzieren; Versprünge an der Rückseite des Widerlagers unter der Kammerwand auszubilden.
						Einsetz bei geringen erforderlichen Einbindetiefen der Tiefgründung bis 10 m. Bei größeren Einbindetiefen ist ein Stahlbetonwiderlager mit Pfahlgründung in Bezug auf die CO ₂ -Bilanz günstiger.
						Erdkörper mit Geogitter bewehrt, Lagenabstand etwa 40 - 50 cm. Füllmaterialien bestehen aus Sand, Kiessand und einem Spezialbindemittel aus Zement und Kalk (Dorosol), Menge des Dorosol beträgt etwa 3 - 4 M-% des Erdkörpers. Einsetz bei Brücken mit einer Breite bis ca. 8,5 m. Bei größeren Breiten weist die Stahlbeton-Lösung eine günstigere CO ₂ -Bilanz auf.
Überbauten - Tragkonstruktion						
Status-Quo (Regelfall)						Optimierungsmöglichkeit
Spannweiten-Quo (Regelfall)						Vorschlag
	Beton	Bewehrung kg/m³	kgCO ₂ /m³ bewehrter Beton	Konstruktionsh öhe m	kgCO ₂ /m² Brückentfl. 100a	CO ₂ - Einsparpo- tential %
						Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
	C35/45	150	380	1,0	330	
		30	30			a) Einsatz von Wellstahldurchlass für die Überquerung kleiner Hindernisse wie Bäche
						25 - 30%
						Wellstahlöffnung für den Fall einer Überquerung bis zu etwa 6,0 m. Nutzungsdauer des Wellstahlrohres gemäß ABBV beträgt 70 Jahre.
Stahlbeton Plattenbalken - Spannweite bis 20 m bzw. 2-feldiger DLT bis 40 m						
	Beton	Bewehrung kg/m³	kgCO ₂ /m³ bewehrter Beton	Konstruktionsh öhe m	kgCO ₂ /m² Brückentfl. 100a	
	C35/45	220	395	1,2 - 1,3	380	

Bild 6.2 Auszug aus der erstellten Checkliste; linke Seite: Werte von Status-Quo; rechte Seite: Vorschläge für die Optimierung

In Tabelle 6.2 ist abschließend zusammengestellt, wie groß der Einfluss der jeweiligen Maßnahme ist, um abzuschätzen welche CO₂-Einsparungen in etwas erwartbar sind, sofern CO₂-Bilanzierungen / Optimierungen zukünftig stärker in Planungen berücksichtigt werden. Hierbei ist in Spalte (2) ein theoretischer Maximalwert an Einsparung angegeben, der in Einzelfällen zutreffen kann. In Spalte (3) ist ein mittleres Einsparpotential aufgeführt, welches für eine größere Anzahl an Bauwerken als realistisch angesehen wird. Diese mittleren Einsparpotentiale sind mit dem jeweiligen Anteil der Gesamt-CO₂-Bilanz (Spalte (4)) multipliziert worden, so dass hieraus eine realistische CO₂-Einsparung für die CO₂-Emission von Brückenbauwerken abgeschätzt werden kann.

Tabelle 6.2 Abschätzung des realistischen CO₂-Einsparpotentials, wenn CO₂-Optimierungen in Brückenplanungen entsprechend berücksichtigt werden

Bauteil / Maßnahme	Einsparung [%] bei Einzelmaßnahme		Anteil an Ge- samt-CO ₂ -Emmi- sion [%]	Realistische CO ₂ -Einsparung auf Bauwerks- ebene [%]
	Maximalwert [%]	Realistischer Mittewert [%]		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Lebensdauer	50%	0% (hier nicht in An- satz gebracht)	100%	0%
Bauwerkstyp	50%	< 3%	100%	0%
Unterbauten	75%	20%	50%	10%
Überbau	55%	< 3%	50%	0%
Ausstattung	90%			

Baustoffe Stahl und Beton	30%	20%	85%	17%
Photovoltaik	100%	10%	100%	10%
Gesamt: $1 - 1/(\Pi(1 + f_i))$				30%

In Summe ergibt sich ein realistisches Einsparpotential von etwa 30%. Grundvoraussetzung ist jedoch, dass derartige CO₂-Betrachtungen in der Praxis Einzug finden und von Bauherren als besondere Leistung entsprechend vergütet werden.

7. Zusammenfassung

Durch Bauprozesse werden ein Großteil der zur Verfügung stehenden Ressourcen verbraucht und immense Mengen an CO₂ ausgestoßen. Neuere Erkenntnisse gehen davon aus, dass über 50% der CO₂-Emissionen auf die Herstellung und Nutzung von Gebäuden bzw. Bauwerken zurückzuführen sind [1], [2] und hiervon ca. 1/3 Ingenieurbauwerken bzw. Infrastrukturmaßnahmen zuzurechnen ist [2]; bei Ingenieurbauten von Infrastrukturmaßnahmen sind hierbei vor allem auch Brückenbauwerke zu nennen.

Trotz diesem Umstand fehlen gerade im Ingenieurbau / Brückenbau sowohl auf Seiten der Bauherrn und Betreiber als auch auf Seiten von Planungsbüros bzw. Bauausführenden Kenntnisse oder auch Berechnungsmethoden, wieviel CO₂ für die Erstellung und die Unterhaltung eines Brückenbauwerks erforderlich ist, daher spielen CO₂-Bilanzierungen bzw. Optimierungen/Reduzierungen in der Planung und Bauausführung bislang keine Rolle.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens sollte für typische Brückenbauwerke, wie sie zukünftig in Schleswig-Holstein erstellt werden:

1. durch umfassende CO₂-Bilanzen ein Überblick bzw. Transparenz und Erfahrungswerte über den CO₂-Verbrauch typischer Brückenkonstruktionen geschaffen werden,
2. basierend auf den CO₂-Bilanzen, die wesentlichen Einflussfaktoren des CO₂-Bedarfs ermittelt werden,
3. konkrete Maßnahmen ausgearbeitet werden, wie der CO₂-Bedarf eines Brückenbauwerks reduziert werden kann,
4. Die Ergebnisse in übersichtlicher Form für die praktische Anwendung aufbereitet werden.

Insgesamt wurden hierzu 480 CO₂-Berechnungen an landestypischen Brückenbauwerken durchgeführt. Die hieran gewonnenen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Bestandsanalyse:

- (1) Aktuell werden für eine Straßenbrücke i.M. ca. 1,2 - 1,4 tCO₂/m² Brückenfläche verbraucht. Bei Fuß- und Radwegbrücken liegen die Werte i.M. bei ca. 0,7 - 1,5 tCO₂/m² Brückenfläche, wobei die Streuungen wegen der größeren Anzahl an Variationsmöglichkeiten bei Fuß- und Radwegbrücken höher sind. Aufgrund des hohen CO₂-Bedarfs, der für die Widerlager an den Brückenenden verbraucht wird, nimmt der CO₂-Bedarf je m² Brückenfläche mit abnehmender Bauwerkslänge zu.
- (2) Der wesentliche CO₂-Anteil ist mit ca. 85% in der Erstellung der Baustoffe enthalten, wobei Beton und Stahl die Hauptbaustoffe sind. Allein der bewehrte Beton ist für ca. 65% des CO₂-Bedarfs verantwortlich.
- (3) Basierend auf den durchgeführten CO₂-Bilanzierungen wurden Übersichtsformeln für eine Ermittlung des CO₂-Bedarfs in den Leistungsphasen 0 (noch keine Planung vorhanden) und 2 (Abschluss der Vorplanung) abgeleitet. Hierdurch wird der Bauherr in die Lage versetzt, auch ohne Planung den CO₂-Bedarf für das Brückenbauwerk abzuschätzen zu können und somit in eine Gesamt-CO₂-Bewertung einfließen zu lassen.
- (4) Gerade bei dichtbefahrenen Straßen ist allerdings der CO₂-Anteil, der aus bauzeitlichen Verkehrsbeeinträchtigung resultiert, durchaus von Relevanz. Gerade bei hohen Ver-

kehrsstärken oberhalb von ca. 20.000 Kfz/24 h kann der CO₂-Anteil aus den bauzeitlichen Stausituationen oberhalb des CO₂-Anteils liegen, der durch das Bauwerk selbst verbraucht wird.

Optimierungen:

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen wurden folgende Vorschläge ausgearbeitet, die CO₂-Emission von Brückenbauwerken zu reduzieren. Zusammenfassend lassen sich diese wie folgt darstellen:

- (1) Grundsätzlich ist eine möglichst lange Lebensdauer anzustreben. Neubauwerke sollten, wenn möglich auf eine deutlich längere Lebensdauer als 100 Jahre ausgelegt werden, bei instand zu setzenden Bestandsbauwerken, sollten intelligenten Ertüchtigungen, gegenüber einem Ersatzneubau, der Vorzug gegeben werden.
- (2) Bei erforderlichen Brückenbaumaßnahmen im Zuge von dichtbefahrenen Straßen sollte als eine der Hauptpriorität der Bauablauf soweit optimiert werden, dass ein möglichst geringer Eingriff in den Straßenverkehr erforderlich ist. Hier sollten Bauweisen zur Anwendung kommen, die beispielsweise aus der Errichtung von Brücken über Bahnstrecken bekannt sind, wo im Regelfall vorgefertigte Bauteile in kurzen nächtlichen Sperrpausen eingehoben werden.
- (3) Der CO₂-Bedarf des Bauwerks lässt sich vor allem im Bereich der Widerlager reduzieren. Einerseits weisen viele Bestandsbauwerke Einsparpotential im Bereich der Betonmassen auf. Alternativ sollten auch anderen Widerlagertypen in Betracht gezogen werden, wie beispielsweise Konstruktionen aus bewehrter Erde oder in Sonderfällen auch Lösungen aus Gabionenwänden (Fuß- und Radwegbrücke bis ca. 25 m Brückenlänge) bzw. Naturstein (bei geringe Widerlagerhöhe).
- (4) Im Bereich des Überbaus scheinen für Straßenbrücken konventionelle Bauweisen in Stahlbeton- bzw. Stahlbauweise alternativlos. Bei Fuß- und Radwegbrücken lassen sich durch Holzbrücken deutlich geringere CO₂-Emissionen erzielen, solange eine Mindest-Lebensdauer von 40 Jahren sichergestellt ist. Voraussetzung ist auch, dass das Holz (im Falle eines Rückbaus unterhalb der Hiebreeife eines Baumes von ca. 80 Jahren) im Sinne einer Kaskadennutzung weiter genutzt wird. Im Bereich des Brückenbelages sollen möglichst Kunststoffbelege wie GFK-Bohlen oder ein RHD-Belag vermieden werden. Im Hinblick auf die CO₂-Bilanz werden idealerweise entweder ein Asphaltbelag oder ein Holzbohlenbelag verwendet.
- (5) Nachdem die Bauweisen festgelegt worden sind, sollten die Baustoffe optimiert werden. Im Falle von Beton sollte vor allem der Portlandzementklinker anteilig z.B. durch Hütensand ersetzt werden, hierbei kann gegenüber konventionellem Beton ca. 25 - 30% CO₂ eingespart werden. Bei Stahlbauteilen sind Einsparungen in mindestens der gleichen Größenordnung möglich, wenn CO₂-optimierter Stahl verwendet wird, der z.B. im Elektro-Lichtbogen-Verfahren in Verbindung mit einer regenerativen Stromerzeugung hergestellt wird. Hier können beispielsweise seitens Planer bzw. Bauherrn Vorgaben in der Ausschreibung gemacht werden.
- (6) Ebenso kann es durchaus sinnvoll sein, ein Brückenbauwerk mit Photovoltaik-Elementen auszustatten und durch die Stromerzeugung einen Teil der CO₂-Emission zu kompensieren.

Bei Anwendung bzw. auch Weiterentwicklung der o. g. Maßnahmen ist davon auszugehen, dass sich bei Brückenbauwerken mindestens 30% der CO₂-Emission einsparen lassen, in

Einzelfällen kann die CO₂-Einsparung auch deutlich höher ausfallen. Voraussetzung ist jedoch, dass derartige CO₂-Bilanzierungen / Optimierungen in der Praxis Einzug finden und von Bauherren als besondere Leistung entsprechend vergütet werden.

Kiel, den 15.09.2023

gez.

Prof. Dr.-Ing. Stephan Görtz

Thi Kim Dung Pham, M. Sc.

8. Literaturverzeichnis

- [1] S. Weidner, A. Mrzigod, R. Bechmann und W. Sobek, „Graue Emission im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, pp. 969-977, 2021.
- [2] W. Sobek, non nobis – über das Bauen der Zukunft, Bd. Band 1, Stuttgart: avedition, 2022.
- [3] S. Görtz, T. Pham und F.-L. Graage, „Graue“ CO₂-Emission typischer Wohngebäude,“ *Deutsches Ingenieurblatt*, März 2023.
- [4] RE-ING, *Richtlinien für den Entwurf, die konstruktive Ausbildung und Ausstattung von Ingenieurbauten*, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2022.
- [5] ZTV-ING, *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten*, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2022.
- [6] RiZ-ING, *Richtzeichnungen für Ingenieurbauten*, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2022.
- [7] U. Freundt, S. Böning, R. Maurer, A. Arnold, J. Gedwien, M. Müller, M. Schrick, C. Tappe, U. Kuhlmann, C. rasche, B. Froschmeier, M. Euler, G. Hanswille, A. Brauer und M. Bergmann, „Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Eurocodes,“ *Berichte der Bundesanstalt für Straßenbau*, Heft B 77, 2011.
- [8] K. Geißler, *Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung*, Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn, 2014.
- [9] E.-A. Kracke und K. Lodde, *Leitfaden Straßenbrücken. Entwurf, Baudurchführung, Erhaltung*, Berlin: Ernst & Sohn a Wiley Company (Bauingenieur-Praxis), 2011.
- [10] R. Geier, V. Angelmaier, C.-A. Graubner und J. Kohoutek, *Integrale Brücken. Entwurf, Berechnung, Ausführung, Monitoring*, Berlin: Ernst & Sohn a Wiley brand, 2017.
- [11] Informationsverein Holz e.V., „*Holzhandbuch - Entwurf von Holzbrücken*,“ 2019.
- [12] DIN EN ISO 14040, *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [13] DIN EN ISO 14044, *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [14] DIN EN 15978-1, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität*, Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [15] DIN EN 17472, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren*, Berlin: Beuth Verlag, 2020.

- [16] DIN EN 15804, *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, Berlin: Beuth Verlag, 2022.
- [17] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB), „ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen,“ [Online]. Available: <https://www.oekobaudat.de/>. [Zugriff am 2023].
- [18] Institut Bauen und Umwelt e.v., „EPD-Datenbanksystem des IBU,“ [Online]. Available: <https://epd-online.com/>. [Zugriff am 2022].
- [19] T. Mielecke, V. Kistner, C.-A. K. A. Graubner, O. Fischer und G. Schmidt-Thrö, „Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit,“ *Berichte der Bundesanstalt für Straßenbau*, Heft B 125, 2016.
- [20] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV, *RAL - Richtlinien für die Anlage von Landstraßen*, Hrsg. FGSV, 2012.
- [21] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV, *RAA - Richtlinien für die Anlage von Autobahnen*, Hrsg. FGSV, 2008.
- [22] ABBV, *Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - Ingenieurbauwerke - Brücken*, ISSN-Nr. 0466-2114, 2010.
- [23] Gerold, „Forschungsvorhaben - Ablösebeträge für moderne Holzbrücken, Richtzeichnungen/Typenentwürfe, Abschlussbericht Teil 1,“ Harrer Ingenieur, Karlsruhe, 2005.
- [24] Miebach Ingenieurbüro, [Online]. Available: <https://www.ibmiebach.de/de/ingenieurholzbau/lebensdauerbetrachtung/>. [Zugriff am 05 2023].
- [25] RAB-ING, *Richtlinien für das Aufstellen von Bauwerksentwürfen für Ingenieurbauten*, Bundesanstalt für Straßenwesen, 2022.
- [26] InformationsZentrum Beton GmbH, „Umwelt-Produktdeklaration - Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30,“ IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., Berlin, 2018.
- [27] T. Zinke, „Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken. Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte,“ *Dissertation Karlsruher Institut für Technologie*, 2016.
- [28] U. Kuhlmann, K. Lenz, S. Schneider, M. Fischer, S. Breunig, A. Pascual, P. Maier, T. Zinke, T. Ummenhofer, M. Pfaffinger, M. Mensinger und T. Beck, „Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundeisenbahnbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit,“ *Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.*, April 2019.
- [29] K.-J. Schneider, *Bautabellen für Ingenieur - mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, Hrsg. A. Albert: Bundesanzeiger, 2016.
- [30] G. Schmidt-Thrö, T. Mielecke, J. Jungwirth, C.-A. F. O. K. U. Graubner und G. Hauf, „Pilotstudie zum Bewertungsverfahren Nachhaltigkeit von Straßenbrücken im Lebenszyklus,“ *Berichte der Bundesanstalt für Straßenbau*, Heft B 131, Juni 2016.

- [31] dena, „dena-Leitstudie Integrierte Energiewende,“ Berlin, July 2018.
- [32] FutureCamp, DECHEMA, „Roadmap Chemie 2050,“ München, September 2019.
- [33] Fraunhofer, „Energiesystem Deutschland 2050,“ Freiburg, November 2013.
- [34] Agora, „Klimaneutrales Deutschland – Studie: In drei Schritten zu null Treibhausgasen bis 2050 über ein Zwischenziel von -65% im Jahr 2030 als Teil des EU-Green-Deals,“ Berlin, 2020.
- [35] T. Reddemann, *Brückenschnellbau – Konzepte, Randbedingungen und Beispiele*, Fachtagung „Brücken im Fokus 2022“ der Ingenieurakademie West, 09.12.2022.
- [36] M. Kords, *Anzahl der Personenkraftwagen in Deutschland nach Kraftstoffarten von 2017 bis 2022*, S. GmbH, Hrsg., 8. März 2022.
- [37] A. & N. H. Fitschen, „Verkehrsentwicklung auf Bundesstraßen 2017,“ *Verkehrstechnik Heft V 340*. (B. f. Straßenwesen, Hrsg.), Bergisch Gladbach, 2021.
- [38] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV, „Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS),“ Köln, 2012.
- [39] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV, „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS),“ FGSV Verlag, Köln, 1997.
- [40] H. Hangen und J. E. Jaramillo Castro, „Langzeitverhalten von geokunststoffbewehrten Stützkonstruktionen - zukünftig eine Standardbauweise auch für Brückenwiderlager?,“ *26. Dresdner Brückenbausymposium*, 14./15. März 2016.
- [41] A. Herold, „Ergebnisse aus 20 Jahren Verformungsbeobachtung an KBE-Stützbauwerken,“ in *Präsentation zum 11. Sachs. Bautextilien-Symposium BAUTEX 2014*, STFI e.V., Chemnitz, 1/2014.
- [42] HUESKER Synthetic GmbH, *Pilotprojekt Stokkumer Straße - Ersatzneubau der Brücke Stokkumer Straße über die A 3 bei Emmerich*, 2019.
- [43] HUESKER Synthetic GmbH, *Projekt Ersatzneubau im Zuge der L182 über den Swistbach bei Heimerzheim*, 2021.
- [44] HUESKER Synthetic GmbH, *Projekt Ersatzneubau der Erftbrücke im Zuge der B56 in Euskirchen*, 2022.
- [45] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau, FGSV, „Merkblatt über Stütz- und Lärmschutzkonstruktionen aus Betonelementen, Blockschichtungen oder Gabionen,“ Hrsg. FGSV, 2014.
- [46] Miebach Ingenieurbüro, *Projekt Neubau der Brücke über die Kinzig i. Z. der K 5357 zwischen Fischerbach und Haslach i. K.*, 2021.
- [47] RWTH-Aachen und Firma solidian, „Projekt Fußgängerbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen 2015,“ [Online]. Available: <https://www.imb.rwth->

- aachen.de/forschung/abgeschlossene-projekte/27-stahlfreie-fussgaengerbruecke.
[Zugriff am 2023].
- [48] J. Bielak, N. Will und J. Hegger, „Zwei Praxisbeispiele zur Querkrafttragfähigkeit von Brückenplatten aus Textilbeton,“ *Bautechnik 97, H. 7*, pp. 499-507, 2020.
- [49] S. Görtz, K. Lengert und R. Haack, „Tragfähigkeit und Anwendungen von Betonbauteilen mit Bewehrung aus basaltfaserverstärktem Kunststoff,“ Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [50] Deutscher Naturstein-Verband, „Bautechnische Information Naturwerkstein,“ Juli 2018.
- [51] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, „Hrsg. Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton - Potenziale und Handlungsstrategien,“ Düsseldorf, 2022.
- [52] Bauforumstahl e.V., [Online]. Available:
<https://bauforumstahl.de/wissen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit-glossar/allokation>. [Zugriff am 05 2023].
- [53] W. Neufert, R. i., G. Weber, C. Müller, S. Palm, K. Severins, C.-A. Graubner, T. Proske und M. Rezvani, „Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Klaksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion,“ Abschlussbericht der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, 2016.
- [54] HeidelbergCement, *CEM II- und CEM III/A-Zemente - Zemente im Einklang mit der Natur*, HeidelbergCement AG, 2017.
- [55] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, „Nachhaltig bauen mit Beton - Planungshilfe des DAfStb,“ Bericht des DAfStb, Berlin, 2021.
- [56] Statistisches Bundesamt, [Online]. Available:
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/476860/umfrage/treibhausgasemissionen-der-deutschen-stahlindustrie/>. [Zugriff am 2023].
- [57] Agora Energiewende und Wuppertal Institut, „Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement,“ Berlin, November 2019.
- [58] A. Kustermann, C. Dauberschmidt, D. Glomb, B. Wolf, S. Görtz, K. Lengert, S. Burgard und M. Schwarzer, „Entwicklung ressourcenschonender, dauerhafter und frostbeständiger Brückenkappen auf Grundlage nichtmetallischer Bewehrung und Betonen mit 100% rezyklierter Gesteinskörnung,“ ZIM-Projekt KK5102701K10, 2021.

9. Anhang

- **Anhang A:** Übersicht über die betrachteten Brückenvarianten der Parameterstudie
- **Anhang B:** Mengenangaben für typische parametrisierte Brückenbauwerke
- **Anhang C:** Übersicht über die CO₂-Parameterstudie der Straßenbrücken
- **Anhang D:** Übersicht über die CO₂-Parameterstudie der Fuß- und Radwegbrücken
- **Anhang E:** Checkliste von Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung

Anhang A

Übersicht über die betrachteten Brückenvarianten der Parameterstudie

Fuß-Radwegbrückenvarianten der Parameterstudie - Tabelle 5 von 5

Nr.	Situation			Hauptparameter			Variante										
	Art der Überführung	Spezifikation Breite zw. Gel	Hindernis	Brückenbreite [m]	Lichter Abstand Widerlager [m]	Lichte Höhe [m]	Material	Querschnitt	Konstruktionshöhe [m]	sonstiges	Material Widerlager	Standort Widerlager	Gründung				
Z1	Fußgänger-Radweg	B_1 = 6,0 m	Bach	6,50	bis 4,0	1,00	Stahlbeton	Platte	0,30	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Tiefgründung (Stahlrohr)				
Z2				"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	"	Tiefgründung-Spw			
Z3				6,50	bis 4,0	1,00	Holz	Deckbrücke	0,60	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Tiefgründung (Stahlrohr)		
Z4				"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	"	Tiefgründung-Spw		
Z5				6,50	bis 4,0	1,00	Stahl	Deckbrücke	0,35	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Tiefgründung (Stahlrohr)		
Z6				"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	"	Tiefgründung-Spw		
Z7			Fußgänger-Radweg	B_1 = 6,0 m	Wirtschaftsweg	6,50	bis 6,0	4,80	Stahlbeton	Platte	0,30	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung		
Z8						"	bis 10,0	"	"	"	"	0,40	"	"	zurückgesetzt	"	
Z9						6,50	bis 6,0	4,80	Holz	Deckbrücke	0,60	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung
Z10					"	bis 10,0	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"		
Z11	Fußgänger-Radweg	B_1 = 6,0 m			Straße, 2-spurig nach RAL (2013): RQ 15,5 (EKL 1) RQ 11,5+ (EKL 2) RQ 11 (EKL 3)	6,50	bis 20,0	4,80	Stahlbeton	Platte	0,50	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung		
Z12						"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung	
Z13						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung
Z14						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung
Z15						"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw
Z16						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"
Z17			6,50	bis 20,0		4,80	Holz	Deckbrücke	0,9	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung		
Z18			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung		
Z19			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung		
Z20			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung		
Z21			"	"		"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw		
Z22			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"		
Z23			6,50	bis 20,0		4,80	Holz	Trogbrücke	0,4	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung		
Z24			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung		
Z25			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung		
Z26			"	"		"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung		
Z27	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z28	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					
Z29	6,50	bis 20,0	4,80	Stahl	Stahlkonstr. + GFK Belag	0,35	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung					
Z30	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung					
Z31	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung					
Z32	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung					
Z33	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z34	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					
Z35	6,50	bis 20,0	4,80	Stahl	Stahl-orthotope Platte	0,35	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung					
Z36	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung					
Z37	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung					
Z38	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung					
Z39	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z40	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					
Z41	6,50	bis 20,0	4,80	Aluminium	Fachwerktrogbrücke	0,35 (Fahrbahn)	Fachwerk	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung					
Z42	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung					
Z43	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung					
Z44	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung					
Z45	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z46	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					
Z47	Fußgänger-Radweg	B_1 = 6,0 m	Straße, 4-spurig Straße, 6-spurig	6,50	bis 40,0	4,80	Spannbeton	Plattenbalken	0,85 (0,35 Fahrbahn)	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung				
Z48				"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung			
Z49			nach RAL (2013): RQ 21 (EKL 1-3)	nach RAA (2008): RQ 31 (EKA 1) RQ 28 (EKA 2) RQ 25 (EKA 3)	nach RAA (2008): RQ 31 (EKA 1) RQ 28 (EKA 2) RQ 25 (EKA 3)	6,50	bis 40,0	4,80	Stahlverbund	Stahlverbund (offene / geschl. Profile)	1,15 (0,35 Fahrbahn)	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung		
Z50						"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung	
Z51						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung
Z52						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung
Z53						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung
Z54						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung
Z55						6,50	bis 40,0	4,80	Holzverbund	Holzverbund	0,9 (0,25 Fahrbahn)	Einfeldträger	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung
Z56						"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung
Z57	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung					
Z58	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung					
Z59	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z60	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					
Z61	6,50	bis 40,0	4,80	Aluminium	Fachwerktrogbrücke	0,35 (Fahrbahn)	Fachwerk	Stahlbeton	anliegend	Stahlbeton	anliegend	Flachgründung					
Z62	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Tiefgründung					
Z63	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	Flachgründung					
Z64	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	anliegend	Tiefgründung					
Z65	"	"	"	"	"	"	"	"	"	Spundwand	anliegend	Tiefgründung-Spw					
Z66	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	zurückgesetzt	"					

Anhang B

Mengenangaben für typische parametrisierte Brückenbauwerke

Massenangaben - Straßenbrücke

Kategorie	Bauteil	Bauteilkomponente	Baustoff	Parameter	Wert	Einheit
Unterbauten - Stahlbeton	Tiefgründung	Stb.-Bohrpfähle	C30/37	Durchmesser	0,80	m
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	15,00	m
		Stb.-Pfahlkopfplatte	C30/37	Höhe	1,00	m
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	100,00	kg/m ³
	Flachgründung	Sauberkeitsschicht	C12/15	Dicke	0,10	m
		Stb.-Fundament	C30/37	Höhe	1,00	m
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	150,00	kg/m ³
	Widerlager	Stb.-Widerlager (L bis 20 m)	C30/37	Dicke	1,20	m
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	130,00	kg/m ³
		Stb.-Widerlager (L bis 40 m)	C30/37	Dicke	1,50	m
	Flügelwand	Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	130,00	kg/m ³
		Stb.-Flügelwand	C30/37	Dicke	0,80	m
	Pfeiler	Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	120,00	kg/m ³
		Stb.-Pfeiler	C30/37	Dicke	1,20	m
Unterbauten - Spundwand	Widerlager	Spundwand	Spundbohlen	Dicke	1,70	cm
				Tiefe	15,00	m
		WL-Kopfbalken	C30/37	Höhe	0,80	m
	Flügelwand	Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	1,00	m
				Tonnage	140,00	kg/m ³
		Spundwand	Spundbohlen	Dicke	1,20	cm
				Tiefe	12,00	m
	FIW-Kopfbalken	C30/37	Höhe	0,80	m	
	Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	1,00	m	
			Tonnage	120,00	kg/m ³	
Lager-Übergangskonstr.	Lager	Elastomerlager_F	Elastomer	Tonnage	620,00	kg/St.
		Elastomerlager_Ge	Elastomer	Tonnage	160,00	kg/St.
		Elastomerlager_Ga	Elastomer	Tonnage	90,00	kg/St.
	Übergangskonstr.	Stahl	Tonnage	40,00	kg/m	
Überbau - Fahrbahnkonstr.	Q1 Stahl-/Spannbetonplatte	Platte	C35/45	Höhe	~ 1,0	m
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	150,00	kg/m ³
		Spannglieder	St 1570/1770	Tonnage	30,00	kg/m ³
	Q2 Stahl-/Spannbeton Plattenbalken	Balkenträger	C35/45	Tonnage	0,30	m ³ /m ²
		Platte	C35/45	Dicke	30,00	cm
		Endquerträger	C35/45	Querschnitt	2,00	m ²
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	220,00	kg/m ³
	Q3 Holzbetonverbund	Spannglieder	St 1570/1770	Tonnage	45,00	kg/m ³
		Holz-Balkenträger	BSH	Tonnage	0,50	m ³ /m ²
		Stb.-Platte	C35/45	Dicke	30,00	cm
	Q4 / Q5 Stahlverbund-offene Profile geschlossene Profile	Endquerträger	C35/45	Querschnitt	2,00	m ²
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	300,00	kg/m ³
		Stahlträger - off. Profile	S355	Tonnage	235,00	kg/m ²
Stahlträger - ges. Profile		S355	Tonnage	250,00	kg/m ²	
Korrosionsschutz			Tonnage	6,50	kg/to	
Q6 Stahl-Orthotrope Platte	Platte	C35/45	Dicke	35,00	cm	
	Endquerträger	C35/45	Querschnitt	2,00	m ²	
	Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	250,00	kg/m ³	
Überbau - Belag	Fahrbahnbelag	Stahlträger+Platte	S355	Tonnage	350,00	kg/m ²
		Korrosionsschutz		Tonnage	6,50	kg/to
		Abdichtung	Bit-G200S4	Dicke	1,00	cm
		Asphaltschutzschicht	MA	Dicke	3,50	cm
Asphaltdeckschicht		AC	Dicke	4,00	cm	
Brückenausstattung	Kappen	Kappen	C25/30	Breite	205,00	cm
		Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	115,00	kg/m ³
	Fahrzeurückhaltesystem	FRHS	Stahl	Tonnage	30,00	kg/m
	Geländer	Gel 4	Stahl	Tonnage	40,00	kg/m

Massenangaben - Fuß- und Radwegbrücke

Kategorie	Bauteil	Bauteilkomponente	Baustoff	Parameter	Wert	Einheit			
Unterbauten - Stahlbeton	Tiefgründung	Stahlrohrpfähle (L < 21 m)	S235	Durchmesser	0,40	m			
				Tiefe	10,00	m			
				Tonnage	100,00	kg/m			
		Stahlbetonpfähle (L = 21 - 40 m)	C30/37	Durchmesser	0,50	m			
	Tiefe			10,00	m				
	Tonnage			100,00	kg/m³				
	Stb.-Pfahlkopfplatte	Bewehrungsstahl	B500B	C12/15	Höhe	0,60	m		
					Tonnage	80,00	kg/m³		
					Sauberkeitsschicht		0,10	m	
Flachgründung	Sauberkeitsschicht	C12/15	C12/15	Dicke	0,10	m			
				Stb.-Fundament		0,80	m		
				Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	120,00	kg/m³	
Widerlager	Stb.-Widerlager	Bewehrungsstahl	C30/37	B500B	Dicke	0,80	m		
					Tonnage	120,00	kg/m³		
Flügelwand	Stb.-Flügelwand	Bewehrungsstahl	C30/37	B500B	Dicke	0,80	m		
					Tonnage	120,00	kg/m³		
Unterbauten - Spundwand	Widerlager	Spundwand	Spundbohlen	Dicke	1,20	cm			
				Tiefe	10,00	m			
				WL-Kopfbalken	C30/37	Höhe	1,00	m	
				Breite	0,80	m			
	Flügelwand	Spundwand	Spundbohlen	B500B	Tonnage	100,00	kg/m³		
					Dicke	1,00	cm		
					Tiefe	7,00	m		
					FIW-Kopfbalken	C30/37	Höhe	1,00	m
Breite	0,80	m							
Tonnage	100,00	kg/m³							
Lager-Fuge-Übergangskonstr.	Pauschal								
Überbau - Q1	Q1 Stahl-/ Spannbeton-Platte / Plattenbalken	Platte	C35/45	Höhe	30-50	cm			
				Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	150,00	kg/m³	
				Spannglieder	St 1570/1770	Tonnage	30,00	kg/m³	
	Fahrbahnbelag	Asphaltdeckschicht	MA		Dicke	4,00	cm		
Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m			
Überbau - Q2a	Q2a Holz-Deckbrücke L<10m	Holz-Hauptträger + Belag_längsträger	BSH	Tonnage	0,10	m³/m²			
				Stahl-Querträger	S355	Tonnage	15,00	kg/m²	
				Fahrbahnbelag	Holz-Bohlen	VH-Nadel	Tonnage	0,10	m³/m²
	Geländer	Holz-Geländer	VH-Nadel	Tonnage	0,10	m³/m			
Überbau - Q2b	Q2b Holz-Deckbrücke L>=10m	Holz-Hauptträger + Belag_längsträger	BSH	Tonnage	0,20	m³/m²			
				Stahl-Querträger	BSH	Tonnage	0,02	m³/m²	
				VBM + konstr. Holzschutz	S355	Tonnage	10,00	kg/m²	
				Fahrbahnbelag	Funierschichtholzplatte	FSH	Tonnage	0,05	m³/m²
	Asphalt	MA		Dicke	7,00	cm			
Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m			
Überbau - Q3	Q3 Holz-Trogbrücke	Holz-Hauptträger + Belag_längsträger	BSH	Tonnage	0,20	m³/m²			
				Aussteifungsrahmen	S235	Tonnage	120,00	kg/m²	
				Fahrbahnbelag	Funierschichtholzplatte	FSH	Tonnage	0,10	m³/m²
	Asphalt	MA		Dicke	7,00	cm			
Geländer	Gel 4 - Abminderung	Stahl		Tonnage	10,00	kg/m			
Überbau - Q4	Q4 Holzbetonverbund	Holz-Balkenträger	BSH	Tonnage	0,50	m³/m²			
				Stb.-Platte	C35/45	Dicke	25,00	cm	
				Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	300,00	kg/m³	
	Fahrbahnbelag	Asphaltdeckschicht	MA		Dicke	4,00	cm		
Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m			
Überbau - Q5	Q5 Stahl	Stahlkonstruktion	S355	Tonnage	120,00	kg/m²			
				Korrosionsschutz		Tonnage	6,50	kg/to	
				Fahrbahnbelag	Glasfaserverstärkter Kunststoff	GFK	Dicke	4,00	cm
	Gewicht	24,00	kg/m²						
Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m			
Überbau - Q6	Q6 Stahlverbund	Stahlträger	S355	Tonnage	150,00	kg/m²			
				Korrosionsschutz		Tonnage	6,50	kg/to	
				Platte	C35/45	Dicke	35,00	cm	
				Bewehrungsstahl	B500B	Tonnage	150,00	kg/m³	
	Fahrbahnbelag	Asphaltdeckschicht	MA		Dicke	4,00	cm		
Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m			
Überbau - Q7	Q7 Stahl-Orthotrope Platte	Stahlträger+Platte	S355	Tonnage	250,00	kg/m²			
				Korrosionsschutz		Tonnage	6,50	kg/to	
				Fahrbahnbelag	RHD Belag	Elastomer-PU	Dicke	0,60	cm
	Geländer	Gel 4	Stahl		Tonnage	40,00	kg/m		
Überbau - Q8	Q8 Aluminium-Fachwerk-Trogbr.	Alu-Fachwerkkonstr.	Alu	Tonnage	40,00	kg/m²			
				Fahrbahnbelag	Alu Platte	Alu	Tonnage	75,00	kg/m²
				RHD Belag	Elastomer-PU	Dicke	0,60	cm	
	Geländer	Füllstabgeländer	Alu		Tonnage	10,00	kg/m		

Anhang C

Übersicht über die CO₂-Parameterstudie der Straßenbrücken

Anhang D

Übersicht über die CO₂-Parameterstudie der Fuß- und Radwegbrücken



F58	F59	F60	F61	F62	F63	F64	F65	F66
100	100	100	100	100	100	100	100	100
127.939	184.886	166.211	232.764	197.399	214.162	183.915	237.731	219.055
138.174	199.677	179.508	251.385	213.191	231.295	198.628	256.749	236.580
123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00
1.123,36	1.623,39	1.459,42	2.043,78	1.733,26	1.880,44	1.614,86	2.087,39	1.923,41
11,23	16,23	14,59	20,44	17,33	18,80	16,15	20,87	19,23
179,10	179,10	179,10	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15	174,15
771,49	1.114,89	1.002,28	1.443,50	1.224,18	1.328,13	1.140,56	1.474,30	1.358,48
7,71	11,15	10,02	14,43	12,24	13,28	11,41	14,74	13,58

22.096	0	0	34.173	21.599	34.173	22.096	0	0
7.929	25.986	25.170	10.057	10.057	7.929	7.929	25.649	24.834
25.131	87.598	69.253	56.354	32.644	39.396	20.441	80.031	61.686
58.203	58.203	58.203	85.134	85.134	85.134	85.134	85.134	85.134
4.962	4.962	4.962	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403
12.945	12.945	12.945	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.909	9.984	8.975	12.569	10.660	11.565	9.931	12.837	11.829
138.174	199.677	179.508	251.385	213.191	231.295	198.628	256.749	236.580

16%	0%	0%	14%	10%	15%	11%	0%	0%
6%	13%	14%	4%	5%	3%	4%	10%	10%
18%	44%	39%	22%	15%	17%	10%	31%	26%
42%	29%	32%	34%	40%	37%	43%	33%	36%
4%	2%	3%	19%	23%	21%	24%	19%	20%
9%	6%	7%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
40%	57%	53%	40%	30%	35%	25%	41%	37%
55%	38%	42%	55%	65%	60%	70%	54%	58%

1.534	0	0	2.373	1.500	2.373	1.534	0	0
551	1.805	1.748	698	698	551	551	1.781	1.725
1.745	6.083	4.809	3.913	2.267	2.736	1.419	5.558	4.284
0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.830	7.888	6.557	6.985	4.465	5.660	3.505	7.339	6.008

473	473	473	692	692	692	692	692	692
40	40	40	394	394	394	394	394	394
105	105	105	38	38	38	38	38	38
619	619	619	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124

25%	59%	52%	116%	120%	118%	121%	124%	125%
8%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	5%	5%
-1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	0%
31%	22%	24%	16%	19%	17%	20%	16%	17%
30%	21%	24%	15%	18%	16%	20%	16%	17%
43%	28%	32%	4%	4%	4%	3%	2%	2%
-6%	-17%	-16%	-41%	-47%	-44%	-50%	-48%	-50%
100%	98%	98%	100%	100%	100%	100%	98%	98%

57.835	25.656	24.097	74.322	47.472	60.344	37.357	7.969	6.411
28.051	16.310	15.836	26.263	16.828	21.154	13.108	2.427	1.953
16.637	114.112	97.800	0	0	0	0	90.746	74.435
23.780	23.780	23.780	0	0	0	0	0	0
0	0	0	89.829	89.829	89.829	89.829	89.829	89.829
4.962	4.962	4.962	0	0	0	0	0	0
0	0	0	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403
131.265	184.820	166.475	238.816	202.532	219.730	188.697	239.374	221.029

42%	13%	13%	30%	22%	26%	19%	3%	3%
20%	8%	9%	10%	8%	9%	7%	1%	1%
12%	57%	54%	0%	0%	0%	0%	35%	31%
17%	12%	13%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	36%	42%	39%	45%	35%	38%
4%	2%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	19%	23%	21%	24%	19%	20%
95%	93%	93%	95%	95%	95%	95%	93%	93%

--

F124	F125	F126	F127	F128	F129	F130	F131	F132
100	100	100	100	100	100	100	100	100
164.968	224.761	206.085	313.690	278.954	294.050	264.674	321.334	302.659
178.166	242.741	222.572	338.785	301.270	317.574	285.848	347.041	326.872
184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50
965.67	1.315,67	1.206,35	1.836,23	1.632,90	1.721,27	1.549,31	1.880,98	1.771,66
9.66	13,16	12,06	18,36	16,33	17,21	15,49	18,81	17,72
268,65	268,65	268,65	261,23	261,23	261,23	261,23	261,23	261,23
663,19	903,56	828,48	1.296,91	1.153,30	1.215,71	1.094,26	1.328,51	1.251,30
6,63	9,04	8,28	12,97	11,53	12,16	10,94	13,29	12,51

26.259	0	0	37.443	25.513	37.443	26.259	0	0
11.893	37.031	36.216	15.086	15.086	11.893	11.893	36.695	35.879
25.131	87.598	69.253	56.354	32.644	39.396	20.441	80.031	61.686
85.587	85.587	85.587	135.664	135.664	135.664	135.664	135.664	135.664
7.443	7.443	7.443	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604
12.945	12.945	12.945	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
8.908	12.137	11.129	16.939	15.063	15.879	14.292	17.352	16.344
178.166	242.741	222.572	338.785	301.270	317.574	285.848	347.041	326.872

15%	0%	0%	11%	8%	12%	9%	0%	0%
7%	15%	16%	4%	5%	4%	4%	11%	11%
14%	36%	31%	17%	11%	12%	7%	23%	19%
48%	35%	38%	40%	45%	43%	47%	39%	42%
4%	3%	3%	21%	24%	23%	25%	21%	22%
7%	5%	6%	1%	2%	1%	2%	1%	1%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
36%	51%	47%	32%	24%	28%	20%	34%	30%
59%	44%	48%	63%	71%	67%	75%	61%	65%

1.216	0	0	1.733	1.181	1.733	1.216	0	0
551	1.714	1.677	698	698	551	551	1.699	1.661
1.163	4.055	3.206	2.609	1.511	1.824	946	3.705	2.856
0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.930	5.770	4.883	5.041	3.391	4.108	2.713	5.404	4.517

464	464	464	735	735	735	735	735	735
40	40	40	394	394	394	394	394	394
70	70	70	25	25	25	25	25	25
574	574	574	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154

17%	48%	42%	120%	123%	122%	125%	126%	127%
7%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	5%	5%
-1%	0%	0%	-1%	-1%	-1%	-1%	0%	0%
33%	24%	27%	18%	20%	19%	21%	17%	19%
32%	24%	26%	17%	19%	18%	21%	17%	18%
49%	35%	38%	4%	3%	3%	3%	2%	2%
-6%	-16%	-15%	-47%	-52%	-49%	-54%	-52%	-54%
100%	98%	98%	100%	100%	100%	100%	99%	99%

72.400	34.762	33.203	80.462	54.105	65.705	43.401	8.554	6.995
36.978	23.332	22.857	28.421	19.138	23.027	15.192	2.605	2.131
18.484	125.752	109.440	0	0	0	0	100.539	84.228
33.953	33.953	33.953	0	0	0	0	0	0
0	0	0	140.359	140.359	140.359	140.359	140.359	140.359
7.443	7.443	7.443	0	0	0	0	0	0
0	0	0	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604
169.258	225.241	206.896	321.846	286.206	301.695	271.556	324.662	306.317

41%	14%	15%	24%	18%	21%	15%	2%	2%
21%	10%	10%	8%	6%	7%	5%	1%	1%
10%	52%	49%	0%	0%	0%	0%	29%	26%
19%	14%	15%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	41%	47%	44%	49%	40%	43%
4%	3%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	21%	24%	23%	25%	21%	22%
95%	93%	93%	95%	95%	95%	95%	94%	94%



F190	F191	F192	F193	F194	F195	F196	F197	F198
100	100	100	100	100	100	100	100	100
79.316	124.968	107.676	141.701	139.379	142.650	139.864	178.685	161.721
85.662	134.965	116.291	153.037	150.530	154.061	151.053	192.980	174.659
123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00	123.00
696.44	1.097,28	945,45	1.244,20	1.223,82	1.252,53	1.228,07	1.568,95	1.419,99
6,96	10,97	9,45	12,44	12,24	12,53	12,28	15,69	14,20
124,50	124,50	124,50	124,50	124,50	124,50	124,50	124,50	124,50
688,05	1.084,06	934,06	1.229,21	1.209,07	1.237,44	1.213,28	1.550,04	1.402,88
6,88	10,84	9,34	12,29	12,09	12,37	12,13	15,50	14,03

3.108	0	0	4.992	2.611	5.966	3.108	0	0
1.995	20.701	20.027	1.995	1.995	1.995	1.995	20.423	19.749
166	31.407	14.339	166	166	166	166	24.677	7.945
58.203	58.203	58.203	33.572	33.572	33.572	33.572	33.572	33.572
4.962	4.962	4.962	99.965	99.965	99.965	99.965	99.965	99.965
12.945	12.945	12.945	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.283	6.748	5.815	7.652	7.526	7.703	7.553	9.649	8.733
85.662	134.965	116.291	153.037	150.530	154.061	151.053	192.980	174.659

4%	0%	0%	3%	2%	4%	2%	0%	0%
2%	15%	17%	1%	1%	1%	1%	11%	11%
0%	23%	12%	0%	0%	0%	0%	13%	5%
68%	43%	50%	22%	22%	22%	22%	17%	19%
6%	4%	4%	65%	66%	65%	66%	52%	57%
15%	10%	11%	3%	3%	3%	3%	2%	3%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6%	39%	30%	5%	3%	5%	3%	23%	16%
89%	56%	65%	90%	92%	90%	92%	72%	79%

1.036	0	0	1.664	870	1.989	1.036	0	0
665	6.900	6.676	665	665	665	665	6.808	6.583
55	10.469	4.780	55	55	55	55	8.226	2.648
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.756	17.369	11.455	2.384	1.591	2.709	1.756	15.033	9.231

473	473	473	273	273	273	273	273	273
40	40	40	813	813	813	813	813	813
105	105	105	38	38	38	38	38	38
619	619	619	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124	1.124

-18%	24%	12%	129%	130%	129%	129%	122%	125%
8%	7%	7%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
51%	32%	37%	26%	27%	26%	27%	21%	23%
50%	32%	37%	26%	27%	26%	27%	21%	23%
65%	42%	48%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
-5%	-6%	-6%	-63%	-64%	-62%	-64%	-51%	-56%
100%	98%	99%	100%	100%	100%	100%	99%	99%

21.053	22.413	19.654	1.725	3.629	1.725	4.009	4.470	1.968
14.947	15.323	14.483	561	1.143	561	1.260	1.361	599
16.637	59.592	46.123	4.868	0	5.842	0	37.399	23.930
23.780	23.780	23.780	0	0	0	0	0	0
0	0	0	89.829	89.829	89.829	89.829	89.829	89.829
4.962	4.962	4.962	0	0	0	0	0	0
0	0	0	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403	48.403
81.379	126.069	109.002	145.385	143.003	146.358	143.500	181.461	164.729

25%	17%	17%	1%	2%	1%	3%	2%	1%
17%	11%	12%	0%	1%	0%	1%	1%	0%
19%	44%	40%	3%	0%	4%	0%	19%	14%
28%	18%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	59%	60%	58%	59%	47%	51%
6%	4%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	32%	32%	31%	32%	25%	28%
95%	93%	94%	95%	95%	95%	95%	94%	94%

H = 4,8 m ; L = (6,0m) bis 20 m

H = 4,8 m ; L = (20 m) bis 40 m

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of numerical data.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of numerical data, including zero values.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of percentage values.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 4 rows of numerical data.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 4 rows of numerical data.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of percentage values.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of numerical data.

Table with 27 columns (F225 to F255) and 7 rows of percentage values.



F256	F257	F258	F259	F260	F261	F262	F263	F264
100	100	100	100	100	100	100	100	100
110.912	163.533	146.241	217.944	214.462	219.367	215.189	260.980	244.015
119.785	176.615	157.941	235.380	231.619	236.917	232.404	281.858	263.537
184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50	184.50
649.24	957.26	856.05	1.275.77	1.255.39	1.284.10	1.259.64	1.527.69	1.428.38
6.49	9.57	8.56	12.76	12.55	12.84	12.60	15.28	14.28
186.75	186.75	186.75	186.75	186.75	186.75	186.75	186.75	186.75
641.42	945.73	845.73	1.260.40	1.240.26	1.268.63	1.244.47	1.509.28	1.411.17
6.41	9.46	8.46	12.60	12.40	12.69	12.44	15.09	14.11

4.662	0	0	7.488	3.916	8.949	4.662	0	0
2.993	30.403	29.729	2.993	2.993	2.993	2.993	30.125	29.452
166	31.407	14.339	166	166	166	166	24.677	7.945
85.587	85.587	85.587	58.322	58.322	58.322	58.322	58.322	58.322
7.443	7.443	7.443	149.947	149.947	149.947	149.947	149.947	149.947
12.945	12.945	12.945	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695	4.695
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.989	8.831	7.897	11.769	11.581	11.846	11.620	14.093	13.177
119.785	176.615	157.941	235.380	231.619	236.917	232.404	281.858	263.537

4%	0%	0%	3%	2%	4%	2%	0%	0%
2%	17%	19%	1%	1%	1%	1%	11%	11%
0%	18%	9%	0%	0%	0%	0%	9%	3%
71%	48%	54%	25%	25%	25%	25%	21%	22%
6%	4%	5%	64%	65%	63%	65%	53%	57%
11%	7%	8%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7%	35%	28%	5%	3%	5%	3%	19%	14%
88%	60%	67%	90%	92%	90%	92%	76%	81%

1.036	0	0	1.664	870	1.989	1.036	0	0
665	6.756	6.607	665	665	665	665	6.694	6.545
37	6.979	3.186	37	37	37	37	5.484	1.765
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.738	13.735	9.793	2.366	1.572	2.691	1.738	12.178	8.310

464	464	464	316	316	316	316	316	316
40	40	40	813	813	813	813	813	813
70	70	70	25	25	25	25	25	25
574	574	574	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154	1.154

-21%	17%	7%	131%	132%	131%	131%	125%	127%
7%	7%	7%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
-1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
49%	33%	37%	26%	26%	26%	26%	21%	23%
49%	33%	37%	26%	26%	25%	26%	21%	23%
70%	48%	53%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
-5%	-6%	-5%	-64%	-65%	-64%	-65%	-55%	-58%
100%	99%	99%	100%	100%	100%	100%	99%	99%

31.510	31.520	28.760	2.517	5.373	2.517	5.945	5.054	2.553
22.407	22.345	21.504	828	1.701	828	1.876	1.540	777
18.484	69.952	56.484	7.302	0	8.762	0	45.912	32.444
33.953	33.953	33.953	0	0	0	0	0	0
0	0	0	140.359	140.359	140.359	140.359	140.359	140.359
7.443	7.443	7.443	0	0	0	0	0	0
0	0	0	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604	72.604
113.796	165.211	148.143	223.611	220.038	225.071	220.784	265.470	248.737

26%	18%	18%	1%	2%	1%	3%	2%	1%
19%	13%	14%	0%	1%	0%	1%	1%	0%
15%	40%	36%	3%	0%	4%	0%	16%	12%
28%	19%	21%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	60%	61%	59%	60%	50%	53%
6%	4%	5%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
0%	0%	0%	31%	31%	31%	31%	26%	28%
95%	94%	94%	95%	95%	95%	95%	94%	94%

Anhang E

Checkliste

CHECKLISTE

1	2	3	4	5	6	7			
Bauwerk: Straßenbrücke Spannweite von 4 m bis 40 m									
Gründung - Unterbauten									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Art / Bauteil	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Dicke / Durchmesser (D) m		Hinweis	Vorschlag	CO ₂ -Einsparpotential %	Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
Fachgründung	C30/37	120	295				a) Verwendung von Hochofenzement CEM III/A	40%	Im Bauablauf sind eine etwas längere Nachbehandlungsdauer bzw. eine etwas verzögerte Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen.
Tiefgründung - Stb. Pfahl	C30/37	100	280	D 0,8 m		Achsabst. 2,0 m			
Tiefgründung - Pfahlkopfplatte	C30/37	150	320				b) Massenmäßige Optimierung	20 - 30%	Massen sind auf die tatsächlich statisch erforderliche Soll-Geometrie zu begrenzen: z.B. Widerlagerwand mit üblichen Dicken von 1,5 - 2,0 m auf Werte um ca. 1,20 m reduzieren; Versprung an der Rückseite des Widerlagers unter der Kammerwand ausbilden.
Widerlagerwand	C30/37	130	305	1,0 - 1,5			c) Spundwandwiderlager anstatt Stahlbetonwiderlager mit Tiefgründung	20%	Einsatz bei geringen erforderlichen Einbindetiefen der Tiefgründung bis 10 m. Bei größeren Einbindelängen ist ein Stahlbetonwiderlager mit Pfahlgründung in Bezug auf die CO ₂ -Bilanz günstiger.
Flügelwand	C30/37	120	295	0,8					
Pfeiler (2-feldriger DLT)	C30/37	120	295	1,2			d) Ersatz der Stahlbetonkonstruktion durch ein Widerlager aus bewehrter Erde	20 - 30%	Erdkörper mit Geogitter bewehrt, Lagenabstand etwa. 40 - 50 cm. Füllmaterialien bestehen aus Sand, Kiessand und einem Spezialbindemittel aus Zement und Kalk (Dorosol). Menge des Dorosol beträgt etwa 3 - 4 M-% des Erdkörpers. Einsatz bei Brücken mit einer Breite bis ca. 8,5 m. Bei größeren Breiten weist die Stahlbeton-Lösung eine günstigere CO ₂ -Bilanz auf.
Überbauten - Tragkonstruktion									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Spannbeton Platte – Spannweite bis 20 m bzw. 2-feldriger DLT bis 40 m							Vorschlag	CO ₂ -Einsparpotential %	Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a	a) Einsatz von Wellstahldurchlass für die Überquerung kleiner Hindernisse wie Bäche	25 - 30%	Wellstahlösung für den Fall einer Überquerung bis zu etwa 6,0 m. Nutzungsdauer des Wellstahlrohrs gemäß ABBV beträgt 70 Jahre.
	C35/45	150 30	380		1,0	330			
Stahlbeton Plattenbalken – Spannweite bis 20 m bzw. 2-feldriger DLT bis 40 m									
	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a	b) Wahl eines integralen Systems, anstelle eines 2-feldrigen Durchlaufträgers	k. A.	Wenn durch den Brückenneubau der Verkehrsfluss behindert wird, ist bei hoher Verkehrsstärke (ab ca. 20.000 KFz/Tag) der Bauablauf im Hinblick auf die Vermeidung von Stausituationen zu optimieren. Dieses schließt auch spätere Eingriffe aus dem Erhaltungszeitraum mit ein, wie z.B. Bauwerksprüfungen oder etwaige Instandsetzungsarbeiten, die ebenfalls Stausituationen verursachen können. Hier sollte möglichst auf Bauteile innerhalb des Verkehrsraums, wie z.B. einen Mittelpfeiler verzichtet werden.
	C35/45	220	395		1,2 - 1,3	380			
Holz-Beton-Verbund – Spannweite bis 20 m									
	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Holz BSH m ³ /m ² Brückenfl.	Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 50a			
	C35/45	300	450	0,5	09 - 1,2	320			
Spannbeton Plattenbalken – Spannweite bis 35 m bzw. integrales Bauwerk bis 40 m									
	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a			
	C35/45	220 45	445		1,5 - 2,0	450			

Stahl-Beton-Verbund – Spannweite bis 35 m bzw. integrales Bauwerk bis 40 m							c) Verwendung von Baustahl mit höherer Zugfestigkeit, hier z. B. Stahl S460	30%	Durch die Verwendung von Stahl S460 wird die Stahlmenge in der Tragkonstruktion reduziert. Beispielweise wird bei einer Stahlverbundkonstruktion die Stahltonnage von 250 kg/m ² für S355 auf 150 kg/m ² für S460 verringert.
	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Stahl S355 kg/m ² Brückenfl.	Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a			
	C35/45	250	415	250	1,2 - 1,7	400			
Stahl-orthotrope Platte – Spannweite bis 40 m							d) Verwendung von CO ₂ -reduziertem Baustahl, der mittels recycelten Materials (Stahlschrott) durch das Elektrolichtbogen-Verfahren produziert wird.	20%	Hier z. B.: die „XCarb-recycelt und erneuerbar hergestellt“-Stähle von ArcelorMittal. In der Herstellungsphase emittiert eine Tonne XCarb nur etwa 330 kgCO ₂ , im Vergleich zu herkömmlichem Stahl mit 1.125 kgCO ₂ . Über alle Phasen hinweg beträgt die CO ₂ -Bilanz einer Tonne XCarb-Stahl lediglich 550 kgCO ₂ .
	Stahl	Stahl kg/m ² Brückenfl.	Korrosionsschutz kg/m ² Stahlfl.		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a			
	S355	350	6,5		2,0	315			
Überbauten - Belag									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Asphaltschutzschicht	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a			
	Guss (MA)	3,5	1,85	6,5	25a	25			
Asphaltdeckschicht	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a			
	Beton (AC)	4,0	1,4	5,6	15a	40			
Brückenausstattung									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Kappe (je Seite)	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	kgCO ₂ /m Kappenlang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Kappenlang 100a	a) Einsatz nichtmetallischer Bewehrung bei Brückenkappen	k. A.	Der CO ₂ -Anteil der Brückenkappen beträgt ca. 65 - 70% der gesamten Ausstattung. Durch den Einsatz nichtmetallischer Bewehrung kann die Lebensdauer der Kappen erhöht werden, wodurch wiederum die CO ₂ -Emissionen aufgrund weniger häufiger Bauteilaustausche verringert werden.
	C25/30	115	270	120	40a	360			
Fahrzeugrückhaltesystem FRHS (je Seite)	Stahl	Gewicht FRSH kg/m		kgCO ₂ /m FRHS-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m FRHS-lang 100a			
	S235	30		22	40a	65			
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a			
	S235	40		30	40a	90			

CHECKLISTE

1	2	3	4	5	6	7			
Bauwerk: Fuß-Radwegbrücke Spannweite von 4 m bis 40 m									
Gründung									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Art / Bauteil	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Baustahl	kgCO ₂ /m Stahlrohr-Pfahl	Hinweis	Vorschlag	CO ₂ -Einsparpotential %	Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
Fachgründung	C30/37	120	295				a) Verwendung von Hochofenzement CEM III/A	40%	Im Bauablauf sind eine etwas längere Nachbehandlungsdauer bzw. eine etwas verzögerte Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen.
Tiefgründung - Stahlrohr				S235	70	D 0,4 m			
Tiefgründung - Stb. Pfahl	C30/37	100	280			D 0,5 m			
Tiefgründung - Pfahlkopfplatte	C30/37	80	265						
Unterbauten									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Bauteil	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Dicke m			b) Ersatz der Stahlbetonkonstruktion durch eine Gabionenwand aus Drahtgitterkörben mit Naturstein	70 - 80%	Eine maximal zulässige Auflast sowie eine kürzere Lebensdauer von ca. 40 - 50 Jahren sind zu berücksichtigen. Die Anwendung liegt daher eher bei leichteren Konstruktionen wie z.B. Fuß- und Radwegbrücken in Holzbauweise mit einer Spannweite von ca. 20 m.
Widerlagerwand	C30/37	120	295	0,8 - 1,0			c) Einbau von Widerlagern aus Naturstein bei geringem Lichtraumprofil, z. B. über einem Bach	50%	CO ₂ -Emission aufgrund des Transports des Natursteins vom Werk zur Baustelle ist zu beachten. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen muss ggf. eine umlaufende bewehrte Betonschale betoniert werden.
Flügelwand	C30/37	120	295	0,8					
Pfeiler (2-feldriger DLT)	C30/37	120	295	1,2					
Überbauten – Tragkonstruktion-Belag und Ausstattung									
Status-Quo (Regelfall)							Optimierungsmöglichkeit		
Stahlbeton Platte – Spannweite 4 m bis 10 m									
Platte	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a	Vorschlag	CO ₂ -Einsparpotential %	Bemerkung / Umsetzungsempfehlung
	C35/45	120	325		0,3	110	a) Einbau von Wellstahldurchlass für Überquerung bis 6 m	15%	Nutzungsdauer des Wellstahlrohrs gemäß ABBV beträgt 70 Jahre.
Belag (optional)	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a			
	Guss (MA)	4,0	1,9	7,5	25a	30			
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a	b) Einsatz von Holzdeckbrücke mit Holzbohlenbelag für Überquerung bis 10 m	40%	Holzbauweise mit einem ausreichenden konstruktiven Holzschutz, um eine Lebensdauer von zumindest 40 Jahren sicherzustellen. Nutzungsdauer der Holzbauteile beträgt i. M. 50 Jahre, daher müssen sie über einen Zeitraum von 100 Jahren zweimal hergestellt werden.
	S235	40		30	40a	90			
Stahlbeton Platte – Spannweite 10 m bis 20 m									
Platte	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a	c) Ersatz der Stahlbetonplatte durch eine Fahrbahnplatte aus vorgespannten Natursteinblöcken	45%	Die Anwendung liegt bei Brücken mit einer Spannweite von bis ca. 15 m. CO ₂ -Emission aufgrund des Transports des Natursteins vom Werk zur Baustelle ist zu beachten. Sofern die Transportwege nicht zu groß werden, ist ein CO ₂ -Bedarf im Bereich 95 kgCO ₂ /m ² Brückenfläche zu erwarten.
	C35/45	120	325		0,5	185			
Asphalt-Belag	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a			
	Guss (MA)	4,0	1,9	7,5	25a	30			
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a			
	S235	40		30	40a	90			

Holz-Deckbrücke – Spannweite bis 20 m							d) Ersatz des Asphalt-Belags mit Unterkonstruktion aus Furnierschichtholz durch Betonplatte mit Carbon- oder Basaltfaserbewehrung.	70%	Belag aus filigranen Betonplatten mit einer Stärke von etwa 10 cm, verstärkt durch Carbon- oder Basaltfaserbewehrung, gewährleistet die Quertragwirkung und den konstruktiven Holzschutz. Gemäß eigenen Berechnungen liegt der CO ₂ -Bedarf hier bei etwa 25 kgCO ₂ /m ² Belagsplatte. Die Nutzungsdauer beträgt 100a.			
Tragkonstruktion	Holz (Hauptträger)	Holz m ³ /m ² Brückenfl. Hauptträger	Holz (Querträger)	Holz m ³ /m ² Brückenfl. Querträger	Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 50a						
	BSH	0,2	BSH	0,02	0,9	45						
Asphalt-Belag mit Belagsunterkonstruktion aus Holz	Belag-UK Holz	Holz m ³ /m ² Belag		kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	FSH	0,05		20	25a	80						
	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	Guss (MA)	7,0	1,9	13,5	25a	55						
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite) - Aussteifung	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a						
	S235	40		30	40a	90						
Holz-Trogbrücke – Spannweite bis 20 m										e) Einsatz von CO ₂ -reduzierten Stahlprodukten mit hoher Streckgrenze	50%	Recyclingstahl wird als CO ₂ -armes Produkt betrachtet und durch den Einsatz von Stahl mit hoher Zugfestigkeit (z.B.: S460) wird die benötigte Stahlmenge in der Tragkonstruktion reduziert.
Holz-Tragkonstruktion	Holz (Hauptträger)	Holz m ³ /m ² Brückenfl.	Stahl Aussteifungsrahmen	Stahl kg/m ² Brückenfl.	Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 50a						
	BSH	0,2	S235	100	k.A.	115						
Asphalt-Belag mit Belagsunterkonstruktion aus Holz	Belag-UK Holz	Holz m ³ /m ² Belag		kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	FSH	0,05		20	25a	80						
	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	Guss (MA)	7,0	1,9	13,5	25a	55						
Stahlbrücke (Deck-/ Trog-/ Fachwerk) – Spannweite bis 30 m							f) Vermeidung von GFK-Bohlen und RHD-Belag	je nach Variante	Die Kunststoffbeläge wie ein GFK-Bohlenbelag oder ein RHD-Belag (Reaktionsharzgebundener Dünnbettbelag) weisen sehr hohe CO ₂ -Aufwendungen auf. Statt GFK-Bohlen kann beispielsweise eine Belagskonstruktion mit Asphalt-schicht und Unterkonstruktion eingesetzt werden. Dadurch kann eine Reduzierung der CO ₂ -Emissionen um 40% erzielt werden (von 220 kgCO ₂ /m ² Belag auf 135 kgCO ₂ /m ² über einen Zeitraum von 100 Jahren).			
Stahl-Tragkonstruktion	Stahl	Stahl kg/m ² Brückenfl.	Korrosionsschutz kg/m ² Stahlfl.		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a						
	S355	120	6,5		0,35	120						
GFK-Bohlen Belag (Glasfaserverstärkter Kunststoff)	Belag	Gewicht kg/m ²		kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	GFK	24		110	50a	220						
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a						
	S235	40		30	40a	90						
Stahl-orthotrope Platte – Spannweite bis 20 m							f) Vermeidung von GFK-Bohlen und RHD-Belag	je nach Variante	Die Kunststoffbeläge wie ein GFK-Bohlenbelag oder ein RHD-Belag (Reaktionsharzgebundener Dünnbettbelag) weisen sehr hohe CO ₂ -Aufwendungen auf. Statt GFK-Bohlen kann beispielsweise eine Belagskonstruktion mit Asphalt-schicht und Unterkonstruktion eingesetzt werden. Dadurch kann eine Reduzierung der CO ₂ -Emissionen um 40% erzielt werden (von 220 kgCO ₂ /m ² Belag auf 135 kgCO ₂ /m ² über einen Zeitraum von 100 Jahren).			
Stahl-Tragkonstruktion	Stahl	Stahl kg/m ² Brückenfl.	Korrosionsschutz kg/m ² Stahlfl.		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a						
	S355	250	6,5		0,35	200						
RHD-Belag (Reaktionsharzgebundener Dünnbelag)	Belag	Gewicht kg/m ² bei 6 mm Dicke		kgCO ₂ /m ² Belag	Lebensdauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a						
	RHD	8,5		60	15a	420						
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebensdauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a						
	S235	40		30	40a	90						
Spannbeton Plattenbalken – Spannweite 20 m bis 40 m												
Beton Plattenbalken	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton		Konstruktionshöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a						
	C35/45	150 30	380		0,85	200						

Asphalt-Belag	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a				
	Guss (MA)	4,0	1,9	7,5	25a	30				
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a				
	S235	40		30	40a	90				
Holz-Beton-Verbund – Spannweite 20 m bis 40 m										
HBV Platte	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Holz BSH m ³ /m ² Brückenfl.	Konstruktion shöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 50a				
	C35/45	300	450	0,3	09	230				
Asphalt-Belag	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a				
	Guss (MA)	4,0	1,9	7,5	25a	30				
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a				
	S235	40		30	40a	90				
Stahl-Beton-Verbund – Spannweite 20 m bis 40 m										
Verbund Platte	Beton	Bewehrung kg/m ³	kgCO ₂ /m ³ bewehrter Beton	Stahl S355 kg/m ² Brückenfl.	Konstruktion shöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a				
	C35/45	150	350	150	1,15	245				
Asphalt-Belag	Asphalt	Dicke cm	kgCO ₂ /m ² Belag je cm Dicke	kgCO ₂ /m ² Belag	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a				
	Guss (MA)	4,0	1,9	7,5	25a	30				
Geländer Gel 4 nach ZTV-ING (je Seite)	Stahl	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a				
	S235	40		30	40a	90				
Aluminium-Fachwerk-Trogbrücke – Spannweite 20 m bis 40 m										
Fachwerk-Trog Konstr.	Aluminium	Profile Alu kg/m ² Brückenfl.	Bleche Alu kg/m ² Brückenfl.		Konstruktion shöhe m	kgCO ₂ /m ² Brückenfl. 100a				
	Alu-eloxiert	45	75		k.A.	670				
RHD-Belag (Reaktionsharzgebunden er Dünnbelag)	Belag	Gewicht kg/m ² bei 6 mm Dicke		kgCO ₂ /m ² Belag	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m ² Belag 100a				
	RHD	8,5		60	15a	420				
Alu-Füllgeländer (je Seite)	Aluminium	Gewicht Gel. kg/m		kgCO ₂ /m Gel.-lang	Lebens- dauer	kgCO ₂ /m Gel.-lang 100a				
	Alu-eloxiert	10		50	100a	50				