

Empfehlungen zur

Nachhaltigkeit im Untertagebau

Teil 2: Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase

Empfehlungen zur Nachhaltigkeit im Untertagebau – Teil 2: Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase

Herausgeber

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB)
German Tunnelling Committee (ITA-AITES)
Mathias-Brüggen-Str. 41, 50827 Köln
Tel. +49 - 221 - 5 97 95-0
Fax +49 - 221 - 5 97 95-50
E-Mail: info@daub-ita.de
www.daub-ita.de

Hinweise zu den vorliegenden Empfehlungen senden Sie bitte an die o. a. E-Mail-Adresse.

Erarbeitet vom DAUB-Unterausschuss „Nachhaltigkeit im Untertagebau“

Mitglieder des Unterausschusses:

Dr.-Ing. Frank Abel	HOCHTIEF Infrastructure GmbH, Essen
Delia Albrecht-Vogelsang, M.Sc.	Ed. Züblin AG, Stuttgart
Dipl.-Ing. Lars Babendererde	BabEng GmbH, Lübeck
Lotta Bänsch, M.Sc.	BabEng GmbH, Lübeck
Dipl.-Bauing. ETH Heinz Ehrbar (Leiter)	im Auftrag der DB InfraGO AG
Prof. Dr.-Ing. Stephan Engelhardt	Hochschule München
Dr.-Ing. Stefan Franz	DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Berlin
Dr.-Ing. Claudia Klotz	Ed. Züblin AG, Stuttgart
Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA e. V., Köln
Helena Loga, M.Sc.	DB InfraGO AG, München
Dr.-Ing. Peter-Michael Mayer	Ed. Züblin AG, Stuttgart
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Reikat	Stadt Bochum
Dipl.-Ing. Rainer Rengshausen	PORR GmbH & Co. KGaA, Düsseldorf
Dr. techn. Klaus Rieker	Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt am Main
Dr.-Ing. Christian Thienert	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA e. V., Köln
Dr.-Ing. Götz Vollmann	Ruhr-Universität Bochum
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wehrmeyer	Herrenknecht AG, Schwanau
Dr.-Ing. Thorsten Weiner	Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Düsseldorf

Satz, Layout und redaktionelle Bearbeitung:

Gabriele Konopka	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA e. V.
Prof. Dr.-Ing. Roland Leucker	Studiengesellschaft für Tunnel und Verkehrsanlagen – STUVA e. V.

November 2025

Titelbild: Eigene Abbildung

Gesamtinhalt

Teil 1 – Rahmenbedingungen, Herausforderungen, Lösungsansätze und Projektbewertung

Abkürzungen

Glossar

Präambel

- 1 Politische Rahmenbedingungen
- 2 Status Quo und aktuelle Herausforderungen
- 3 Beiträge der Untertagebauten zur Nachhaltigkeit
- 4 Wege zum nachhaltigen Untertagebau
- 5 Projektbewertung
- 6 Fazit und offene Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung
- 7 Verweise

Anhang A: Kriterien und Indikatoren für Nachhaltigkeitsbewertungen

Anhang B: Projektbeispiele

Teil 2 – Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase

Abkürzungen

Glossar

Präambel

- 1 Grundlagen
- 2 Geltende Normen
- 3 Vorgehensweise zu Ökobilanzierung
- 4 Empfehlungen zur einheitlichen Treibhausgasbilanzierung im Untertagebau
- 5 Beispiele zur Treibhausgasbilanzierung
- 6 Monitoringkonzept zur Treibhausgasbilanzierung in der Bauausführung
- 7 Fazit
- 8 Verweise

Anhang A: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise

Anhang B: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen einschaltigen Tunnel in Tübbingbauweise

Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Folgenden auf die gleichzeitige Verwendung weiblicher, männlicher oder neutraler Sprachformen verzichtet und das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.

Inhalt

Abkürzungen	7	A/5 Wirkungsabschätzung	40
Glossar.....	8	A/5.1 Baugruppe „Ausbruch“	40
Präambel.....	9	A/5.2 Baugruppe „Sicherheit“	40
1 Grundlagen.....	10	A/5.3 Baugruppe „Innenschale“	41
2 Geltende Normen	12	A/5.4 Baugruppe „Innenausbau“	43
3 Vorgehensweise zur Ökobilanzierung	14	A/5.5 Gesamtbilanz nach Baugruppen	43
4 Empfehlungen zur einheitlichen THG- Bilanzierung im Untertagebau	16	A/5.6 Analyse der Lebenszyklusmodule.....	44
5 Beispiele zur Treibhausgasbilanzierung	20	A/6 Auswertung	45
5.1 Beispiel für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise (SBW).....	20	ANHANG B: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise	47
5.2 Beispiel für einen einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise (TBM)	21	B/1 Allgemeine Vorbemerkungen.....	47
5.3 THG-Emissionen bei verschiedenen Tunnelbauprojekten	23	B/2 Projektbeschreibung	47
6 Monitoringkonzept zur THG-Bilanzierung in der Bauausführung	24	B/3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	48
7 Fazit.....	24	B/3.1 Definition des Bauwerktyps	48
8 Verweise.....	24	B/3.2 Definition der berücksichtigten Lebenszyklusphasen	48
Anhänge.....	27	B/3.3 Definition des Betrachtungszeitraums.....	48
ANHANG A: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise.....	29	B/3.4 Definition der funktionellen Einheit.....	48
A/1 Allgemeine Vorbemerkungen.....	29	B/3.5 Definition des funktionalen Äquivalents	48
A/2 Projektbeschreibung	29	B/3.6 Definition der Systemgrenzen.....	48
A/3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	30	B/4 Sachbilanz	53
A/3.1 Definition des Bauwerktyps	30	B/4.1 Datenerhebung.....	53
A/3.2 Definition der berücksichtigten Lebenszyklusphasen	30	B/4.2 Emissionsfaktoren – Treibhausgase	56
A/3.3 Definition des Betrachtungszeitraums.....	30	B/4.3 Ergebnisse der Sachbilanz.....	57
A/3.4 Definition der funktionellen Einheit.....	30	B/5 Wirkungsabschätzung	58
A/3.5 Definition des funktionalen Äquivalents	30	B/5.1 Baugruppe „Ausbruch“	58
A/3.6 Definition der Systemgrenzen.....	30	B/5.2 Baugruppe „Sicherheit“	58
A/4 Sachbilanz.....	35	B/5.3 Baugruppe „dauerhafter Ausbau“	59
A/4.1 Datenerhebung.....	35	B/5.4 Baugruppe „Innenausbau“	60
A/4.2 Emissionsfaktoren – Treibhausgase	35	B/5.5 Baugruppe „Baustelleneinrichtung“	61
A/4.3 Ergebnisse der Sachbilanz.....	39	B/5.6 Baugruppe „Dauerhafter Ausbau“	61
		B/5.7 Analyse der Lebenszyklusphasen.....	62
		B/6 Auswertung	63

Abkürzungen

ABBV	Ablösebeträge-Berechnungsverordnung
ADPE	Abiotic depletion potential for non-fossil resources (Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für nichtfossile Ressourcen)
ADPF	Abiotic depletion potential for fossil resources (Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für fossile Ressourcen)
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CBD	Convention on Biological Diversity
CEN	European Committee for Standardization
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente
CO₂Eq/cap	CO ₂ -Äquivalente pro Kopf
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EP	Eutrophication Potential (Eutrophierungspotenzial)
EPD	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)

GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
IBU	Institut Bauen und Umwelt e. V.
KSG	Klimaschutzgesetz
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LCI	Life Cycle Inventory Analysis (Sachbilanz)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonschichtabbaupotenzial)
PCR	Product Category Rules (Produktkategorie-Regeln)
PENRT	Primary energy non-renewable, total use (nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf)
PERT	Primary energy renewable, total use (erneuerbarer Primärenergiebedarf)
SDG	Sustainable Development Goal (Nachhaltigkeitsziel)
THG	Treibhausgas

Glossar

Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)	<p>Deutsches Bundesgesetz, das die Erfüllung der nationalen Klimaschutzziele sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben gewährleisten soll. Mit dem Klimaschutzgesetz wurden die im Klimaschutzplan 2050 festgelegten Klimaschutz- und Sektorziele erstmals gesetzlich verankert. Demnach sollen die Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 65 % unter den Vergleichswert des Jahres 1990 gemindert werden, bis 2040 um mindestens 88 %. Im Jahr 2045 soll Netto-Treibhausgasneutralität erreicht werden.</p> <p>Grundlage bildet die Verpflichtung nach dem Übereinkommen von Paris aus dem Jahr 2015, wonach der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C und möglichst auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen ist, um die Auswirkungen des weltweiten Klimawandels so gering wie möglich zu halten.</p>
CEN/TC 350	<p>Das europäische technische Komitee „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ bietet einen standardisierten Ansatz für die Bereitstellung von Umweltinformationen über Bauprodukte, die Bewertung der ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Leistung neuer und bestehender Bauwerke (Gebäude und Bauwerke des Hoch- und Tiefbaus) und ganz allgemein für die Nachhaltigkeitsleistung von Bauwerken.</p>
CO₂-Äq.	<p>CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq., engl. CO₂e) sind eine Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase (Methan hat z. B. eine 28-fach größere Klimawirkung als CO₂, Lachgas übersteigt die von CO₂ sogar um beinahe das 300-fache).</p>
GWP	<p>Das Global Warming Potential (Treibhauspotenzial) ist ein Maß für den relativen Beitrag zum Treibhauseffekt, also die mittlere Erwärmungswirkung der Erdatmosphäre über einen bestimmten Zeitraum (in der Regel 100 Jahre: GWP100). Es gibt damit an, wie viel eine bestimmte Masse eines Treibhausgases im Vergleich zur gleichen Masse CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Das Treibhauspotential ist ein Kennwert mit der Dimension Zahl und dem Formelzeichen CO₂e bzw. CO₂-Äq.</p>
Treibhausgase (THG)	<p>Treibhausgase sind diejenigen Gase in der Erdatmosphäre, die den sogenannten Treibhauseffekt hervorrufen. Treibhausgase können einen natürlichen, aber auch einen anthropogenen (menschengemachten) Ursprung haben.</p> <p>Als Treibhausgase werden Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O), fluorierte Treibhausgase (F-Gase), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF₆) und Stickstofftrifluorid (NF₃) erfasst.</p>

Präambel

Nachhaltiges Bauen ist ein zentrales Zukunftsthema und durchdringt sowohl die Gesellschaft als auch viele industrielle Prozesse. Es umfasst alle Fachgebiete und vernetzt die Bauindustrie auch mit anderen Industrien, wie z. B. der Energiewirtschaft.

Der Nachhaltigkeitsgedanke basiert auf dem Dreisäulenmodell, bei dem die Hauptkriterien Ökologie, Ökonomie und Soziales im gleichen Maß berücksichtigt werden und sich gegenseitig beeinflussen können. Die Ökologie gilt als Grundstein des Nachhaltigkeitsgedankens und hat über die Ökobilanz einen direkten Bezug zum Klimaschutz. Eine Ökobilanz schätzt, in Übereinstimmung mit dem festgelegten Ziel und Untersuchungsrahmen, auf systematische Weise die Umweltaspekte und -wirkungen von Bauwerken ab. Hierfür müssen verschiedene Umweltindikatoren untersucht werden. Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) ist dabei am weitesten verbreitet und wird am häufigsten für Bewertungen und Optimierungen herangezogen. Die Treibhausgasbilanzierung ist ein Teil der Ökobilanz.

Um die drei Säulen der Nachhaltigkeit bewerten zu können, gibt es verschiedene Methoden und Wege.

Die Ökonomie kann mittels einer Lebenszykluskostenanalyse bewertet werden. Hier werden nicht nur die Herstellungskosten, sondern auch die Kosten für Betrieb, Instandhaltung und Instandsetzung erfasst. Mit den Erläuterungen und Arbeitshilfen der „Empfehlungen für die Ermittlung der Lebenszykluskosten für Tunnel“ des DAUB [1] ist es möglich, eine wissenschaftlich und praxisnah begründete Berechnung der Lebenszykluskosten eines Tunnels durchzuführen.

Für die Bewertung der sozialen Aspekte treffen im Untertagebau die üblichen Indikatoren nur teilweise zu [2]. Daher sind hierzu gesonderte Überlegungen erforderlich, z. B. in Form von Gutachten.

Die DAUB-Empfehlungen „Nachhaltigkeit im Untertagebau“ bestehen aus den folgenden zwei Teilen:

- Teil 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen und Lösungsansätze
- Teil 2: Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase

Es wird davon ausgegangen, dass diese Empfehlungen in den nächsten Jahren sukzessive an die sich weiterentwickelnden Anforderungen angepasst und um weitere Teile ergänzt werden.

Im vorliegenden Dokument werden als Teil 2 der DAUB-Empfehlungen „Nachhaltigkeit im Untertagebau“ Informationen und Hilfestellungen für die Durchführung einer Treibhausgasbilanzierung im Untertagebau für die Herstellungs- und Errichtungsphase bereitgestellt. Die Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz im Untertagebau erläutert allgemeingültige Grundsätze und Methoden für nachhaltiges Planen und Bauen und dient als Arbeitshilfe für die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in der Herstellungs- und Bauphase von Untertagebauwerken und soll Bauherren und Planern eine einheitliche Berechnung ermöglichen.

Die Berechnung einer Gesamtbilanz der Treibhausgasemissionen in der Nutzungsphase ist eine komplexe Aufgabe. Hierbei werden Emissionen aus der Nutzung (z. B. Energieverbrauch, Instandsetzung, Instandhaltung) positiven Effekten, die beispielsweise aus Verkehrsumlagerungen im Netzausschnitt resultieren, gegenübergestellt. Für eine genaue Berechnung solcher Bilanzen fehlt derzeit noch die entsprechende Datengrundlage. Daher ist sie noch nicht Bestandteil dieser Empfehlung.

Es werden zwei konkrete Beispiele für die Treibhausgasbilanzierung von Untertagebauwerken vorgestellt. Diese Beispiele sollen veranschaulichen, wie bei einer Treibhausgasbilanzierung von Untertagebauwerken vorgegangen werden kann.

1 Grundlagen

Nachfolgend werden wichtige Begriffe, die im Zusammenhang mit einer Treibhausgasbilanzierung stehen, erläutert.

Die **Ökobilanz** (en: LCA – Life Cycle Assessment) ist eine Methode zur Erfassung der Umweltwirkungen eines Produktsystems, z. B. eines Gebäudes oder Ingenieurbauwerks. Sie besteht aus der Erfassung aller Prozessschritte und der Mengenermittlung aller Input- und Outputströme von Energien, Stoffen, Transporten und Emissionen, die zur Herstellung bis zur Entsorgung des Produktes benötigt werden.

Die **Treibhausgasbilanzierung** (en: Carbon Footprint; im Deutschen umgangssprachlich auch CO₂-Fußabdruck oder CO₂-Bilanzierung genannt) umfasst die Menge der Treibhausgasemissionen, die durch ein Unternehmen, ein Produkt oder eine Dienstleistung entstehen. Bei den Produkten und Leistungen wird hierbei der gesamte Lebenszyklus bzw. die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet. Gleich mehrere Treibhausgase tragen zum Klimawandel bei und das unterschiedlich stark. Das Kyoto-Protokoll [3] nennt folgende Treibhausgase: Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O), sowie die fluorierten Treibhausgase (F-Gase), wie wasserstoffhaltige Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), und Schwefelhexafluorid (SF₆). Seit 2015 wird Stickstofftrifluorid (NF₃) zusätzlich einbezogen. Je nach Aktivität können mehrere unterschiedliche Treibhausgase emittiert werden. Um die Klimawirkung einzelner Treibhausgase miteinander zu vergleichen und zusammenzufassen, werden diese mithilfe des **globalen Erwärmungspotentials** (en: GWP – Global Warming Potential) umgerechnet in CO₂-Äquivalente (CO₂-Äq.). Das GWP normiert die Wirkung aller Treibhausgase auf das am meisten von Menschen emittierte Treibhausgas CO₂. Dieses erhält den GWP-Wert 1. Methan ist beispielsweise pro Molekül ungefähr 28-mal so klimawirksam wie CO₂ und hat daher ein GWP von 28 CO₂-Äq. [4].

Lebenszykluskosten (en: LCC – Life Cycle Cost) sind Kosten, die ein Bauwerk oder ein Teil eines Bauwerks über seinen gesamten Lebenszyklus verursacht. Eine Lebenszykluskostenanalyse beinhaltet die Planung, Realisierung, Bewirtschaftung und die Prozesse am Ende des Lebenszyklus.

Die **Wirkungsabschätzung** (en: LCIA – Life Cycle Impact Assessment) ist ein Teil der Ökobilanz, die dazu dient, das Ausmaß und die Bedeutung der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems, während seines gesamten Lebenszyklus zu identifizieren und zu bewerten.

Die **Sachbilanz** (en: LCI – Life Cycle Inventory analysis) ist ein Teil der Ökobilanz, die die Inputs und

Outputs eines Produkts während seines Lebenszyklus zusammenstellt und quantifiziert.

Die **Sensitivitätsanalyse** ist ein Teil der Ökobilanz und versucht die Auswirkungen der getroffenen Auswahl an Methoden und Daten auf die Ergebnisse einzuschätzen [5]. Die Sensitivitätsanalyse soll Aufschluss darüber geben, welchen Einfluss bestimmte Eingabeparameter oder Festlegungen, die mit Unsicherheiten behaftet sind, auf das Gesamtergebnis haben oder haben könnten. Der erforderliche Detaillierungsgrad der Sensitivitätsanalyse hängt im Wesentlichen von den Ergebnissen der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung ab, sofern eine solche durchgeführt wurde.

Die **Systemgrenze** bestimmt, welche Prozesse des Untersuchungsgegenstands berücksichtigt werden.

Die **zeitliche Systemgrenze** legt den zeitlichen Rahmen der Ökobilanz fest. Als zeitlicher Rahmen werden alle Lebenszyklusphasen des Bauwerks einschließlich ausgewählter Aspekte des Rückbaus betrachtet. Die Lebenszyklusbetrachtung erfolgt auf Basis der Ist-Daten der Errichtung, die mit den Prognosedaten der Nutzungs- und Rückbauphase zu kombinieren sind. Gemäß Ablösebeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) [6] ist für Tunnel ein Betrachtungszeitraum von 90 bis zu 130 Jahren für die Berechnungen anzusetzen.

Die **räumliche Systemgrenze** legt im Detail fest, welche Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Ingenieurbauwerks in der Ökobilanz berücksichtigt werden (z. B. beim Tunnelbauwerk: alle Arbeiten zur Herstellung der Innenschale). Die Wahl der räumlichen Systemgrenze muss im Einklang mit dem Ziel der Studie stehen.

Der **Lebenszyklus** besteht aus aufeinanderfolgenden und miteinander in Beziehung stehenden Phasen des betrachteten Objekts. Er wird nach DIN EN 17472 [7] in fünf Lebenszyklusphasen eingeteilt. Die Planungsphase (Modul A0) wird aufgrund ihrer vernachlässigbaren Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanzierung hier nicht weiter berücksichtigt. Die Herstellungsphase besteht aus 3 Modulen (A1–A3), die Errichtungsphase aus 2 Modulen (A4, A5), die Nutzungsphase aus 5 Modulen (B1–B5) und das Ende der Nutzungsphase aus 4 Modulen (C1–C4). Ergänzend werden in einem Modul D die Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze zusammengefasst (**Abbildung 1-1**).

Die **funktionelle Einheit** legt die Quantifizierung der spezifizierten Funktionen (Leistungsmerkmale) des Produkts fest. Eine funktionelle Einheit dient in erster Linie dazu, eine Bezugsgröße zu schaffen, auf die Input- und Outputströme bezogen werden können (z. B. kg CO₂-Äq. pro Tunnelmeter oder kg CO₂-Äq. pro m³ Ausbruchsmenge).

Bei dem **funktionalen Äquivalent** handelt es sich um eine Darstellung der geforderten technischen

Merkmale und Eigenschaften sowie der Funktionalitäten des Bauwerks.

Umweltwirkungen eines Produktsystems werden durch Umweltindikatoren ausgedrückt. In DIN EN 15978-1 [8] werden 39 Indikatoren zu Bewertung der Umweltwirkungen genannt. Bei der Treibhausgasbilanz wird der Umweltindikator GWP betrachtet. Für eine ganzheitliche Betrachtung ist es allerdings nicht ausreichend, nur Treibhausgasemissionen einzubeziehen; vielmehr sollten weitere **Umweltindikatoren** berücksichtigt werden. Diese werden im Folgenden beschrieben.

- Das **Ozonabbaupotenzial** (en: OPD – Depletion potential of the stratospheric ozone layer) beschreibt den Effekt der Reduzierung der Ozonkonzentration in der Stratosphäre (Ozonloch). ODP wird in kg CFC11-Äquivalent angegeben. ODP stellt das Verhältnis der Fähigkeit von Fluorchlorkohlenwasserstoffen in der Atmosphäre, die Ozonschicht zu zerstören, zur Fähigkeit von R11, die Ozonschicht zu zerstören, und dem ODP von R11 = 1,0 dar [9].
- Das **Eutrophierungspotenzial** (en: EP – Eutrophication potential) beschreibt den Effekt des übermäßigen Eintrags von Nährstoffen in Boden und Wasser (Überdüngung). EP wird in kg PO₄³⁻-Äquivalent angegeben. Überdüngung bzw. Eutrophierung gibt die Menge von Nährstoffeinträgen in einem Ökosystem an. In überdüngten Gewässern kann es zu vermehrtem Algenwachstum und Fischsterben, bis zum biologischen Kollaps des Gewässers kommen. Überdüngte Pflanzen weisen eine Schwächung des Gewebes und eine geringere Resistenz gegen Umwelteinflüsse auf. Ein hoher Nährstoffeintrag führt außerdem zur Nitratanreicherung im Grund- und

Trinkwasser, wo es zu für Menschen giftigem Nitrit reagieren kann. Zur Überdüngung tragen Phosphor und Stickstoff, zum Beispiel aus Düngemitteln oder Haushalts- und Industrieabwässern, bei [9], [10].

- Das **Versauerungspotenzial** (en: AP – Acidification potential of land and water) beschreibt den Effekt der Versauerung und wird in kg SO₂-Äq. angegeben. Als Versauerung wird die Verringerung des pH-Werts von Niederschlag durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren (saurer Regen) bezeichnet. Dies führt zu Waldschäden (Waldsterben) und der Versauerung von Böden. An Gebäuden können durch die Korrosion von Metallen und die Zersetzung von Naturstein Schäden entstehen. Zur Versauerung tragen hauptsächlich die Emissionen aus der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Brennstoffe wie Kohle und Öl bei, sowie Stickoxide, die ebenfalls bei Verbrennungsprozessen freigesetzt werden [9], [10].
- Das **Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für nichtfossile Ressourcen** (en: ADPE – Abiotic depletion potential for non-fossil resources) beschreibt die Verminderung des globalen Bestandes an nicht erneuerbaren Rohstoffen (Erde, Stein, Kies, Metalle, Mineralien etc.). ADPE wird, bezogen auf das sehr selten vorkommende Element Antimon, in kg Sb-Äq. angegeben [10].
- Das **Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für fossile Ressourcen** (en: ADPF – Abiotic depletion potential for fossil resources) beschreibt die Verminderung des globalen Bestandes an fossilen Brennstoffen (Erdöl, Erdgas, Kohle etc.). Es wird, wie der Primärenergieverbrauch,

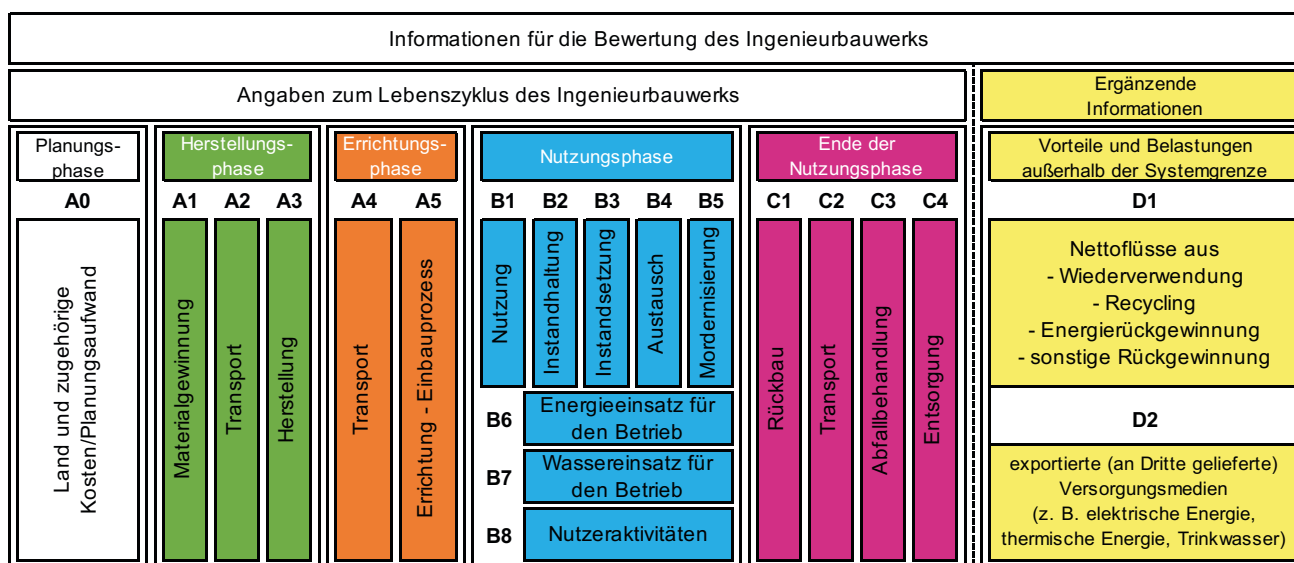


Abbildung 1-1 Informationsmodule, die bei der Bewertung der umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität eines Ingenieurbauwerks angewendet werden (in Anlehnung an DIN EN 17472:2024-06 [7])

in Megajoule (MJ) angegeben und aus dem unteren Heizwert berechnet [10].

Der **nicht erneuerbare Primärenergiebedarf** (en: PENRT – total use of non-renewable primary energy resources) beschreibt den Energiebedarf aus nicht erneuerbaren Quellen (z. B. fossile Brennstoffe) und wird in MJ angegeben [9]. Der **erneuerbare Primärenergiebedarf** (en: PERT – total use of renewable primary energy resources) beschreibt den Energiebedarf aus erneuerbaren Quellen und wird ebenfalls in MJ angegeben [9].

Die Umweltindikatoren eines bestimmten Produkts werden in Form von neutralen und objektiven Daten in den **Umweltproduktdeklarationen** (en: EPD – environmental product declaration) angegeben. Diese Daten decken möglichst alle Auswirkungen ab, die das Produkt auf seine Umwelt haben kann. Dabei wird im Idealfall der gesamte Lebensweg des Produktes berücksichtigt. Ein großer Vorteil von EPDs ist die Möglichkeit einheitliche und international zugängliche, ökobilanzierte Informationen zur Umweltwirkung zur Verfügung zu stellen. Diese Informationen können z. B. Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch oder den Recyclinganteil betreffen. Aussagen zu Umweltauswirkungen wie Überdüngung, Treibhauseffekt oder Ozonabbau sowie zu toxischen Wirkungen auf Menschen und Umwelt sind ebenfalls beschrieben. In der **Abbildung 1-2** sind die EPD-Arten dargestellt.

Als **Datengrundlage für die Umweltindikatoren** werden in Deutschland häufig die öffentlich zugänglichen Datenbanken „Ökobaudat“ und die des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (IBU) genutzt, auf internationaler Ebene die öffentlich zugängliche „EPD-Norge Digi“, die „EPD Library International“, die „ECO-Plattform“ oder die kommerzielle Datenbank „Sphera“.

Die **Ökobaudat** ist eine Plattform des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Kern der Plattform ist die Online-Datenbank mit Ökobilanzdatensätzen zu Baustoffen, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen. Sie umfasst mehr als 1.700 Datensätze mit unterschiedlichem Präzisionsgrad und Umfang. Es werden sowohl generische Datensätze als auch firmen- oder verbandspezifische Datensätze aus Umweltproduktdeklarationen angeboten.

Das **IBU** stellt seinen Mitgliedern seit vielen Jahren ein branchenübergreifendes Programm zur Veröffentlichung von verifizierten Umweltproduktdeklarationen für gebäudebezogene Produkte und Dienstleistungen zur Verfügung. Zu den Mitgliedern des IBU zählen derzeit über 210 nationale und internationale Unternehmen sowie Verbände aus allen Bereichen der Baubranche, die aktuell über 1.800 EPDs veröffentlicht haben. In **Tabelle 1** ist ein Ausschnitt aus einer EPD für einen unbewehrten Konstruktionsbeton der Festigkeitsklasse C20/25 zu sehen [12].

2 Geltende Normen

In den letzten Jahrzehnten wurden im Bereich Nachhaltigkeit und speziell zur Nachhaltigkeit von Bauwerken eine Reihe von Normen auf internationaler (ISO), auf europäischer (CEN) und auf nationaler Ebene (DIN) entwickelt. Diese Normen sind für die Herstellung einheitlicher Bewertungsgrundlagen und Vorgehensweisen für die Nachhaltigkeitsbewertung im Allgemeinen und der Bauwerke im Speziellen wichtig. Die Normen geben die Rahmenbedingungen, Kriterien und Bewertungs- sowie Berechnungsmethoden

	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	C1	C2	C3	C4	D
Wiege bis Werktor mit C1–C4+D	P	P	P											P	P	P	P	P
Wiege bis Werktor mit Optionen C1–C4+D	P	P	P	O	O	O	O	O	O	O	O	O		P	P	P	P	P
Wiege bis Bahre	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P		P	P	P	P	P
Wiege bis Werktor *	P	P	P															
Wiege bis Werktor mit Optionen *	P	P	P	O	O									P	Pflichtangabe			
														O	Optionale Angabe			

* nur in Ausnahmefällen möglich

Abbildung 1-2 Arten der EPD nach einbezogenen Phasen des Lebenszyklus und Module für die Bewertung von Bauwerken [11]

Tabelle 1 Beispiel einer EPD für Beton C20/25 und den darin aufgeführten Phasen und Indikatoren [12]

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; ND = MODUL ODER INDIKATOR 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	X	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ – UMWELTAUSWIRKUNGEN nach EN 15804+A2: 1 m³ Konstruktionsbeton C20/25												
Indikator	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	C4	D		
GWPTotal	kg CO ₂ Äq.	157	3,75	0,874	14	3,32	10,3	5,05	ND	12,1		
GWPFossil	kg CO ₂ Äq.	157	3,72	0,862	14	3,3	10,3	4,99	ND	12		
GWPbiogenic	kg CO ₂ Äq.	0,281	0,0134	0,012	0	0,0015	0,00371	0,0505	ND	0,106		
GWPluluc	kg CO ₂ Äq.	6,3E02	1,41E02	3,02E04	0	1,22E02	3,93E02	1,14E02	ND	2,02E02		
ODP	kg CFC11Äq.	3,68E08	7,53E13	2,02E11	0	6,47E13	2,09E12	7,61E11	ND	1,5E10		
AP	mol H ⁺ Äq.	0,278	0,0139	0,00124	0	0,0156	0,0357	0,0167	ND	0,029		
EPfreshwater	kg PÄq.	1,89E04	7,32E06	3,99E06	0	6,3E06	2,03E05	1,91E05	ND	4,02E05		
EPmarine	kg NÄq.	8,64E02	6,6E03	3,99E04	0	7,42E02	1,69E02	7,44E03	ND	1,11E02		
EPterrestrial	mol NÄq.	1,01	0,0728	0,00414	0	0,082	0,188	0,0814	ND	0,125		
POCP	kg NMVOC Äq.	0,241	0,0143	0,000973	0	0,0208	0,0355	0,0204	ND	0,0269		
ADPE	kg SbÄq.	1,39E05	3,69E07	4,24E07	0	3,17E07	1,02E06	1,85E06	ND	3,67E06		
ADPF	MJ	826	48,7	11	0	41,9	135	65,3	ND	156		
WDP	m ³ WeitÄq. entzogen	2,93	0,0158	0,0207	0	0,00153	0,0438	0,0073	ND	2,94		

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); WDP = WasserEntzugspotenzial (Benutzer)

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ – INDIKATOREN ZUR BESCHREIBUNG DES RESSOURCENEINSATZES nach EN 15804+A2: 1 m³ Konstruktionsbeton C20/25										
Indikator	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	C1	C2	C3	C4	D
PERE	MJ	189	3,2	9,32	0	2,76	8,9	36,8	ND	73
PERM	MJ	0	0	0	0	0	0	0	ND	0
PERT	MJ	189	3,2	9,32	0	2,76	8,9	36,8	ND	73
PENRE	MJ	827	48,7	11	0	41,9	135	65,3	ND	157
PENRM	MJ	0	0	0	0	0	0	0	ND	0
PENRT	MJ	827	48,7	11	0	41,9	135	65,3	ND	157
SM	kg	2,8	0	0	0	0	0	0	ND	2,36E+03
RSF	MJ	122,3	0	0	0	0	0	0	ND	0
NRSF	MJ	287,8	0	0	0	0	0	0	ND	0
FW	m ³	0,91	0,052	0,02	0	0,04	0,14	0,1	ND	1,49

PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nichterneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nichterneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen

vor, die für die Integration der Nachhaltigkeitsgrundsätze bei der Nachhaltigkeitsbewertung der Bauwerke einzuhalten sind. Nachfolgend werden die wichtigsten Normen kurz erläutert.

DIN EN 15643 [13] gehört zu einer Reihe von Europäischen Normen, die vom CEN/TC 350 erarbeitet wurden und ein System für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken zur Verfügung stellen. **Abbildung 2-1** zeigt die Integrati-

on der Bewertung der Ökologie, der Ökonomie und des Sozialen in das Konzept der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken.

DIN EN 17472 [7] definiert die Voraussetzungen und spezifischen Methoden zur Evaluierung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Qualität eines Ingenieurbauwerks unter Betrachtung der Funktionalität sowie der technischen Charakteristika und Eigenschaften des Ingenieurbauwerks.

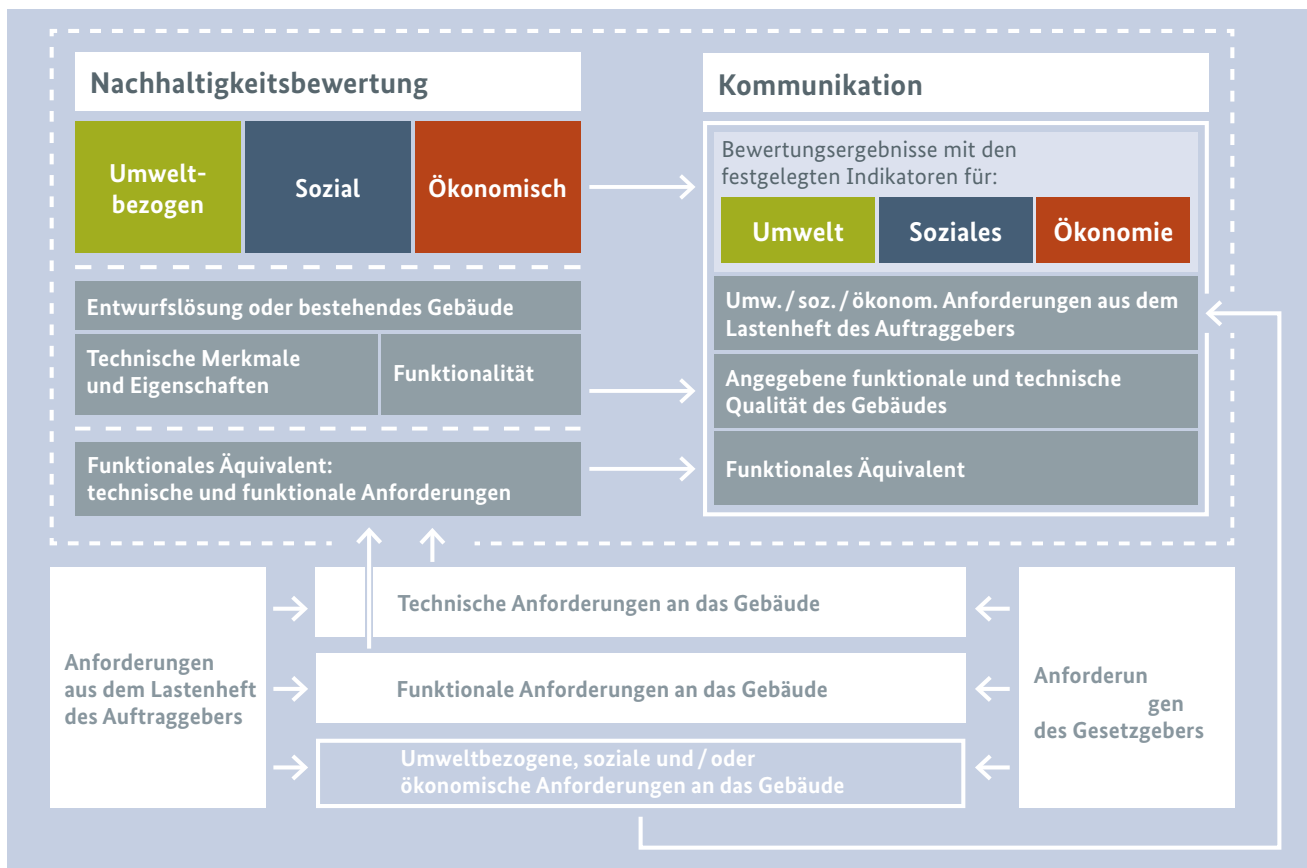


Abbildung 2-1 Konzeption der Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Ingenieurbauwerken [14]

DIN EN 15804 [15] legt grundlegende Produktkategorie-Regeln (PCR) für Typ III "Umweltdeklarationen für Bauprodukte und Bauleistungen aller Art" fest. Sie bietet eine Grundlage, um sicherzustellen, dass alle Umweltproduktdeklarationen (EPDs) für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse einheitlich erstellt, geprüft und präsentiert werden. Die neue Norm EN 15804+A2, bringt einige wesentliche Änderungen für EPDs von Bauprodukten. Die sichtbarste dieser Änderungen ist die verpflichtende Berücksichtigung der Module C (Rückbau, Wiederverwendung, Entsorgung) und D (Gutschriften und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen), die in der Vorgängernorm EN 15804+A1 noch optional ist. Darüber hinaus werden bei der Wirkungsabschätzung, überarbeitete Faktoren und teilweise neue Modelle vorgeschrieben.

DIN EN 15978 [8] bietet eine Berechnungsmethode auf der Grundlage der Ökobilanz und anderer quantifizierter Umweltdaten zur Bewertung der Umweltqualität eines Gebäudes sowie Hilfsmittel zur Berichterstattung und Kommunikation der Ergebnisse dieser Bewertung.

Die Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse nach **DIN EN ISO 14040** [5] dient dazu, die potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems über den gesamten Lebensweg zu beurteilen.

DIN EN ISO 14044 [16] legt Anforderungen an eine Ökobilanz fest und liefert Anleitungen für deren Erstellung. Sie umfasst Ökobilanz-Studien und Sachbilanz-Studien.

3 Vorgehensweise zur Ökobilanzierung

Eine Ökobilanz gliedert sich nach DIN EN ISO 14040 [5] und DIN EN ISO 14044 [16] in vier Phasen (siehe **Abbildung 3-1**):

In **Phase 1** werden **Ziel und Untersuchungsrahmen** definiert, Untersuchungsgegenstand und andere Maßnahmen werden beschrieben (Bauwerkstyp, Lebenszyklusmodule, Betrachtungszeitraum, funktionelle Einheit, Systemgrenzen).

In **Phase 2**, die sogenannte **Sachbilanz**, werden alle ein- und ausgehenden Stoffflüsse (In- und Outputs) des untersuchten Gegenstands ermittelt. Zentrale Aufgabe der Sachbilanz ist die Erstellung des Produktsystems und Erstellung von Massen- und Energiebilanzen für die verwendeten Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe sowie für Rohstoffgewinnung und Herstellungs-, Verarbeitungs- und Transportprozesse.

In **Phase 3**, die sogenannte **Wirkungsabschätzung**, werden die ermittelten Stoffflüsse quantifiziert und Umweltauswirkungen zugeordnet. Ziel dieses Schrittes ist, eine umfassende Beurteilung aller Umweltwirkungen zu ermöglichen und unterschiedliche Wirkungen auf die Umwelt miteinander vergleichbar zu machen.

Phase 4 ist die Phase der **Auswertung** bzw. Interpretation. Hier werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung überprüft und ausgehend vom Zweck der Ökobilanzierung interpretiert und dargestellt. Aus den Ergebnissen werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen für die Optimierung der Planung abgeleitet sowie diese in einem Bericht dargestellt.

Die ersten drei Phasen sind aufeinander folgend, wobei jede mit der jeweils vorherigen Phase in Wechselwirkung steht. Die Phase "Auswertung" steht mit jeder der drei anderen Phasen in Wechselwirkung. Die Ergebnisse eine Ökobilanz werden iterativ erarbeitet.

Der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens kommt eine große Bedeutung zu und hat wesentlichen Einfluss auf alle weiteren Schritte. Als mögliche Ziele der Ökobilanz gelten:

- die Identifikation der Umweltrelevanz (z. B. von Entscheidungen, Aktivitäten, Materialien und Prozessen),
- die Identifikation von Umwelloptimierungspotenzialen,
- die Erstellung eines Umweltleistungszertifikats,
- die Sensibilisierung für Umweltthemen.

Die isolierte Betrachtung eines Tunnelbauwerks oder die einer ganzen Trassenvariante einschließlich Tunnel und Brückentragwerken etc. erfordert unterschiedliche Systemgrenzen. Beim Vergleich verschiedener Fahrbahnaufbauten (z. B. Beton vs. Asphalt) gelten an-

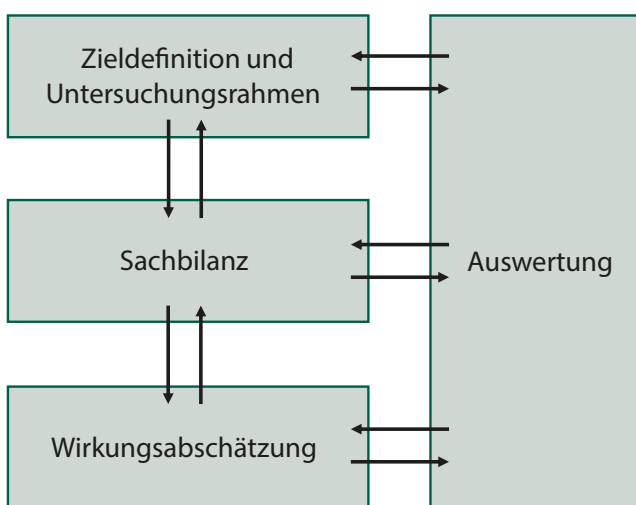


Abbildung 3-1 Phasen einer Ökobilanz (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040 [5])

dere Systemgrenzen als beim Vergleich verschiedener Vortriebsmethoden oder Bauweisen im Tunnelbau. Wie auch bei der Gebäudebewertung ist es wichtig, für ganzheitliche Bewertungen in ökologischer, ökonomischer und soziokultureller Hinsicht identische Systemgrenzen festzulegen.

Die Einzigartigkeit der Herausforderungen beim Untertagebau erschwert die Ökobilanzierung für diese Bauwerkstypen. Eine der Bestrebungen ist es, die maßgebenden Treiber einer Ökobilanz im Untertagebau zu identifizieren und quantitativ zu bestimmen.

Typische Anteile der Treibhausgasemissionen sind in **Tabelle 2** differenziert nach den verschiedenen Ursachen beispielhaft dargestellt [17].

Für den Bahnbau hat die Deutsche Bahn bisher noch keine feste Methodik für die Treibhausgasbilanzierung etabliert. Bahnintern wurde eine Methode entwickelt, die sich an der Vorgehensweise des BVWP orientiert und insbesondere in den frühen Leistungsphasen Anwendung finden soll. Diese Methode, basierend auf der Studie des Ökoinstituts, unterscheidet sich von der BVWP-Methode durch eine spezifische Differenzierung nach Bauwerken in Gleistrassen, Brücken und Tunneln.

Zukünftig ist eine Weiterentwicklung der DB-internen Methodik basierend auf Building Information Modeling (BIM) geplant, die insbesondere in späteren Leistungsphasen Anwendung finden soll. Das Ziel ist, im Rahmen von GreenBIM, modellbasierte Berechnungsverfahren für die CO₂-Bilanzierung zu entwickeln und die Visualisierung von Treibhausgasemissionen zu ermöglichen. Diese modellbasierte Methodik zeichnet sich durch eine präzise Betrachtung auf Bauteilebene aus, indem sie die Baustoffmenge mit dem entsprechenden Emissionsfaktor des Baustoffs (Input aus Umweltproduktdeklarationen) multipliziert.

Tabelle 2 Anteil der Ursachen an den Gesamtemissionen

Ursache	Anteil der Gesamtemissionen
Einsatz von Baumaterial	60–75 %
Errichtungsprozesse (Baumaschinen)	25–30 %
Transport	5–10 %
Baustelleneinrichtung	< 5 %

4 Empfehlungen zur einheitlichen THG-Bilanzierung im Untertagebau

Im Zuge dieser Empfehlungen werden in der Treibhausgasbilanzierung ausschließlich die Lebenszyklusphasen "Herstellungsphase" (Module A1–A3) und "Errichtungsphase" (Module A4–A5) berücksichtigt (siehe **Abbildung 4-1** in grün und orange markiert sowie **Tabelle 3**). Diese Phasen umfassen die Leistungen zur Herstellung eines Untertagebauwerks von der Rohstoffproduktion bis zum fertigen Untertagebauwerk. Dies ist zulässig, soweit die Berechnungen dazu dienen, unterschiedliche Tunnelbauweisen miteinander zu vergleichen.

Die Berücksichtigung der Module der Nutzungs- und Rückbau- bzw. Umnutzungsphase kann erforderlich werden, wenn sich für den Vergleich hieraus relevante Aspekte ergeben. Dies gilt insbesondere für den Vergleich von unterirdischen und oberirdischen Lösungen. Die Vorteile außerhalb der Systemgrenze (Modul D), wie zum Beispiel die Gewinnung von Geothermie in unterirdischen Bauwerken durch Wärmetauscher in der Tunnelschale, müssen gesondert ausgewiesen werden. Sie dürfen nicht in der Gesamtbilanz mit aufsummiert werden, da es sich hierbei lediglich um ein Potential handelt und dies außerhalb der Systemgrenze liegt.

In den Modulen A1–A3 sollten alle Materialien bilanziert werden, die im Untertagebauwerk verbleiben. Modul A4 bildet die Transporte der Baumaterialien auf die Baustelle ab. In Modul A5 sollten alle Materialien, die nicht im Untertagebauwerk verbleiben (z. B. Bohrgestänge, Sicherungsmittel die wieder ausge-

Tabelle 3 Lebenszyklusmodule für die Herstellung und Errichtung

Module	Aktivitäten
A1 – A3	Herstellungsprozesse „von der Wiege bis zum Werktor“ für die beim Bau verwendeten Baumaterialien für Untertagebauwerke
A4	Transport von Baumaterialien ab Werk zur Baustelle des Untertagebauwerks
A5	An- und Abtransport Geräte, Erdarbeiten, Errichtungsprozesse für Untertagebau, Abtransport von Ausbruchmaterial

baut werden), sowie die Prozesse zur Herstellung des Untertagebauwerks bilanziert werden (hierzu zählt auch der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials). Für die Gesamtbilanz ist es jedoch unerheblich, welchen Modulen die einzelnen Emissionen zugeordnet werden. Die Zuordnung zu den Modulen ist in jedem Fall eindeutig zu beschreiben.

Die Systemgrenzen können grundsätzlich frei gewählt werden und sollten sich immer am Ziel der Treibhausgasbilanzierung orientieren.

Wird eine Treibhausgasbilanzierung bereits in der Planungsphase erstellt, sind die benötigten Baustoffmengen bekannt, sodass eine hohe Sicherheit bei der Bilanzierung für die Herstellphase (Module A1–A3) besteht. So können die Emissionen aus der Bereitstellung der Baustoffe sehr einfach durch Multiplikation der eingesetzten Baustoffmengen mit den jeweiligen

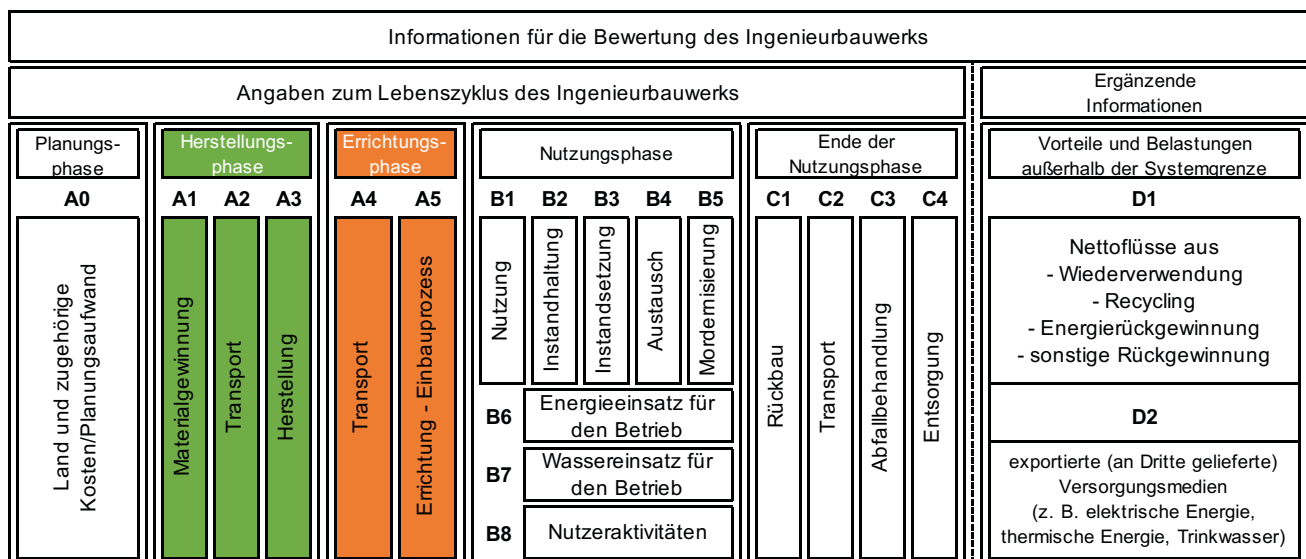


Abbildung 4-1 Fokus der Ökobilanzierung für die Empfehlung zur Einheitlichen CO₂-Berechnung für den Untertagebau (Quelle: in Anlehnung an DIN EN 17472:2024-06, S.31 [7])

spezifischen Emissionsfaktoren für die Module A1 bis A3 berechnet werden. Die Emissionen aus dem Transport der Baustoffe zur Baustelle (Modul A4), aus der Verarbeitung sowie aus sonstigen Bauprozessen (Modul A5) sind zwar relevant, aber zum Zeitpunkt der Planung des Bauwerks schwer abzuschätzen und sollten daher zunächst durch Erfahrungswerte berücksichtigt werden.

Für die THG-Bilanzierung sind die tatsächlichen Verbrauchsmengen (Bruttomengen, theoretische Mengen inklusive Mehrverbrauch) zu verwenden. Um die Berechnung effizienter zu machen, dürfen Mengen, deren Auswirkungen auf das Gesamtergebnis der THG-Bilanzierung mit weniger als 5 % abzuschätzen sind, vernachlässigt werden [15]. Es wird empfohlen, bei der Zusammenstellung der Emissionsfaktoren zunächst auf die in Deutschland üblichen, öffentlich verfügbaren Datenbanken zurückzugreifen. Sollte dies nicht ausreichen, können vergleichbare internationale Datenbanken als nächste Option herangezogen werden. Als letzte Möglichkeit wird geraten, wenn möglich, kommerzielle Datenbanken zu verwenden.

Angaben zum Betrachtungszeitraum sind eher Erfahrungswerte. Im Tunnelbau geht man von 90 bis 130 Jahren Lebensdauer aus. Konkrete Angaben zum Betrachtungszeitraum aus der Planung bzw. Ausschreibung sind allgemeinen Erfahrungswerten vorzuziehen und zu berücksichtigen.

Als funktionelle Einheit wird Tunnelmeter und/oder Ausbruchvolumen empfohlen.

In den **Tabellen 4, 5 und 6** sind Beispiele der räumlichen Systemgrenze für verschiedene Untertagebauwerke mit unterschiedlichen Zielen der Ökobilanzierung aufgeführt.

Das Wassermanagement umfasst sämtliche Arten des Wasserverbrauchs und der Wasseraufbereitung auf der Baustelle, sowie eventuell notwendige Transporte von Brauchwasser zur Baustelle oder von unreinigtem Wasser zu Kläranlagen. Die Integration des Wassermanagements und der Baurestemassen/Bauabfälle in die Treibhausgasbilanzierung ist sehr komplex. Um die Treibhausgasbilanzierung in diesen Empfehlungen so einfach und nachvollziehbar wie möglich zu gestalten, werden das Wassermanagement und die Behandlung von Baurestemassen/Bauabfällen nicht in die Bilanz aufgenommen. Dennoch spielt der Umgang damit in Bezug auf die Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle, weshalb diese Themen für zukünftige Betrachtungen vorgesehen sind.

Die Bilanzierung von Baumaschinen- und Geräten ist ebenfalls ein sehr komplexes Thema. Diese werden im Tunnelbau in der Regel auf mehreren Baustellen eingesetzt, was eine korrekte Bilanzierung erschwert. Werden die Emissionen, die bei der Neuanschaffung eines Geräts anfallen, nur einem einzigen Projekt zugeordnet, führt dies zu einer erheblichen Überschät-

Tabelle 4 Beispiel für räumliche Systemgrenzen eines Tunnels in offener Bauweise

Herstellung des Gesamtprojekts

Ziel: Bilanzierung der THG-Emissionen für das **Gesamtprojekt**. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Gesamtprojekts, wie zum Beispiel:

- Baugrube (Bodenaushub, Baugrubenumschließungen, Verfüllung der Baugrube nach Fertigstellung der Arbeiten am Tunnelbauwerk)
- Tunnelbauwerk (Bewehrungsarbeiten, Betonarbeiten, Abdichtungsarbeiten, Entwässerungsarbeiten)
- Stationsbauwerke
- Gleisbau bzw. Fahrbahnbau
- Wassermanagement
- Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Büros, etc.)
- Baurestemassen und Bauabfälle
- Andere zum Gesamtprojekt zugehörige Ingenieurbauwerke (z. B. Brücken)

Herstellung des Tunnelrohbauwerks

Ziel: Hauptverursacher von THG-Emissionen bei der Herstellung von **Tunnelrohbauwerken** identifizieren. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbauwerks, wie zum Beispiel:

- Baugrube (Bodenaushub, Baugrubenumschließungen, Verfüllung der Baugrube nach Fertigstellung der Arbeiten am Tunnelbauwerk)
- Tunnelbauwerk (Bewehrungsarbeiten, Betonarbeiten, Abdichtungsarbeiten, Entwässerungsarbeiten)
- Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Büros, etc.)

zung der Projektemissionen. Stattdessen müssten die Emissionen aus der Neuanschaffung auf alle Projekte verteilt werden, in denen das Gerät in seiner Lebensdauer zum Einsatz kommt. Im Zuge dieser Empfehlungen werden in der Treibhausgasbilanzierung daher nur Maschinen- und Gerätekomponenten berücksichtigt, die keine Gebrauchtbestandteile sind und nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden können. Grundsätzlich kann die Systemgrenze so gewählt werden, dass die Herstellung der Baumaschinen- und Geräte außerhalb der Systemgrenzen liegt.

Die einzelnen Schritte für die Ökobilanzierung sind in **Tabelle 7** zusammengefasst.

Tabelle 5 Beispiel für räumliche Systemgrenzen eines Tunnels in Spritzbetonbauweise

Herstellung des Gesamtprojekts
<p>Ziel: Bilanzierung der THG-Emissionen für das Gesamtprojekt. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Gesamtprojekts, wie zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anschlagwände ▪ Tunnelbauwerk (Ausbrucharbeiten, Stützmitteleinbauarbeiten, Spritzbetonarbeiten, Bewehrungsarbeiten, Abdichtungsarbeiten, Entwässerungsarbeiten, Betonarbeiten) ▪ Querschläge, Schächte ▪ Bauliche Ausbaumaßnahmen (z. B. Sohlaufbeton, Randwege, Kabelschutzrohre usw.) ▪ Stationsbauwerke ▪ Sondermaßnahmen (z. B. Vereisung, HDI) ▪ Gleisbau bzw. Fahrbahnbau ▪ Wassermanagement ▪ Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Büros etc.) ▪ Baurestemassen und Bauabfälle ▪ Andere zum Gesamtprojekt zugehörige Ingenieurbauwerke (z. B. Brücken)
Herstellung des Tunnelrohbauwerks
<p>Ziel: Hauptverursacher von THG-Emissionen bei der Herstellung von Tunnelrohbauwerken identifizieren. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbauwerks, wie zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ausbrucharbeiten ▪ Stützmitteleinbauarbeiten ▪ Spritzbetonarbeiten ▪ Bewehrungsarbeiten ▪ Abdichtungsarbeiten ▪ Entwässerungsarbeiten ▪ Betonarbeiten ▪ Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Büros etc.)

Tabelle 6 Beispiel für räumliche Systemgrenzen eines TBM-Tunnels

Herstellung des Gesamtprojekts
<p>Ziel: Bilanzierung der THG-Emissionen für das Gesamtprojekt. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Gesamtprojekts, wie zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Anfahrkonstruktionen ▪ Zieleinfahrten ▪ Tunnelbohrmaschine ▪ Tunnelbauwerk (Ausbrucharbeiten, Ringbauarbeiten, Nachinjektionsarbeiten) ▪ Querschläge, Schächte ▪ Stationsbauwerke ▪ Bauliche Ausbaumaßnahmen (z. B. Sohlaufbeton, Randwege, Kabelschutzrohre usw.) ▪ Sondermaßnahmen (z. B. Vereisung, HDI) ▪ Gleisbau bzw. Fahrbahnbau ▪ Wassermanagement, Separationsanlage ▪ Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Tübbingfabrik, Mischanlage, Büros etc.) ▪ Baurestemassen und Bauabfälle ▪ Andere zum Gesamtprojekt zugehörige Ingenieurbauwerke (z. B. Brücken)
Herstellung des Tunnelrohbauwerks
<p>Ziel: Hauptverursacher von THG-Emissionen bei der Herstellung von Tunnelrohbauwerken identifizieren. Betrachtet werden müssen alle Prozesse und Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbauwerks, wie zum Beispiel:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tunnelbohrmaschine ▪ Tunnelbauwerk (Ausbrucharbeiten, Ringbauarbeiten, Nachinjektionsarbeiten) ▪ Baustelleneinrichtung (Lagerplätze, Werkstätten, Tübbingfabrik, Mischanlage, Büros etc.)

Tabelle 7 Schritte der Ökobilanzierung für Untertagebauwerke

Phasen nach DIN EN ISO 14044	Schritt	Prozess	Erforderliche Informationen
Phase 1 Ziel und Untersuchungsrahmen	1.	Identifizierung des Zwecks der Bewertung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ziel ▪ Anwendungsbereich ▪ vorgesehene Nutzung
	2.	Entscheidung, welche Umweltwirkungskategorien betrachtet werden sollen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ z. B. THG-Emissionen (GWP in kg CO₂-Äq. pro Einheit)
	3.	Festlegung des Bewertungsgegenstandes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Funktionales Äquivalent ▪ Funktionelle Einheit
	4.	Festlegung des Betrachtungszeitraumes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Referenz-Betrachtungszeitraum
	5.	Festlegung der Systemgrenze	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Berücksichtigte Lebenszyklusphasen ▪ Räumliche Systemgrenze
	6.	Nutzung und/oder Entwicklung von Szenarien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Szenarien für jede Phase des Lebenszyklus und über die Systemgrenze hinaus
Phase 2 Sachbilanz	7.	Quantifizierung aller Materialien und eingesetzter Energien	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nettomenge ▪ Bruttomenge
	8.	Auswahl von Umweltdaten und sonstigen maßgebenden Informationen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nutzung umweltbezogener Informationen ▪ Nutzung von EPD ▪ Ermittlung Emissionsfaktoren
Phase 3 Wirkungsabschätzung	9.	Berechnung der umweltbezogenen Indikatoren	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Jedes Produkt und jede Dienstleistung deren Bruttomengen in der Sachbilanz ermittelt wurden, sind mit den entsprechenden Emissionsfaktoren zu multiplizieren ▪ Analyse der Lebenszyklusphasen
Phase 4 Auswertung	10.	Auswertung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ableitung von Schlussfolgerungen, Erläuterungen oder Empfehlungen aus den Ergebnissen der Phase 2 und 3
	11.	Berichterstattung und Übermittlung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Informationen über die Szenarien und Bewertungsergebnisse
	12.	Verifizierung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Darstellung der Wahlmöglichkeiten und Entscheidungen ▪ Sensitivitätsanalyse der Eingaben

5 Beispiele zur Treibhausgasbilanzierung

5.1 Beispiel für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise (SBW)

Die ausführliche Treibhausgasbilanzierung für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise befindet sich in **Anhang A**. Das Beispiel soll veranschaulichen, wie bei einer Treibhausgasbilanzierung von Untertagebauwerken vorgegangen werden kann. Die ermittelten THG-Emissionen sind keine allgemeingültigen Werte, sondern gelten nur für das spezifische Projekt unter den in den Anhängen erläuterten Randbedingungen.

Die Treibhausgasbilanzierung für den Tunnel in Spritzbetonbauweise soll maßgebliche Treiber der Treibhausgasemissionen (GWP in kg CO₂-Äq.) während der Herstellung (Lebenszyklusmodule A1 bis A5) des Tunnelrohbaus identifizieren.

Bei dem für das Beispiel gewählten Projekt handelt es sich um einen ca. 1.800 m langen, 2-streifigen Straßentunnel mit Regelquerschnitt RQ 10,5T, d. h. die Fahrbahnbreite beträgt zweimal 3,75 m mit einem 1,00 m breiten Notgehweg. Die Ausbruchquerschnitte betragen zwischen 85 m² (Regelquerschnitt mit offener Sohle) bis 160 m² (Pannenbucht). Im Bereich der Portale wird der Tunnel auf einer Länge von 80 m im Westen und 130 m im Osten in offener Bauweise errichtet. Der bergmännische Tunnel wird im Kalotte-Strosse-Sohlevortrieb im Bagger- bzw. Sprengvortrieb aufgeföhren.

Bilanziert ist der Tunnelrohbau des bergmännisch vorgetriebenen Tunnels (Spritzbetonschale, Innenschale, Sohlauffüllung und Bankette). Der Fahrbahnbau, sowie der Einbau der Verkehrsinfrastruktur sind nicht berücksichtigt.

Die Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbaus sind in 4 Baugruppen unterteilt:

1. Ausbruch
2. Sicherung
3. Innenschale
4. Innenausbau

Die für das Beispiel verwendeten Daten basieren auf den Verbrauchsmengen. Zur Bestimmung der Treibhausgas-Emissionsfaktoren werden die Ökobaudat, die IBU-Datenbank und die EPD-Norge-Digi herangezogen. Die Emissionsfaktoren des Spritzbetons und des Konstruktionsbetons sind Durchschnittswerte für Betone mit der entsprechenden Festigkeitsklasse. Die Emissionsfaktoren werden nicht mischungsbezogen ermittelt. Die verwendeten Emissionsfaktoren können **Anhang A** entnommen werden.

In **Abbildung 5-1** sind die Gesamtemissionen zur Herstellung des Tunnelrohbaus aufgeteilt nach den Lebenszyklusmodulen dargestellt:

- 81 % entstehen in der Herstellungsphase der Baumaterialien
- 18 % entstehen durch den Errichtung-Einbauprozess (ohne Transport der Materialien zur Baustelle)
- 1 % entfallen auf den Transport der Materialien zur Baustelle

In **Abbildung 5-2** werden die Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äq, die durch die Herstellung der Baumaterialien entstehen, genauer betrachtet:

- 76 % entstehen durch die Beton- und Spritzbetonproduktion
- 15 % entstehen durch die Stahlproduktion
- 5 % entstehen durch die Stahlproduktion
- 1 % entstehen durch die Stahlproduktion
- 1 % entstehen durch die Stahlproduktion
- 2 % entstehen durch die Stahlproduktion
- 0 % entstehen durch die Stahlproduktion

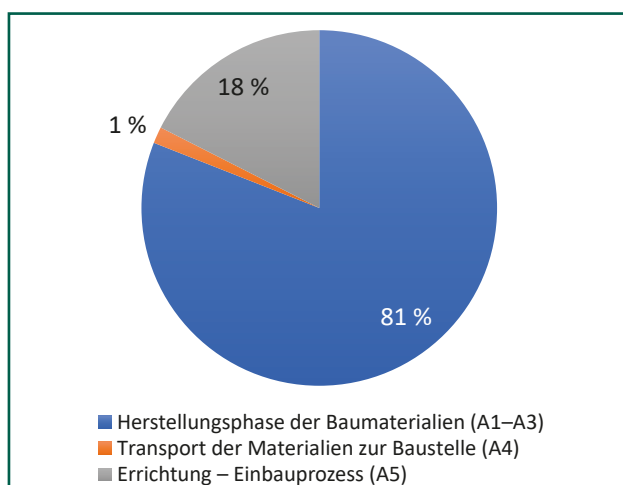


Abbildung 5-1 Gesamtemissionen aufgeteilt nach Lebenszyklusmodulen

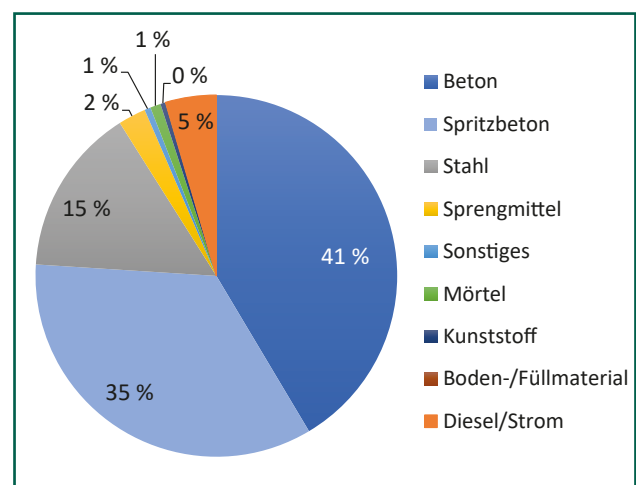


Abbildung 5-2 Anteil einzelner Materialien an THG-Emissionen der Herstellung der Baumaterialien

In **Abbildung 5-3** sind die Anteile der Baugruppen an den THG-Emissionen dargestellt:

- 41 % entstehen in der Baugruppe „Innenschale“
- 34 % entstehen in der Baugruppe „Sicherung“
- 23 % entstehen in der Baugruppe „Ausbruch“
- 2 % entstehen in der Baugruppe „Innenausbau“

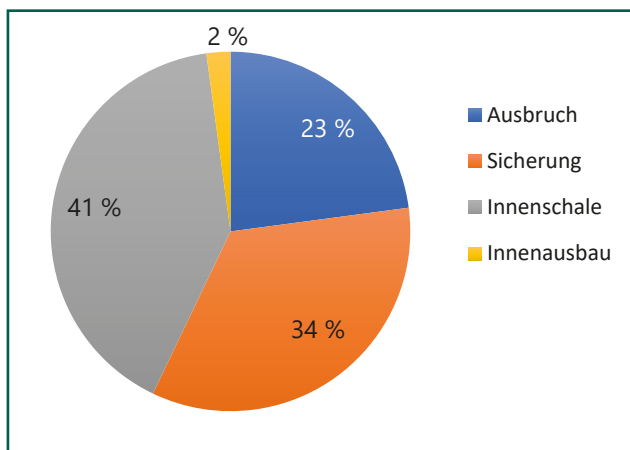


Abbildung 5-3 Anteil einzelner Baugruppen an den gesamten THG-Emissionen

Die Treibhausgasbilanzierung für den beispielhaft betrachteten Tunnel in Spritzbetonbauweise mit 1.590 Tunnelmeter und 164.711 m³ Ausbruch führt zu folgenden Ergebnissen:

- Die Gesamtemissionen (GWP) des Tunnelrohbaus für das Beispielprojekt betragen für die Lebenszyklusphasen A1 bis A5 ca. 17.931.258 kg CO₂-Äq. (11.278 kg CO₂-Äq./Tunnelmeter oder 109 kg CO₂-Äq./m³ Ausbruch)
- Maßgebliche Treiber sind die Innenschale (Beton- und Bewehrung) mit 39,6 % der Gesamtemissionen (7.101.798 kg CO₂-Äq.) und der Spritzbeton mit 28,5 % der Gesamtemissionen (5.115.902 kg CO₂-Äq.).

5.2 Beispiel für einen einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise (TBM)

Die ausführliche Treibhausgasbilanzierung für einen einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise befindet sich in **Anhang B**. Das Beispiel soll veranschaulichen, wie bei einer Treibhausgasbilanzierung für einen solchen Tunnel vorgegangen werden kann. Die ermittelten THG-Emissionen sind keine allgemeingültigen Werte, sondern gelten nur für das spezifische Projekt

unter den in den Anhängen erläuterten Randbedingungen.

Die Treibhausgasbilanzierung für den Tunnel im maschinellen Vortrieb soll maßgebliche Treiber der Treibhausgasemissionen (GWP in kg CO₂-Äq.) während der Herstellung (Lebenszyklusmodule A1 bis A5) des Tunnelrohbaus identifizieren.

Bei dem für das Beispiel gewählten Projekt handelt es sich um zwei 8.800 m lange, 1-gleisige Tunnelröhren mit einem Außendurchmesser von 10,94 m. Der Vortrieb erfolgt mit einer Tunnelbohrmaschine (TBM) mit Erddruckschild. Die Tunnelröhren werden im Regelfall mit einem einschaligen Tübbingausbau mit einer Stärke von 45 cm hergestellt. In den als druckhaft prognostizierten Bereichen kommt ein 65 cm dicker Tübbing zum Einsatz. Der Ringspalt beträgt ca. 25 cm und wird mit einem 2-Komponenten Mörtel verfüllt. Der Ausbruchdurchmesser beträgt 11,44 m und der theoretische Ausbruchquerschnitt beträgt ca. 103 m². Die Fertigung der Bewehrungskörbe der Tübbinge sowie die Herstellung der Tübbinge erfolgt direkt auf der Baustelle in einer Feldfabrik.

Bilanziert ist der Tunnelrohbaus beider Tunnelröhren. Der Gleisbau, der Einbau der Verkehrsinfrastruktur sowie die Herstellung der Verbindungsbauwerke zwischen den zwei Tunnelröhren sind nicht berücksichtigt. Die Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbaus sind in 5 Baugruppen unterteilt:

1. Ausbruch
2. Sicherung
3. Dauerhafter Ausbau
4. Innenausbau
5. Baustelleneinrichtung

Die TBM mit ihren Maschinenkomponenten, den Werkzeugen und den Betriebsmitteln ist in der Baugruppe Ausbruch berücksichtigt. Es sind nur die Maschinenkomponenten berücksichtigt, die keine Gebrauchtkomponenten sind und auch nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden.

Die für das Beispiel verwendeten Daten basieren auf den Verbrauchsmengen. Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren werden die Ökobaudat, die Datenbank des Instituts Bauen und Umwelt e.V. (kurz IBU) und die EPD-Norge-Digi herangezogen. Die Emissionsfaktoren des Tübbing- und des Konstruktionsbetons sind Durchschnittswerte für Betone mit der entsprechenden Festigkeitsklasse. Die Emissionsfaktoren werden nicht mischungsbezogen ermittelt. Die verwendeten Treibhausgas-Emissionsfaktoren können **Anhang B** entnommen werden.

In **Abbildung 5-4** sind die Gesamttreibhausgasemissionen zur Herstellung des Tunnelrohbaus aufgeteilt nach den Lebenszyklusmodulen dargestellt:

- 77 % entstehen in der Herstellungsphase der Baumaterialien
- 23 % entstehen durch den Errichtung-Einbauprozess (ohne Transport der Materialien zur Baustelle)
- 0,26 % entfallen auf den Transport der Materialien zur Baustelle

In **Abbildung 5-5** werden die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung der Baumaterialien entstehen, genauer betrachtet:

- 41 % entstehen durch die Tübbingbeton-Produktion
- 22 % entstehen durch die Produktion des Ringspaltmörtels
- 11 % entstehen durch die Strom- und Dieselherstellung
- 1,4 % entstehen durch die Herstellung der TBM

In **Abbildung 5-6** sind die Gesamtemissionen aufgeteilt nach den Baugruppen dargestellt:

- 59 % entstehen in der Baugruppe „dauerhafter Ausbau“
- 27 % entstehen in der Baugruppe „Ausbruch“
- 7 % entstehen in der Baugruppe „Innenausbau“
- 4 % entstehen in der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“
- 3 % entstehen in der Baugruppe „Sicherung“

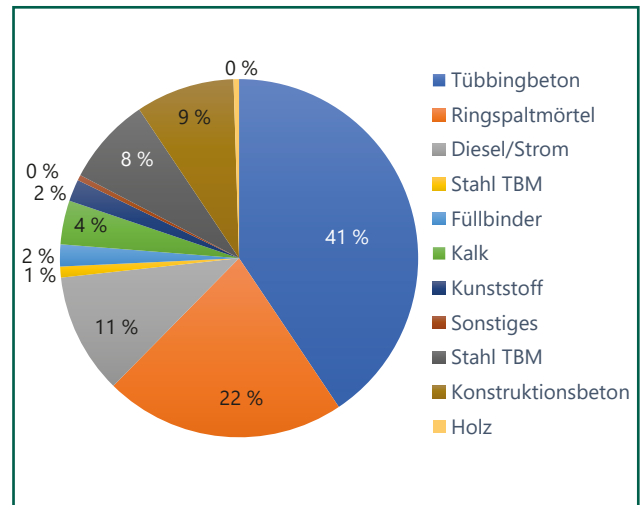


Abbildung 5-5 Anteil einzelner Materialien an THG-Emissionen der Herstellung der Baumaterialien

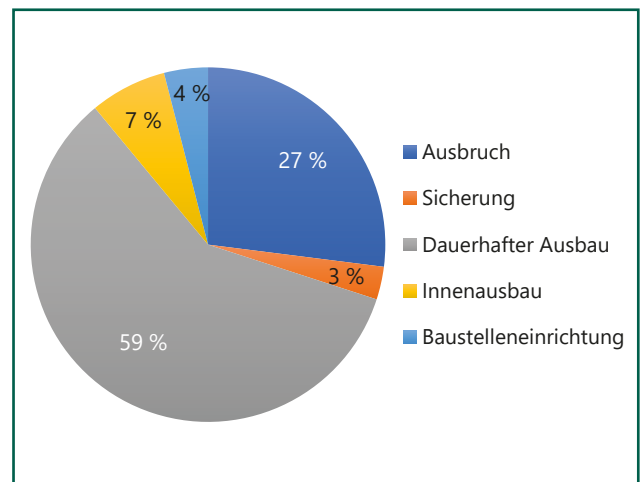


Abbildung 5-6 Anteil einzelner Baugruppen an THG-Emissionen der Herstellung der Baumaterialien

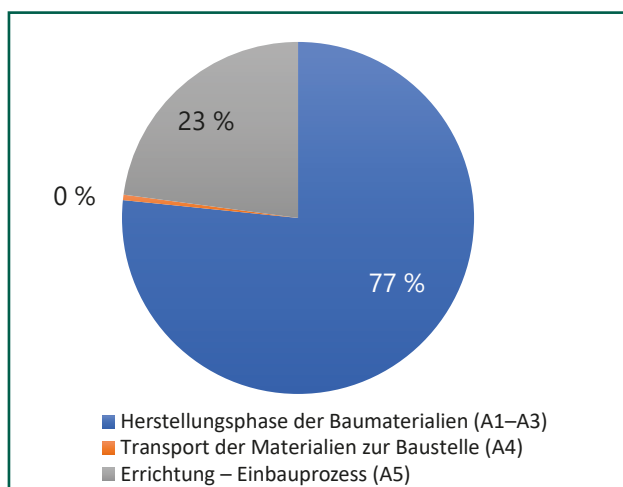


Abbildung 5-4 Gesamtemissionen aufgeteilt nach Lebenszyklusmodulen

Die Treibhausgasbilanzierung für den beispielhaft betrachteten einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise mit zweimal 8.800 Tunnelmeter und 1.728.649 m³ Ausbruch führt zu folgenden Ergebnissen:

- Die Gesamtemissionen (GWP) des Tunnelrohbaus betragen für die Lebenszyklusphasen A1 bis A5 ca. 242.117.657 kg CO₂-Äq. (13.757 kg CO₂-Äq./Tunnelmeter oder 140 kg CO₂-Äq./m³ Ausbruch).
- Maßgebliche Treiber sind die Herstellung der Tübbinge (Material 94.617.786 kg CO₂-Äq. und Stromverbrauch Tübbingproduktion 2.096.622 kg CO₂-Äq.) mit 40 % der Gesamtemissionen und der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle mit 22 %.

Die Beispiel-Treibhausgasbilanzierungen zeigen, dass die Materialien, insbesondere Beton und Stahl, die maßgeblichen Treiber der Treibhausgasemissionen von Tunnelbauwerken sind. Der Fokus der Treibhausgasbilanzierung sollte somit in der genauen Ermittlung der Emissionsfaktoren des Betons und des Stahls liegen. Beim Beton ist der Zement der treibende Faktor. In Abhängigkeit der Betonrezeptur kann es für die gleiche Betonsorte teils erhebliche Unterschiede in den Emissionsfaktoren geben. Die Emissionsfaktoren des Betons sollten daher für eine möglichst genaue Treibhausgasbilanzierung rezepturbezogen ermittelt werden.

5.3 THG-Emissionen bei verschiedenen Tunnelbauprojekten

In [18] werden die THG-Emissionen für mehrere Tunnelprojekte untersucht. Betrachtet werden zwei Bahntunnel mit einem Kreisquerschnitt (Katzenbergtunnel und Boßlertunnel) und zwei Straßentunnel mit einem Maulprofil (Grenztunnel Füssen und Tunnel Küchen).

Für die beiden Bahntunnel ist jeweils eine Kalkulation der verwendeten Massen zum maschinellen Vortrieb (Tunnelbohrmaschine, TBM) und eine zum konventionellen Vortrieb (Spritzbetonbauweise, SBW) vorhanden, sodass die Ergebnisse projektspezifisch miteinander verglichen werden können.

Die beiden Straßentunnel wurden in der konventionellen Bauweise mittels Spritzbetonbauweise hergestellt. Der Straßen- bzw. Gleisoberbau wird bei der Ökobilanz nicht berücksichtigt.

Zur Einordnung der in Anhang A und B berechneten Beispiele werden die Treibhausgasemissionen mit denen der Projekte aus [18] verglichen (**Tabelle 8**).

Die Treibhausgasemissionen sowohl pro Tunnelmeter als auch pro Ausbruchsmenge der maschinell vorgetriebenen Bahntunnel passen gut zueinander. Die Treibhausgasemissionen des Beispiels in **Anhang B** liegen zwischen den Werten der in [18] bilanzierten Projekte.

Die Treibhausgasemissionen des Beispiels in **Anhang A** (Straßentunnel, SBW) liegen sowohl bezogen auf Tunnelmeter als auch pro Ausbruchsmenge deutlich unter den Werten der in [18] bilanzierten Projekte. Eine Erklärung hierfür bieten die unterschiedlichen Bauweisen. Die beim Grenztunnel Füssen verwendeten Mengen für Injektionen sind hoch, da zur Gebirgssicherung Injektionszwiebeln hergestellt wurden und zur Herstellung der druckdichten Abdichtung das Kompaktverfahren verwendet wurde (Verpressung des Zwischenraumes zwischen Spritzbeton und Abdichtungsbahn). Eine weitere Erklärung bieten die stark unterschiedlichen Emissionsfaktoren für Spritzbeton. Die Emissionsfaktoren haben sich mit der Zeit stark weiterentwickelt. In [18] wird ein Wert von 562,5 kg CO₂-Äq./m³ angesetzt (Stand 2016), in **Anhang A** wurden 196,0 kg CO₂-Äq./m³ angesetzt.

Tabelle 8 Zusammenstellung Treibhauspotential (GWP) verschiedener Projekte

Treibhausgasemissionen	Bahntunnel					Straßentunnel		
	Katzenbergtunnel		Boßlertunnel		Beispiel Anhang B	Grenztunnel Füssen	Tunnel Küchen	Beispiel Anhang A
	TBM	SBW ¹⁾	TBM	SBW ¹⁾	TBM	SBW	SBW	SBW
Gesamt [t CO ₂ -Äq.]	268.400*	511.700	212.900*	310.300	242.118	279.000	516.000	17.931
Pro Tunnelmeter [t CO ₂ -Äq./m]	14,9*	28,5	12,1*	17,6	13,8	22,0	19,1	11,3
Pro Ausbruchsmenge [t CO ₂ -Äq./m ³]	0,15*	0,27	0,12*	0,19	0,14	0,23	0,20	0,11

1) theoretische Berechnung, nicht ausgeführt * ohne Ringspaltmörtel

6 Monitoringkonzept zur THG-Bilanzierung in der Bauausführung

Die Fortschritte und Leistungen im Bereich der Nachhaltigkeit während der Ausführung sind ebenso wie Bauzeit und Baukosten zu überwachen und zu dokumentieren und werden so Teil der Projektsteuerung und ggf. des Risikomanagements. Im Vorfeld ist hierzu ein Monitoringkonzept zu erarbeiten. Dieses beschreibt,

- welche Maßnahmen und Aktivitäten eingeleitet und durchgeführt werden sollen, um die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen,
- wer für die Durchführung und Überwachung verantwortlich sein wird und
- den Zeitplan und Fristen für alle Aktivitäten.

Daraus resultieren folgende Anforderungen an den Auftragnehmer:

- Während der Bauarbeiten erstellt der Auftragnehmer für jedes Arbeitspaket/Bauphasenabschnitt ein „THG-Emissionskonto“.
- Erforderliche oder beabsichtigte Änderungen während der Bauphase, die einen Einfluss auf die THG-Emissionen des Projekts im Vergleich zur ursprünglichen Bilanzierung haben, werden im „THG-Emissionskonto“ dokumentiert.

7 Fazit

Nachhaltiges Bauen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Wenn in der Vergangenheit von nachhaltigen Bauwerken des Hochbaus die Rede war, stand meist der Energieverbrauch in der Nutzungsphase im Mittelpunkt. Um die Nachhaltigkeit eines Untertagebauwerks umfassend zu bewerten, ist zusätzlich die Herstellungs- und Errichtungsphase zu betrachten.

Die Treibhausgasbilanzierung eines Untertagebauwerks ist mithilfe der vorliegenden Normen zur Ökobilanzierung möglich. Eine Schwierigkeit stellt jedoch die Zusammenstellung der Emissionswerte dar. Die in Deutschland gängigen Datenbanken (Ökobaudat und IBU-Datenbank) enthalten überwiegend Bauprodukte, die im Hochbau eingesetzt werden. Emissionswerte für Bauprodukte des Untertagebaus (wie z. B. Spritzbeton) sind teilweise nur in internationalen Datenbanken (z. B. EPD-Norge-Digi) oder unter Umständen gar nicht zu finden. In letzterem Fall muss auf eigene Berechnungen oder Vergleichswerte zurückgegriffen werden. Dies kann zu Unschärfen in der Treibhausgasbilanz führen und die Vergleichbarkeit erschweren.

Die Methodik der Erstellung einer Treibhausgasbilanz als Teil einer Ökobilanz ist in DIN EN ISO 14044 geregelt. Durch die freie Wahl der Systemgrenzen erhält die Treibhausgasbilanz jedoch einen individuellen Charakter, was Treibhausgasbilanzen untereinander schwerer vergleichbar macht. So kann beispielsweise die Treibhausgasbilanz eines Tunnelbauwerks nicht mit der Treibhausgasbilanz einer ganzen Trassenvariante mit Tunneln und Brückentragwerken verglichen werden. Soll die Treibhausgasbilanzierung für einen Variantenvergleich (z. B. Spritzbetontunnel vs. TBM-Tunnel) herangezogen werden, so sind die Systemgrenzen identisch festzulegen und zu beschreiben. Je weiter die Systemgrenzen gesteckt werden, etwa für einen Vergleich auf Projektebene zwischen Tunnel und Brücke, desto komplexer wird die Berechnung.

Ein modellbasiertes Berechnungsverfahren basierend auf Building Information Modeling (BIM) kann bei der systematischen Erfassung aller Daten zukünftig hilfreich sein.

Ökobilanzen sind heute keine rein informativen Dokumente mehr, sondern haben Einfluss auf Projektentscheidungen. Eine nachvollziehbare und nach den geltenden Normen erstellte Ökobilanzierung ist daher ein notwendiger Bestandteil für eine Bewertung der Nachhaltigkeit eines Untertagebauwerks. Für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung ist darüber hinaus die Betrachtung der Ökonomie und des Sozialen erforderlich.

8 Verweise

- [1] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB); Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Tunnel, Köln, 2023
- [2] Statistisches Bundesamt, Indikatoren der UN-Nachhaltigkeitsziele <https://sdg-indikatoren.de>
- [3] Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen, 11. Dezember 1997
- [4] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full.pdf
- [5] DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen, Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006

- [6] Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung vom 1. Juli 2010 (BGBl. I S. 856), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 18. Mai 2021 (BGBl. I S. 1181) geändert worden ist
- [7] DIN EN 17472: 2024-06: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken – Rechenverfahren, Deutsche Fassung EN 17472:2022
- [8] DIN EN 15978-1: Entwurf 2021-09: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden – Teil 1: Umweltqualität, Deutsche und englische Fassung prEN 15978-1:2021
- [9] Hartwig, & Hegger. (2011). Ökobilanzierung von Gebäuden. Abgerufen am 2. Juli 2022 von <https://www.baulinks.de/architektur/oekobilanz-oekobilanzierung.php>
- [10] Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F. -M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Zhang, H. (2013). Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report
- [11] Attitude Building Collective (ABC) – Entwurfs- tafeln zur Ökobilanzierung in der Tragwerksplanung, Abgerufen am 05.09.2024 <https://attitude-buildingcollective.org>
- [12] Institut Bauen und Umwelt e.V. Umwelt-Produktdeklaration, nach ISO 14025 und EN 15804+A2-Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25, Informationszentrum Beton GmbH
- [13] DIN EN 15643 (Dezember 2021): Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken; Deutsche Fassung EN 5643:2021
- [14] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBS), Leitfaden Nachhaltiges Bauen, 3. Auflage, Berlin, 2019
- [15] DIN EN 15804: 2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Deutsche Fassung EN 15804:2012
- [16] DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen; Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020
- [17] D’Aloia Schwartzentruber L.; et.al. Life Cycle Assessment applied to the construction of tunnel, in Veröffentlichungen des ITA World Tunnel Congress “SEE-Tunnel”. ITA World Tunnel Congress. (22.–28. Mai 2015). Dubrovnik, Kroatien, Aug. 2015
- [18] Sauer, Julia; Dissertation Technische Universität München, 2016: Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur



Anhänge

ANHANG A: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen Tunnel in Spritzbetonbauweise

A/1 Allgemeine Vorbemerkungen

In diesem Anhang wird für einen Tunnel im bergmännischen Vortrieb eine vereinfachte Ökobilanzierung (nur Auswertung der Wirkungskategorie Klimawandel, somit eine Treibhausgasbilanzierung) nach DIN EN ISO 14040:2021 und 14044:2021 durchgeführt. Ökobilanzierungen bestehen generell aus 4 Phasen (vgl. **Tabelle 7** im Hauptteil):

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Demgemäß wird die Treibhausgasbilanzierung im Folgenden durchgeführt.

A/2 Projektbeschreibung

Bei dem für das Beispiel gewählten Projekt handelt es sich um einen ca. 1.800 m langen, 2-streifigen Straßentunnel mit Regelquerschnitt RQ 10,5T, d. h. die Fahrbahnbreite beträgt zweimal 3,75 m mit einem 1,00 m breiten Notgehweg. Im Bereich der Portale wird der Tunnel auf einer Länge von 80 m im Westen und 130 m im Osten in offener Bauweise hergestellt. Zwischen den Portalen befindet sich der ca. 1.590 m lange bergmännische Tunnelabschnitt. Dieser ist in den Lockergesteinsbereichen (Löß bzw. zersetzter Granit) als Gewölbequerschnitt mit geschlossener Sohle geplant und im Fels als Gewölbequerschnitt mit offener Sohle (**Abbildung A-1**). Aufgrund der Gesamtlänge von ca.

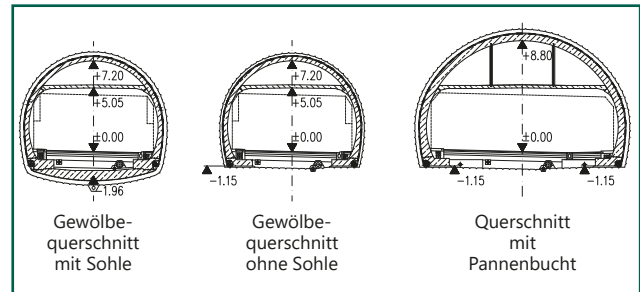


Abbildung A-2 Regelquerschnitte

1.800 m sind 2 Pannenbuchten im Abstand von jeweils 600 m angeordnet.

Der bergmännische Tunnel wird im Kalottenvortrieb im Bagger- bzw. Sprengvortrieb aufgeföhren. Das Ausbrechen der Strosse/Sohle erfolgt nach der Kalotte entgegen der Vortriebsrichtung des Kalottenvortriebs. Nachlaufend wird die Innenschale betonierte. Die Ausbruchsquerschnitte betragen zwischen 85 m² (RQ offene Sohle) bis 160 m² (Pannenbucht) (**Abbildung A-2**). In den Querschnitten wird eine U-mendrainage eingebaut.

Aufgrund der anspruchsvollen Geologie wird der Vortrieb in 6 Vortriebsklassen unterteilt. In der Treibhausgasbilanzierung sind alle ausgeführten Vortriebsklassen berücksichtigt.

Die Innenschalendicke variiert für die Querschnitte mit geschlossener Sohle zwischen 35 cm, 40 cm, 50 cm und 60 cm. Die Innenschalendicke liegt für die Querschnitte mit offener Sohle zwischen 35 cm und 40 cm.

Der Auftragsumfang der ausführenden Baufirma für dieses Projekt beinhaltet die Errichtung des erweiterten Tunnelrohbaus. Der Fahrbahnbau und der Einbau der Verkehrsinfrastruktur sind nicht Teil dieser Treibhausgasbilanzierung.

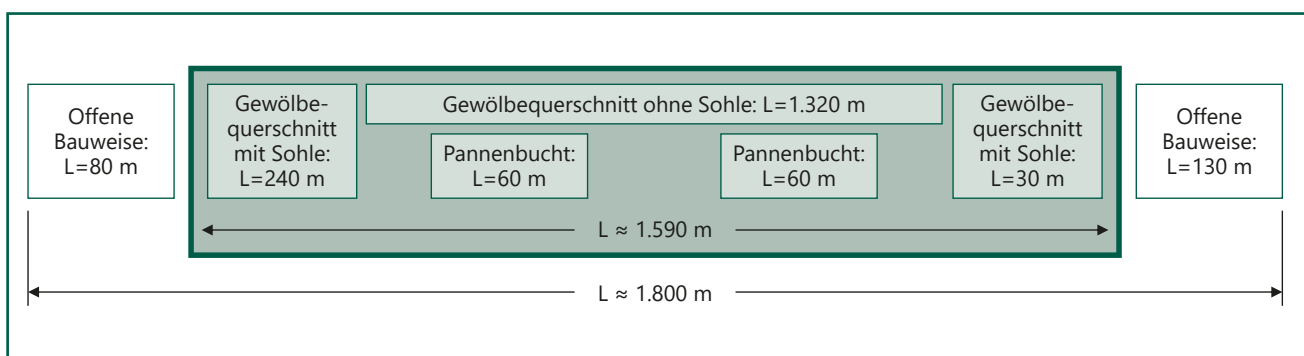


Abbildung A-1 Übersicht Querschnittstypen mit zugehöriger Länge

A/3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Treibhausgasbilanzierung des Beispiel-Projekts soll maßgebliche Treiber der Treibhausgasemissionen während der Herstellung (Lebenszyklusphasen A1 bis A5) des Tunnelrohbaus identifizieren. Der Tunnel ist bereits fertiggestellt und in Betrieb genommen.

A/3.1 Definition des Bauwerktyps

Das betrachtete Bauwerk ist ein einröhriges Tunnelbauwerk mit einem zweistreifigen Tunnelquerschnitt für eine Landstraße in Deutschland. Der Tunnelvortrieb erfolgt in der Spritzbetonbauweise. Betrachtet wird nur der Tunnelrohbau (Spritzbetonschale, Innenschale, Sohlauffüllung, Bankette).

A/3.2 Definition der berücksichtigten Lebenszyklusphasen

Es werden die Lebenszyklusphasen „Herstellungsphase“ (A1–A3) und „Errichtungsphase“ (A4–A5) berücksichtigt. Diese beiden Phasen umfassen die Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbaus von der Rohstoffproduktion bis zum fertigen Tunnelrohbau.

A/3.3 Definition des Betrachtungszeitraums

Ein Tunnel wird in Deutschland in der Regel auf einen Lebenszeitraum von 100 Jahren bemessen. Für die Treibhausgasbilanzierung der Lebenszyklusphasen A1 bis A5 spielt die Lebensdauer des Tunnelbauwerks keine Rolle. Für die Bewertung der Gesamtemissionen während des Lebenszyklus ist die Lebensdauer des Tunnelbauwerks aber nicht zu vernachlässigen.

A/3.4 Definition der funktionellen Einheit

Der Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz muss die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems eindeutig festlegen. Die funktionelle Einheit muss dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen. Einer der Hauptzwecke einer funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die die Input- und Outputdaten normiert werden (im mathematischen Sinn). Deshalb muss die funktionelle Einheit eindeutig definiert und messbar sein. Für einen Tunnel können verschiedene funktionelle Einheiten definiert werden, wie z. B. CO₂-Äq. pro Tunnelmeter oder CO₂-Äq. pro m³ Ausbruchsmenge.

Die funktionelle Einheit in diesem Beispiel ist CO₂-Äq. pro Tunnelrohbaumeter.

A/3.5 Definition des funktionalen Äquivalents

Das funktionale Äquivalent ist eine Darstellung der geforderten technischen Merkmale und Eigenschaften sowie Funktionalitäten des Ingenieurbauwerks. In diesem Beispiel ist das funktionale Äquivalent der Rohbau eines 2-streifigen Straßentunnels. Der Tunnel wird dräniert in Spritzbetonbauweise hergestellt.

A/3.6 Definition der Systemgrenzen

Für das vorliegende Anwendungsbeispiel werden die Systemgrenzen über die Herstellung des Rohbaus des Tunnels definiert. Folgende Leistungen und zugehörige Arbeiten sind Teil der Herstellung des Tunnelrohbaus:

- Ausbrucharbeiten
- Stützmitteleinbauarbeiten
- Temporäre Ausbauarbeiten (Spritzbetonschale)
- Bewehrungsarbeiten
- Abdichtungsarbeiten
- Entwässerungsarbeiten
- Betonarbeiten
 - Innenschale
 - Füllbeton
 - Bankette
- Innenausbauarbeiten

Der Fahrbahnbau, sowie der Einbau der Verkehrsinfrastruktur wird nicht berücksichtigt.

Die Systemgrenzen werden nachfolgend näher erläutert. Dazu werden die oben genannten Leistungen in 5 Baugruppen unterteilt:

1. Ausbruch
2. Sicherung
3. Innenschale
4. Innenausbau
5. Einbauteile

Um die Treibhausgasbilanzierung und die Systemgrenzen graphisch zu veranschaulichen, wird eine Baumstruktur definiert. Die Baumstruktur umfasst 6 Ebenen und summiert die Umwelteinwirkungen einzelner Produkte bzw. Bauteile auf, ausgehend von der untersten Ebene 6. Die Ebenen sind:

- Ebene 1: Projekt
- Ebene 2: Bauwerk
- Ebene 3: Baugruppe (siehe oben)

- Ebene 4: Bauteil
 - Modul A4 (falls nicht bereits in Ebene 5 berücksichtigt)
 - Modul A5 (falls Daten vorhanden): Errichtungs- und Einbauprozess
- Ebene 5: Einzelteil
 - Modul A4: Transport der Materialien zur Baustelle
- Ebene 6: Material
 - Module A1-A3: Herstellung Materialien

Die Treibhausgasbilanzierungsstruktur ist wie in **Abbildung A-3** farblich markiert:

- **Grün:** wird in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt
- **Orange:** nicht vollständig in der Treibhausgasbilanzierung erfasst aufgrund der Datensätze
- **Rot:** Wird in der Treibhausgasbilanzierung nicht berücksichtigt
- **Blau:** Material, wird in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt

Systemgrenze Material – Ausbruch

Der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials ist in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt und dem Modul A5 zugeordnet. Ein möglicher treibhausgas-reduzierender Einfluss einer Wiederverwendung des Ausbruchmaterials ist in diesem Beispiel nicht enthalten. Der Einbau des Ausbruchmaterials auf Deponien sowie alle anderen Arbeiten betreffend die Deponierung sind nicht berücksichtigt.

Im Sprengvortrieb kommen gelatinöse Sprengstoffe, Sprengschnüre sowie elektrische und nicht-elektrische Zünder zum Einsatz. Die THG-Emissionen, die bei der Detonation der Sprengstoffe entstehen sind nicht berücksichtigt. Für die Bohrkronen zur Herstellung der Sprenglöcher gibt es keine Daten, daher sind diese nicht bilanziert. Die Bohrgestänge sind in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt. Des Weiteren sind Öle, Fette und Schmierstoffe bilanziert, die für den Vortrieb benötigt werden (**Abbildung A-4**).



Abbildung A-3 Legende Baumstruktur

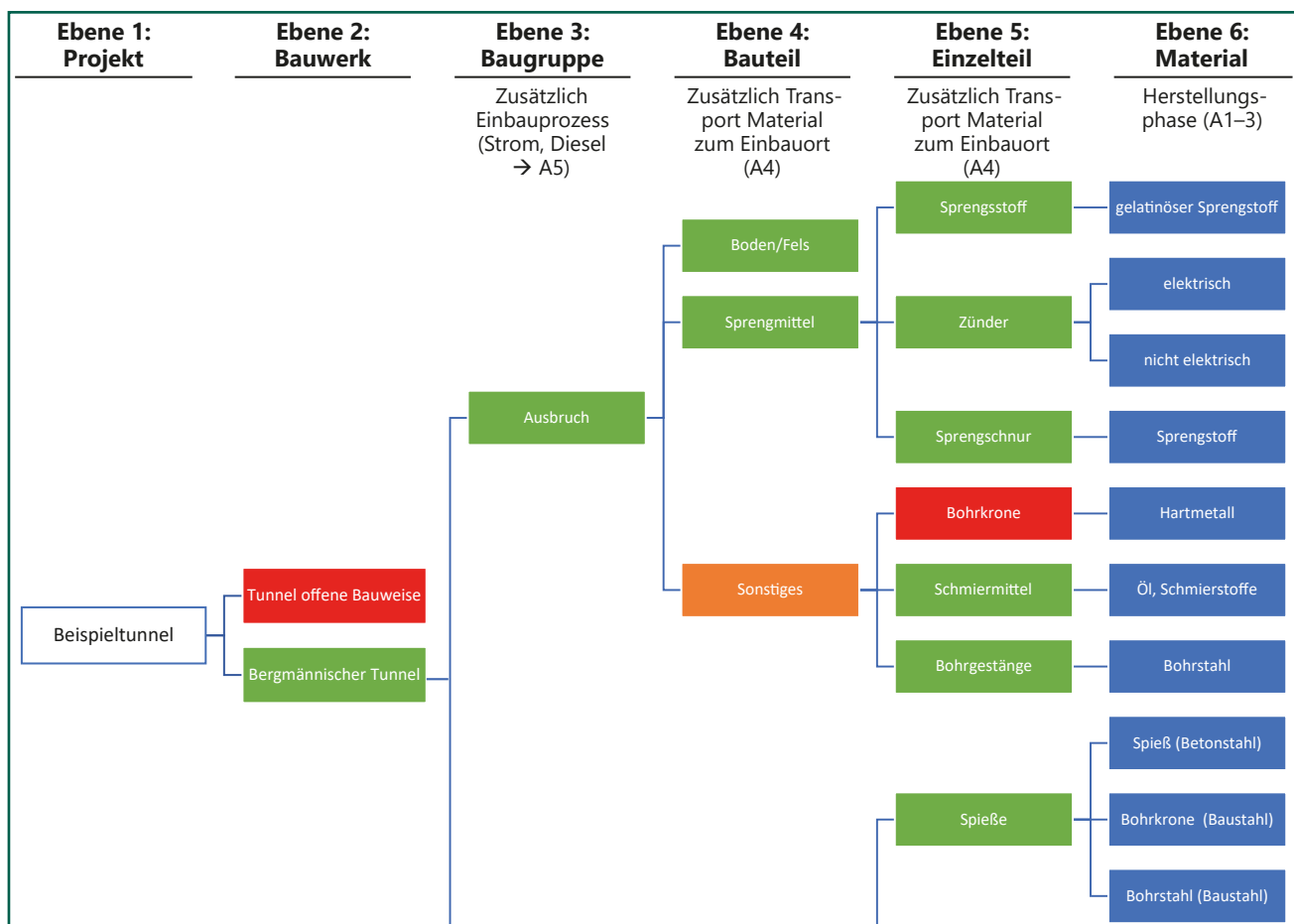


Abbildung A-4 Systemgrenze Ausbruch

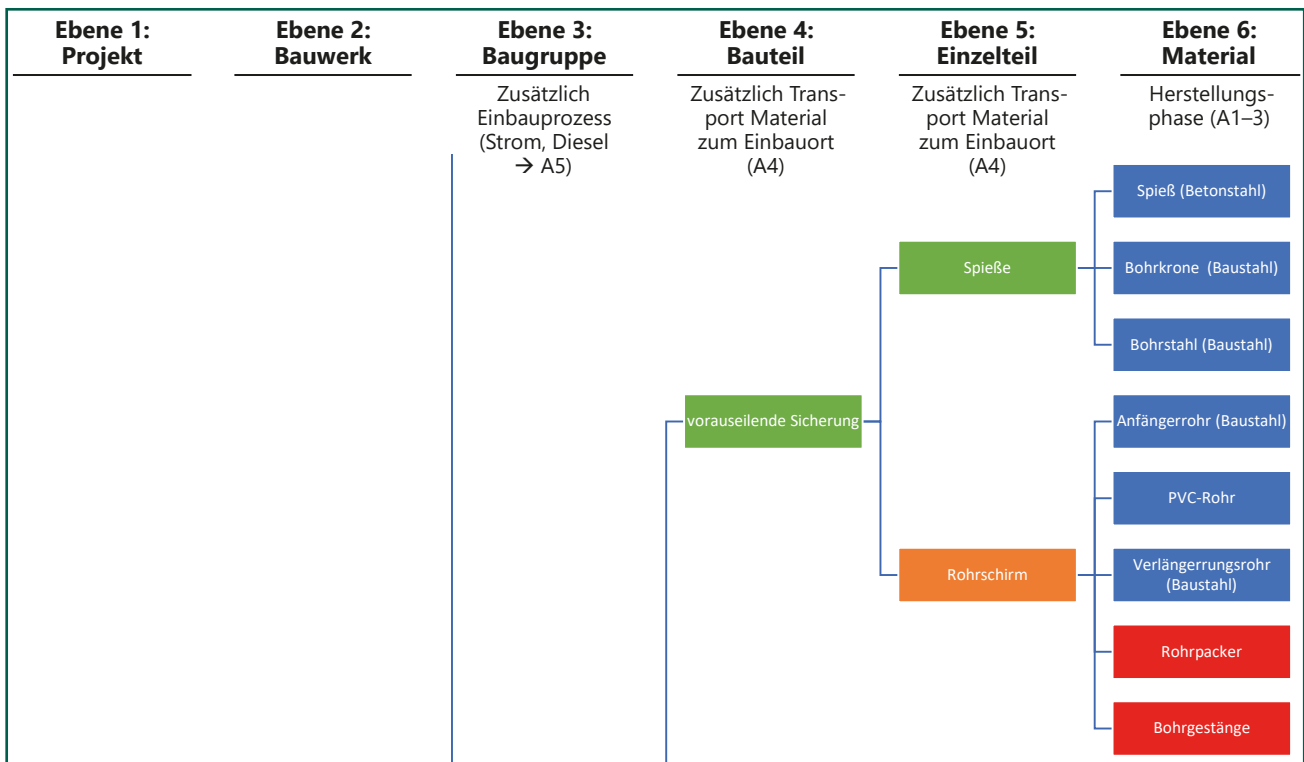


Abbildung A-5 Systemgrenze Sicherung – vorausiehende Sicherung

Systemgrenze Material – Sicherung

Als vorausiehende Sicherung werden Spieße und Rohrschirme eingebaut. Die Treibhausgasbilanzierung der Spieße berücksichtigt die Bohrkrone, den Bohrstahl und die Spießstangen. Die Treibhausgasbilanzierung des Rohrschirms berücksichtigt die Anfängerrohre, die PVC-Rohre und die Verlängerungsrohre. Kleinteile wie Injektionsventile, Bohrgestänge und Doppelman-

schettenrohrpacker werden aufgrund ihrer geringen Stückzahl nicht in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt (**Abbildung A-5**).

Zusätzlich zu den Spießen und Rohrschirmen werden Anker eingebaut. Es kommen SN- und SB-Anker zum Einsatz. Die Anker und der eingebaute Ankermörtel sind in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt (**Abbildung A-6**). Zum Zubehör, wie Ankerkopflatten und Muttern, liegen keine Daten vor.

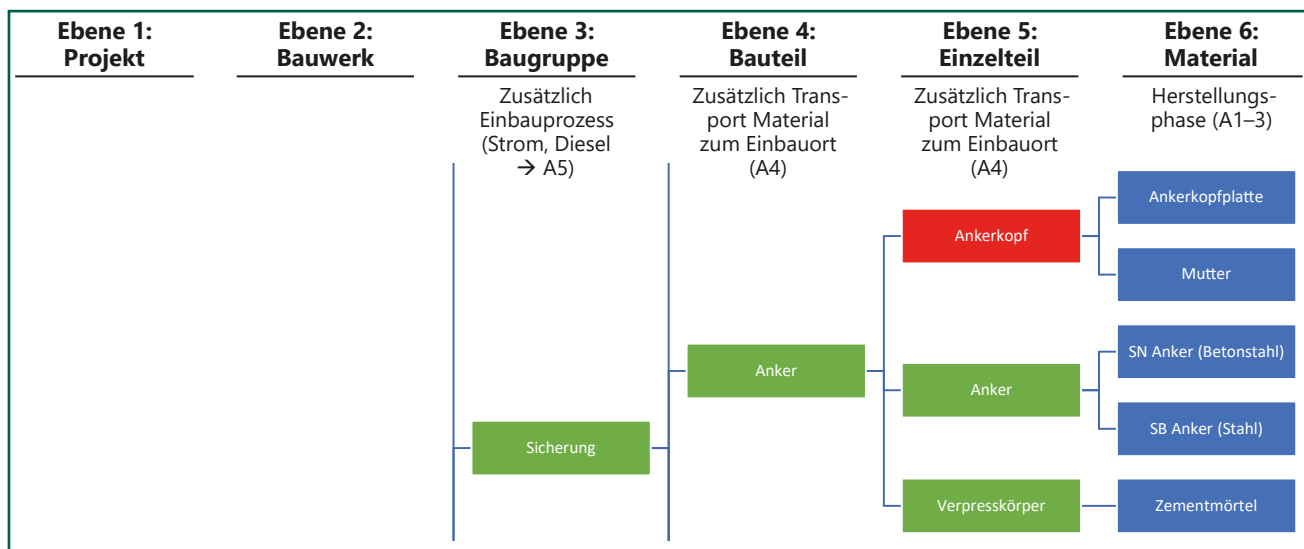


Abbildung A-6 Systemgrenze Sicherung – Anker

Für die Ausbaubögen (Gitterträger und IB-Träger) sowie für die Bewehrung des Spritzbetons (Stahlmatten und Stabstahl) liegen detaillierte Daten vor. Diese lassen es zu, dass der Spritzbeton und die Zusatzmittel, wie Beschleuniger und Verzögerer, getrennt bilanziert werden können (**Abbildung A-7**).

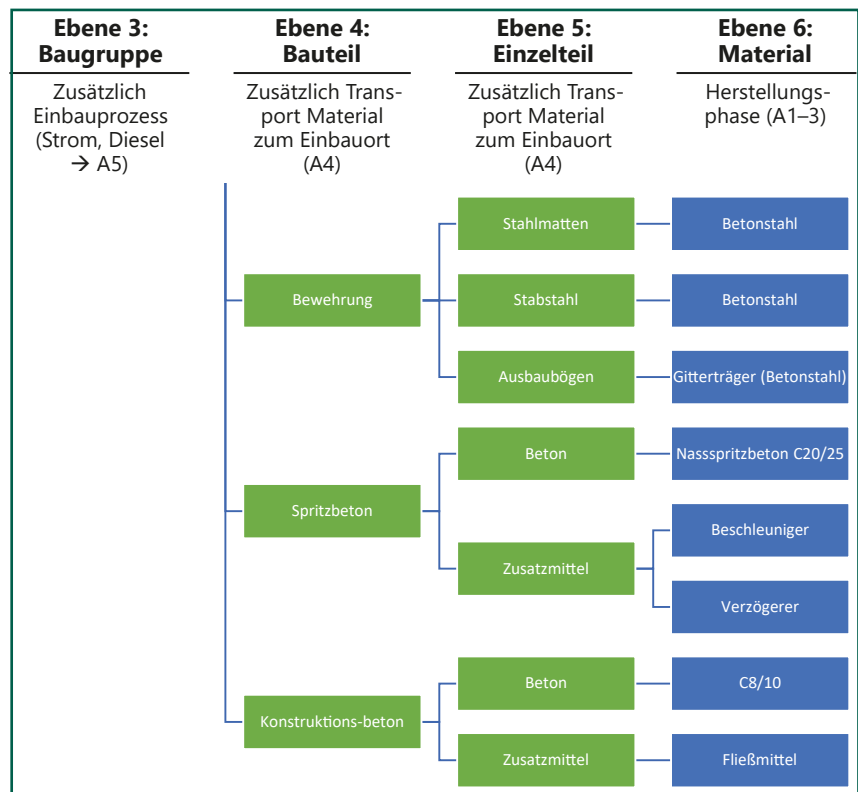


Abbildung A-7 Systemgrenze Sicherung – Bewehrung, Spritzbeton, Konstruktionsbeton

Systemgrenze Material – Innenschale

In der Bauwerksgruppe „Innenschale“ sind die Materialien zur Tunnelabdichtung sowie die Materialien zur Herstellung der bewehrten Innenschale inklusive Firstspaltinjektion berücksichtigt (**Abbildung A-8**). Zur Tunnelabdichtung liegen detaillierte Daten für die Gleitschicht, das Geotextil und die Fugenbänder vor. Die Innenschale wird mit einem Beton der Druckfestigkeitsklasse C30/37 ausgeführt. Die Treibhausgasbilanzierung der Bewehrung berücksichtigt Stahlmatten und Stabstahl. Die Treibhausgasbilanzierung der Firstspaltinjektion berücksichtigt Injektionsschläuche, Entlüftungsschläuche und den Firstspaltmörtel. Materialien mit geringer Menge, wie Füllbinder zur Injektion von Fugenbändern, Verpressmörtel für Baudrainagen sowie Schachtringe für die Drainage sind nicht berücksichtigt. Öle, Fette und Schmierstoffe, die für den Einbau der Innenschale benötigt werden, sind in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt.

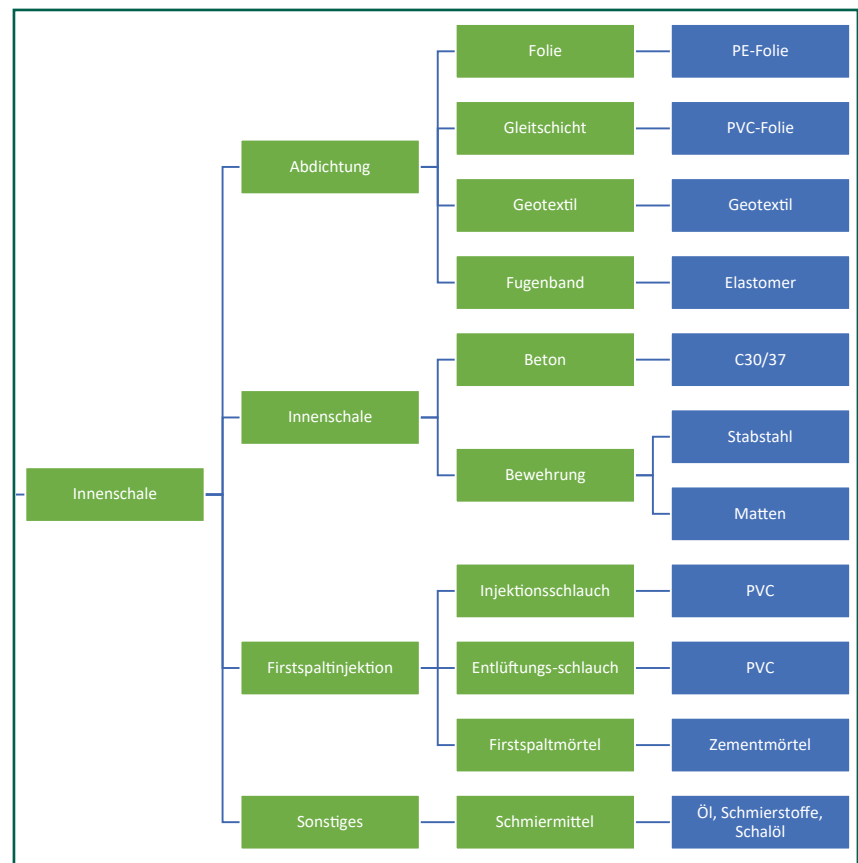


Abbildung A-8 Systemgrenze Innenschale

Systemgrenze Material – Innenausbau

In der Bauwerksgruppe „Innenausbau“ sind die Materialien zur Herstellung der Sohlauffüllung sowie die Materialien zur Herstellung der Erdung, der Entwässerung und der Bankette berücksichtigt. Die Treibhausgasbilanzierung der Erdung berücksichtigt das Erdungsband und den Runderder; Erdungsfestpunkte und Erdungsverbinder sind nicht berücksichtigt. Die Treibhausgasbilanzierung der Entwässerung berücksichtigt den Filterkies und die Drainageröhre; die Schachtringe sind nicht berücksichtigt (**Abbildung A-9**).

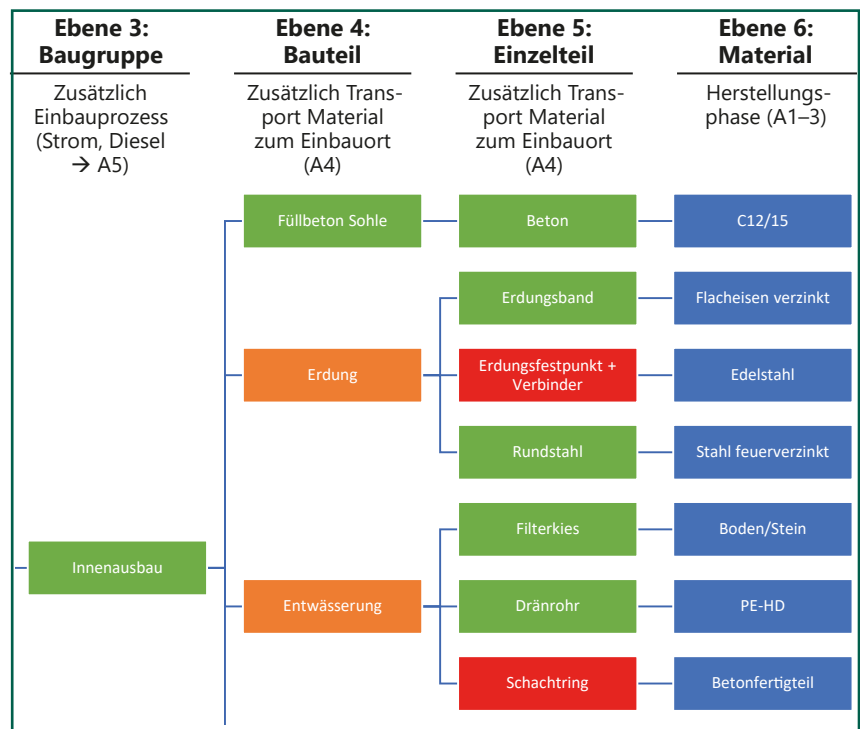


Abbildung A-9 Systemgrenze Innenausbau

Die Treibhausgasbilanzierung der Bankette berücksichtigt die Kabelschutzrohre und den Kappenbeton. Hartschaumplatten, Kabelschacht-abdeckungen und Schachtringe sind nicht berücksichtigt (**Abbildung A-10**).

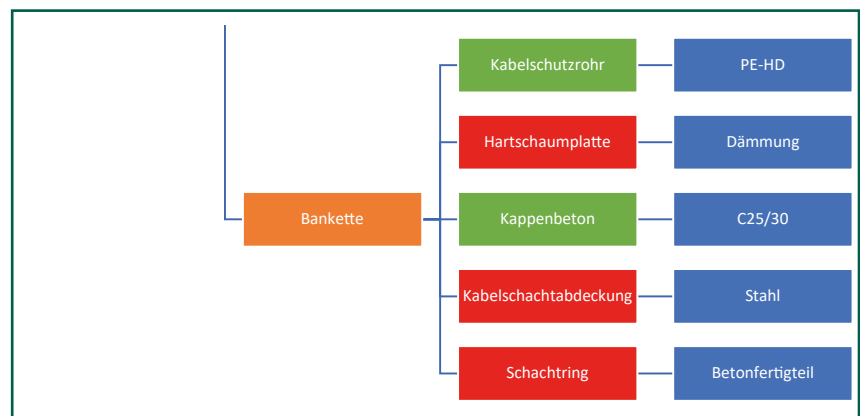


Abbildung A-10 Systemgrenze Innenausbau – Bankette

Systemgrenze Material – Einbauteile

Einbauteile, die keiner der oben genannten Baugruppen zugeordnet werden können, wie Klemmschienen, Ankerschienen und Lastverteilerschienen, sind nicht berücksichtigt (**Abbildung A-11**).

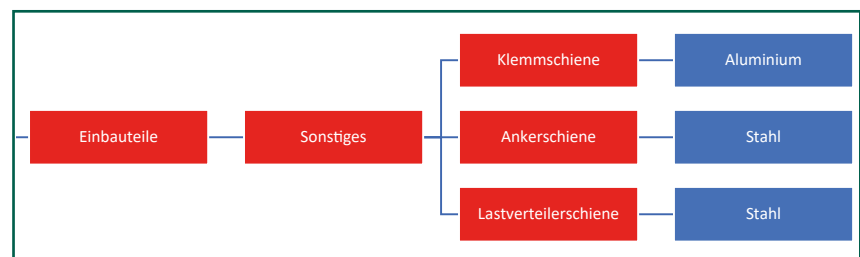


Abbildung A-11 Systemgrenze Einbauteile

Systemgrenze Diesel- und Stromverbrauch in der Errichtungsphase

Die Diesel- und Stromverbräuche liegen für die Baugruppe „Ausbruch“ und für die Baugruppe „Innenschale“ vor. Es ist nicht möglich, die Diesel- und Stromverbräuche den einzelnen Arbeitsgängen/Materialien innerhalb dieser Baugruppe zuzuordnen. Deshalb sind die Diesel- und Stromverbräuche in einer eigenen Kategorie in der jeweiligen Baugruppe bilanziert. Für die Baugruppen „Sicherheit“ und „Innenausbau“ sind keine Daten für die Diesel- und Stromverbräuche vorhanden.

Die Treibhausgasbilanzierung des Diesels berücksichtigt die Module A1 bis A5. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung des Diesels entstehen sind in den Modulen A1–A3 abgebildet. Der Transport des Diesels auf die Baustelle ist in Modul A4 abgebildet. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Verbrennung des Diesels durch den Betrieb der Baumaschinen/Baugeräte entstehen, sind in Modul A5 abgebildet.

Die Treibhausgasbilanzierung des Stroms berücksichtigt die Module A1–A3. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung des Stroms entstehen, sind in den Modulen A1–A3 abgebildet. Treibhausgasemissionen, die aufgrund von Leitungs- und/oder Transformationsverlusten entstehen (also in Modul A4), sind nicht berücksichtigt. Durch die Nutzung des Stroms entstehen keine Emissionen, somit wird Modul A5 nicht berücksichtigt.

Systemgrenze Wasser/Abwasser

Aufgrund nicht vorhandener Daten sind alle Arten von Wasserverbräuchen und Wasseraufbereitungsmaßnahmen auf der Baustelle sowie eventuell notwendige Transporte von Brauchwasser zur Baustelle oder von verunreinigtem Wasser zu Kläranlagen nicht berücksichtigt. Wasserverbräuche für die Produkt- und Materialherstellung sind bei den jeweiligen Produktions-/Herzstellprozessen berücksichtigt.

Systemgrenzen Baurestmassen und Bauabfälle

Gängige Baurestmassen und Bauabfälle sind Bewehrungsverschnitt, Betonrestmassen, Spritzbetonrückprall, Holz und Verpackungsmaterial. Aufgrund fehlender Informationen zur Behandlung der Baurestmassen und Bauabfälle sind diese nicht berücksichtigt.

Systemgrenze Transport

Der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle ist in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt und Modul A5 zugeordnet. Es liegen detaillierte Daten zu den Transporten des Ausbruchmaterials vor sowie zu den Transporten von Beton und Spritzbeton auf die Baustelle. Für den Transport aller anderen Materialien auf die Baustelle werden Annahmen bzgl. der Transportdistanzen und der Art des Transports getroffen.

Systemgrenze Maschinen und Geräte

Aufgrund fehlender Informationen zu Wiederverwendung, Herkunft, Alter und Zustand der Maschinen und Geräte sind hier die Herstellung und Verwendung sowie der Transport zur und von der Baustelle nicht berücksichtigt.

A/4 Sachbilanz

Die zweite Phase der Ökobilanzierung ist die „Sachbilanz“. Sie beinhaltet die Datenerhebung und Datenaufbereitung.

A/4.1 Datenerhebung

Die für das Beispiel verwendeten Daten basieren auf den Verbrauchsmengen. Die in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigten Verbrauchsmengen sind in **Tabelle A-1** angegeben.

In **Tabelle A-2** sind die in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigten Transportentfernungen gegeben. Für die Transportentfernungen des Ausbruchmaterials, sowie für den Beton, Spritzbeton und Zusatzmittel liegen Daten vor. Für alle anderen Materialien ist eine Transportentfernung von 100 km angenommen.

A/4.2 Emissionsfaktoren – Treibhausgase

Zur Bestimmung der Treibhausgas-Emissionsfaktoren werden die ÖkobaDat, die Datenbank des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (kurz IBU) und die EPD-Norge-Digi herangezogen. Die ÖkobaDat und die IBU-Datenbank sind die primär verwendeten Datenbanken. Die verwendeten Emissionsfaktoren der

Tabelle A-1 Berücksichtigte Verbrauchsmengen

Baugruppe	Materialbezeichnung	Menge	Einheit
Ausbruch	Diesel	530.319	l
	Strom	1.029.686	kWh
	Ausbruchmaterial	164.711	m ³
	Sprengschnur	101.639	m
	Sprengstoff patroniert, gelatinös	135.556	kg
	Zünder elektrisch	103.676	Stück
	Zünder nicht elektrisch	11.428	Stück
	Bohrstahl, Durchmesser 36–43 mm	243.673	m
	Öl, Fette, Schmierstoffe	24.612	l
Sicherung	Rohrschirm – Anfängerrohr, Durchmesser 114 mm, Länge 3 m	140	Stück
	Rohrschirm – PVC-Rohr; Länge 2,6 m	140	Stück
	Rohrschirm – Verlängerungsrohr, Länge 3 m	704	Stück
	Pilotbohrkrone	6	Stück
	Bohrstahl, Durchmesser 36–43 mm	82.723	m
	Spieß, Länge 3 m	15.830	Stück
	SB-Anker, DN38, Länge 4 m	362	Stück
	SB-Anker, DN38, Länge 6 m	1.122	Stück
	SN-Anker, DN25, Länge 4 m	9.897	Stück
	SN-Anker, DN25, Länge 6 m	1.673	Stück
	Ankermörtel	607.348	kg
	Gitterträger 190/20/30 (14,1 kg/m)	9.058	m
	IB 100 (21 kg/m)	14.934	m
	BSt 500 S	2	t
	Betonstahlmatten	612	t
	Nassspritzbeton C20/25	22.086	m ³
	Beschleuniger für Spritzbeton	508.477	kg
	Verzögerer für Spritzbeton	7.822	kg
	Beton C8/10	50	m ³
	Fließmittel	135	kg

Fortsetzung Tabelle A-1

Baugruppe	Materialbezeichnung	Menge	Einheit
Innenschale	Diesel	29.500	l
	Strom	38.905	kWh
	PE-Folie	4.030	m ²
	Fugenband Tricosal AM 350	52	m
	Fugenband Tricosal AM 500	52	m
	Geotextil	500	m ²
	Gleitschicht, PVC-Folie	2.600	m ²
	Beton C30/37	28.573	m ³
	Betonstahlmatten N94	13.700	m ²
	BSt 500 S	2.063	t
	Fließmittel	55.338	kg
	Entlüftungsschlauch für Firstspaltinjektion	1.875	m
	Firstspaltmörtel	97	m ³
	Injektionsschlauch für Firstspaltinjektion	5.625	m
	Öl, Fette, Schmierstoffe	5.190	l
Innenausbau	Beton C12/15	1.670	m ³
	Flacheisen verzinkt (30x4 mm ²)	3.180	m
	Erdung Rundstahl feuerverzinkt, Durchmesser 10 mm, Länge 3,6 m	15	Stück
	Drainagerohr PE-HD DN200	3.063	m
	Filterkies 16/32	334	m ³
	Kabelschutzrohr PE-HD DN50	880	m
	Kabelschutzrohr PE-HD DN75	4.300	m
	Beton C25/30	610	m ³

Tabelle A-2 Verwendete Transportentfernungen

Bezeichnung Material	Transportentfernung in km	Kommentar
Ausbruchmaterial	20	Aus vorliegenden Daten
Beton, Spritzbeton, Beschleuniger, Verzögerer, Fließmittel	18	Aus vorliegenden Daten
Alle anderen Materialien	100	Annahme, da keine Daten vorliegen

Module A1 bis A3 sind in **Tabelle A-3** zusammengestellt. Sofern die Rezepturen der verwendeten Betone bekannt sind, sollten daraus genauere Werte für die Emissionsfaktoren ermittelt werden.

Die berücksichtigten Datenbanken beinhalten keinen Eintrag für Spritzbeton. In der Treibhausgasbilanzierung ist der Emissionsfaktor von Konstruktionsbeton C30/37 (entspricht dem Bereitstellungsgemisch) für Spritzbeton angesetzt.

Die Treibhausgasemissionen des Transports (Modul A4) sind mit Erfahrungswerten für Treibstoffverbräuche von realen Projekten berücksichtigt. Die

berücksichtigten Treibstoffverbräuche und die zugehörigen Emissionswerte sind in **Tabelle A-4** zusammengestellt.

In Modul A5 sind die Treibhausgasemissionen abgebildet, die bei der Verbrennung von Diesel im Betrieb der Baumaschinen/Baugeräte entstehen. Der verwendete Emissionsfaktor ist in **Tabelle A-5** angegeben.

Tabelle A-3 Verwendete Emissionsfaktoren der Module A1–A3 (Herstellung)

Material		Quelle	Emissionsfaktor GWP	Einheit
Beton	C30/37	IBU-Datenbank	196,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C25/30	IBU-Datenbank	181,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C20/25	IBU-Datenbank	157,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C8/10	IBU-Datenbank	112,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	Fließmittel	IBU-Datenbank	1,53	kg CO ₂ -Äq./kg
Spritzbeton	C20/25	siehe Beton C30/37		
	Erstarrungsbeschleuniger	IBU-Datenbank	1,34	kg CO ₂ -Äq./kg
	Verzögerer	IBU-Datenbank	1,23	kg CO ₂ -Äq./kg
Stahl	Bewehrungsstahl	Ökobaudat	615,00	kg CO ₂ -Äq./t
	Betonstahlmatten und Gitterträger	IBU-Datenbank	544,00	kg CO ₂ -Äq./t
	Baustahl	IBU-Datenbank	560,00	kg CO ₂ -Äq./t
	Stahl feuerverzinkt	Ökobaudat	2.935,00	kg CO ₂ -Äq./t
Kunststoff	Tunnelabdichtung (PVC-Folie)	EPD-Norge-Digi	3,20	kg CO ₂ -Äq./m ²
	PE-Noppenfolie	Ökobaudat	4,12	kg CO ₂ -Äq./m ²
	PVC-Rohr	Ökobaudat	1,93	kg CO ₂ -Äq./kg
	PE-Rohr	Ökobaudat	2,04	kg CO ₂ -Äq./kg
	Geotextil	IBU-Datenbank	0,39	kg CO ₂ -Äq./m ²
Sprengmittel	Gelatinöser Sprengstoff – Eurodyn 2000	EPD-Norge-Digi	2,26	kg CO ₂ -Äq./kg
	Elektrische Zünder	EPD-Norge-Digi	0,33	kg CO ₂ -Äq./Stück
Mörtel	Zementmörtel	Ökobaudat	319,40	kg CO ₂ -Äq./m ³
Boden/Füllmaterial	Kies Korngröße 2/32	Ökobaudat	0,00262	kg CO ₂ -Äq./kg
Sonstiges	Öl, Fette, Schmierstoffe	siehe Diesel		
Diesel/Strom	Diesel-(Produktion)	Sphera Datenbank	0,41	kg CO ₂ -Äq./l
	Strom	Ökobaudat (Strommix 2021)	0,40	kg CO ₂ -Äq./kWh

Tabelle A-4 Angesetzte Treibstoffverbräuche und zugehörige Emissionswerte (Modul A4 – Transport)

Fahrzeug	Treibstoffverbrauch [l/100 km]		Emissionen [kg CO ₂ Äq./km]	
	nicht beladen	voll beladen	nicht beladen	voll beladen
4-Achser 30 t (Ladefähigkeit 5 m ³ , 30 t)	22,7	37,1	0,73	1,19
Betonmischer (Ladefähigkeit 8 m ³)	22,7	37,1	0,73	1,19

Tabelle A-5 Verwendete Emissionsfaktoren des Moduls A5 (Errichtung – Einbauprozess)

Prozess	Quelle	Emissionsfaktor	Einheit
Verbrennung Diesel durch den Betrieb von Baumaschinen/Geräten	Sphera Datenbank	3,35	kg CO ₂ -Äq./l

A/4.3 Ergebnisse der Sachbilanz

Die Informationen der Sachbilanz bilden die Basis für die Wirkungsabschätzung. Um die Materialmengen aus **Tabelle A-1** mit den Emissionswerten aus **Tabelle A-3** verknüpfen zu können, müssen die Einheiten kompatibel sein. Dazu bedarf es teilweise Umrech-

nungen der Materialmengen. In **Tabelle A-6** sind die Annahmen für die Treibhausgasbilanzierung der Materialien zusammengefasst.

Die Umrechnung der Materialeinheit in die jeweilige Basiseinheit der Emissionswerte ist beispielhaft für den Bohrstahl in der Baugruppe Ausbruch dargestellt:

Tabelle A-6 Wichtige Annahmen für die Treibhausgasbilanzierung der Materialien

Baugruppe	Materialbezeichnung	Annahme für Treibhausgasbilanzierung
Ausbruch	Sprengschnur	Sprengstoffgehalt 80 g pro Meter
	Zünder, elektrisch	Sprengstoffgehalt 1,5 g pro Zünder
	Bohrstahl	Gegebene Länge ist Bohrlochlänge, Bohrstahlverbrauch = Bohrlochlänge / 1000; Durchmesser 40 mm
Sicherung	Rohrschirm – Anfängerrohr	Wandstärke 6,3 mm
	Rohrschirm – PVC-Rohr	Wandstärke 6,3 mm
	Rohrschirm – Verlängerungsrohr	Wandstärke 6,3 mm
	Pilotbohrkrone	35 kg/Stück
Innenschale	Entlüftungsschlauch für Firstspaltinjektion	PVC-Schlauch, Dichte PVC 1,38 g/cm ³ , Innendurchmesser 11 cm, Außendurchmesser 19 cm
	Injektionsschlauch für Firstspaltinjektion	PVC-Schlauch, Dichte PVC 1,38 g/cm ³ , Innendurchmesser 11 cm, Außendurchmesser 19 cm
	Fugenband AM 350	Polyurethan, Dichte 1,2 g/cm ³
	Fugenband AM 500	Polyurethan, Dichte 1,2 g/cm ³
Innenausbau	Drainagerohr PE-HD	Dichte 950 kg/m ³
	Kabelschutzrohr PE-HD	Dichte 950 kg/m ³

Querschnittsfläche Bohrstahl:

$$A = \pi \cdot \left(\frac{0,04 \text{ m}}{2}\right)^2 = 0,001257 \text{ m}^2$$

Dichte Stahl:

$$\rho = 7.850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Gewicht Bohrstahl:

$$M = A \cdot \frac{243.673,727 \text{ m}}{1000} \cdot 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 2.404,44 \text{ kg}$$

A/5 Wirkungsabschätzung

A/5.1 Baugruppe „Ausbruch“

In **Abbildung A-12** sind die GWP-Anteile der Baugruppe „Ausbruch“ für die verschiedene Bauteile abgebildet. Auf die Baugruppe „Ausbruch“ entfallen insgesamt 23 % der Gesamtemissionen (4.104.698 kg CO₂-Äq., vgl. auch **Abbildung 5-3**).

In dieser Baugruppe sind die Treibhausgasemissionen durch den Dieselverbrauch mit 48,7 % (1.998.472 kg CO₂-Äq.) der maßgebende Treiber. Der Anteil davon, der bei der Verbrennung des Diesels durch Baumaschinen/Baugeräte während der Ausbrucharbeiten entsteht, beträgt 89 %; der Rest entfällt auf dessen Herstellung.

Knapp 31 % der Treibhausgasemissionen (1.265.011 kg CO₂-Äq.) der Baugruppe „Ausbruch“ entstehen durch den Abtransport des Ausbruchmaterials von der Baustelle.

Auf den Stromverbrauch entfallen 10 % der Treibhausgasemissionen (413.934 kg CO₂-Äq.).

Durch die Herstellung und den Transport der Sprengmittel zur Baustelle entstehen ca. 9 % der Treibhausgasemissionen (360.164 kg CO₂-Äq.).

Auf die Kategorie „Sonstiges“ entfallen 1,3 % der Treibhausgasemissionen (67.118 kg CO₂-Äq.). Darunter sind Bohrgestänge und Schmiermittel zusammengefasst.

A/5.2 Baugruppe „Sicherung“

In **Abbildung A-13** sind die GWP-Anteile der Baugruppe „Sicherung“ für die verschiedene Bauteile abgebildet. Der Anteil der Baugruppe „Sicherung“ an den Gesamtemissionen beträgt 34 % (6.134.363 kg CO₂-Äq., vgl. auch **Abbildung 5-3**).

In dieser Baugruppe ist der Spritzbeton mit 83,4 % (5.115.902 kg CO₂-Äq.) der maßgebende Treiber. Hierbei kommen 98 % der Treibhausgasmissionen aus der Herstellung des Spritzbetons und der zugehörigen Zusatzmittel.

Knapp 9,6 % der Treibhausgasemissionen der Baugruppe „Sicherung“ (586.346 kg CO₂-Äq.) entstehen durch die Herstellung und den Transport der Bewehrung.

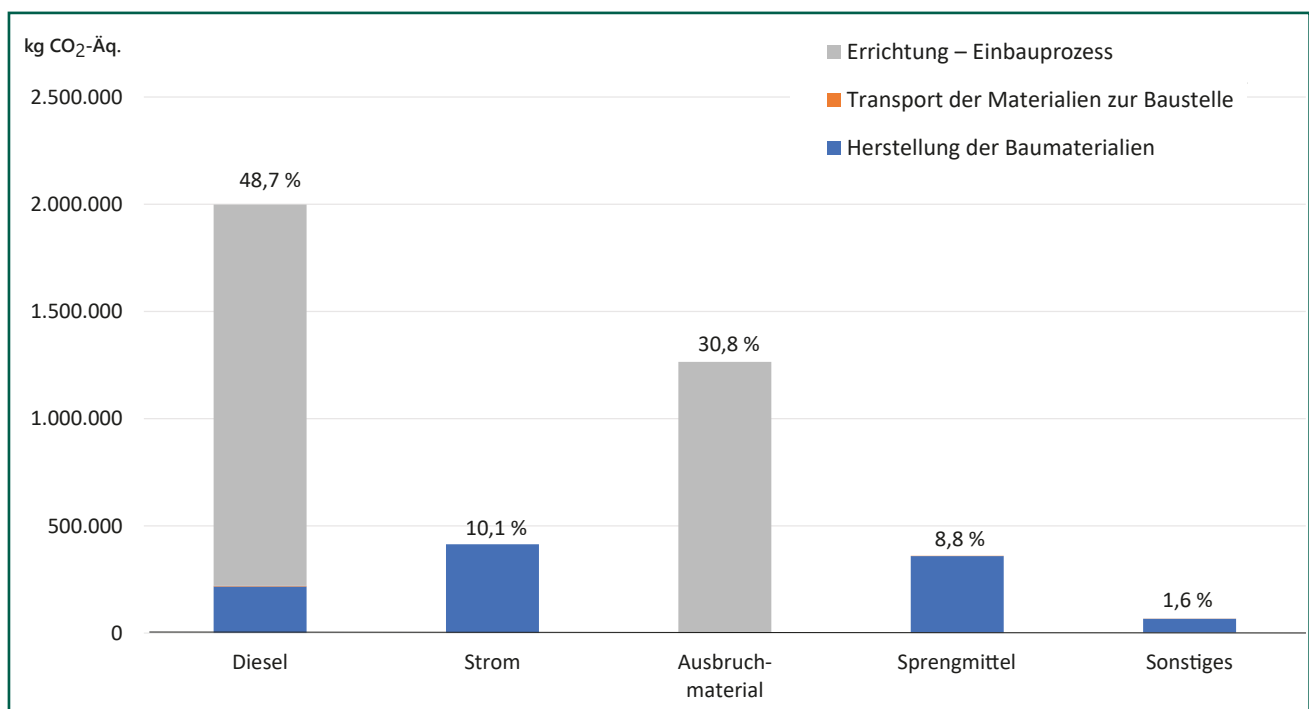


Abbildung A-12 THG-Emissionen Baugruppe „Ausbruch“

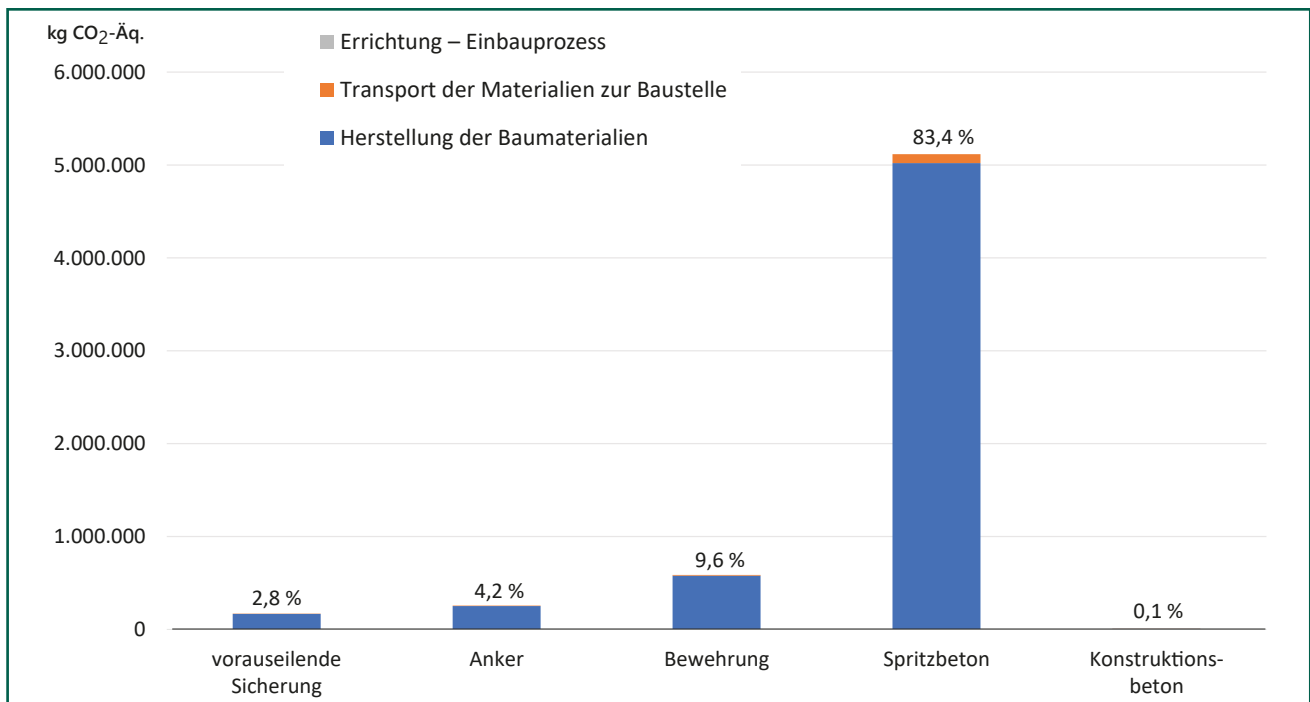


Abbildung A-13 THG-Emissionen Baugruppe „Sicherheit“

Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung und beim Transport der Anker und der vorausseilenden Sicherung entstehen machen 7 % der Treibhausgasemissionen dieser Baugruppe aus (426.032 kg CO₂-Äq.).

A/5.3 Baugruppe „Innenschale“

In den **Abbildungen A-14a/b** sind die GWP-Anteile der Baugruppe „Innenschale“ für die verschiedenen Bauteile abgebildet. Die Baugruppe „Innenschale“ ist der maßgebliche Treiber mit 41 % der Gesamtemissionen (7.306.172 kg CO₂-Äq., vgl. auch **Abbildung 5-3**).

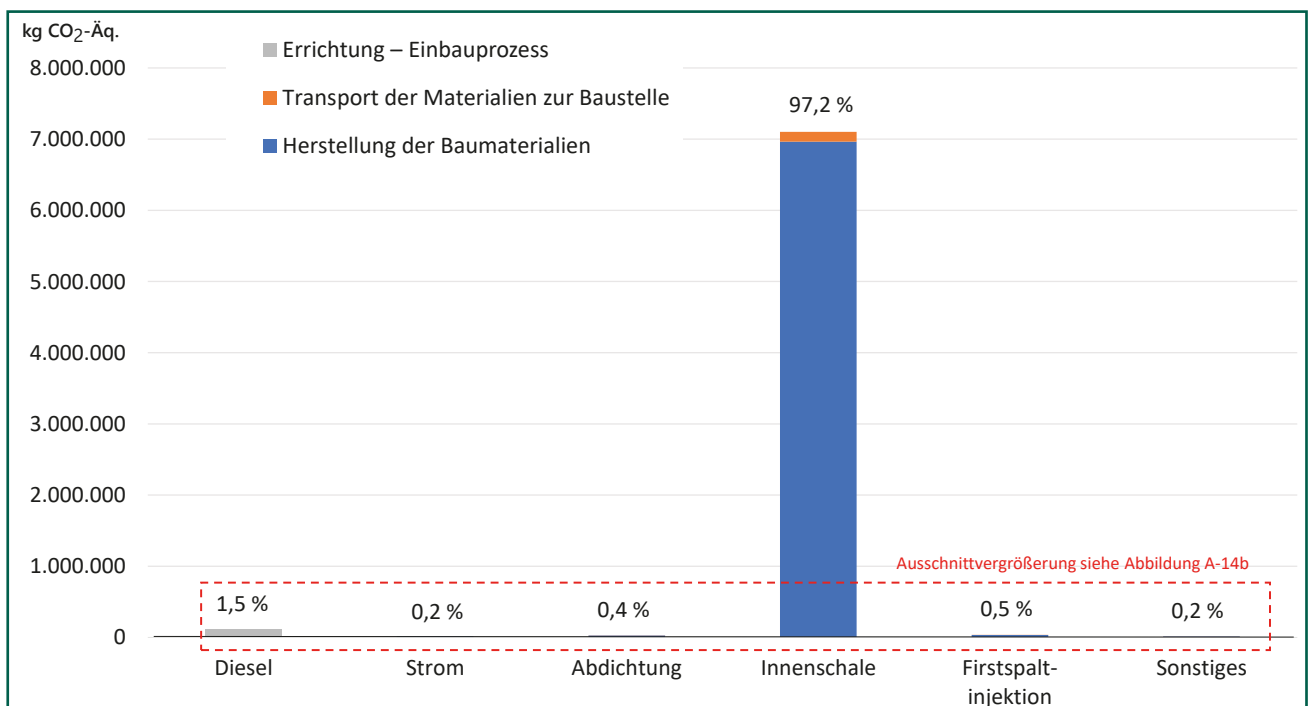


Abbildung A-14a THG-Emissionen Baugruppe „Innenschale“

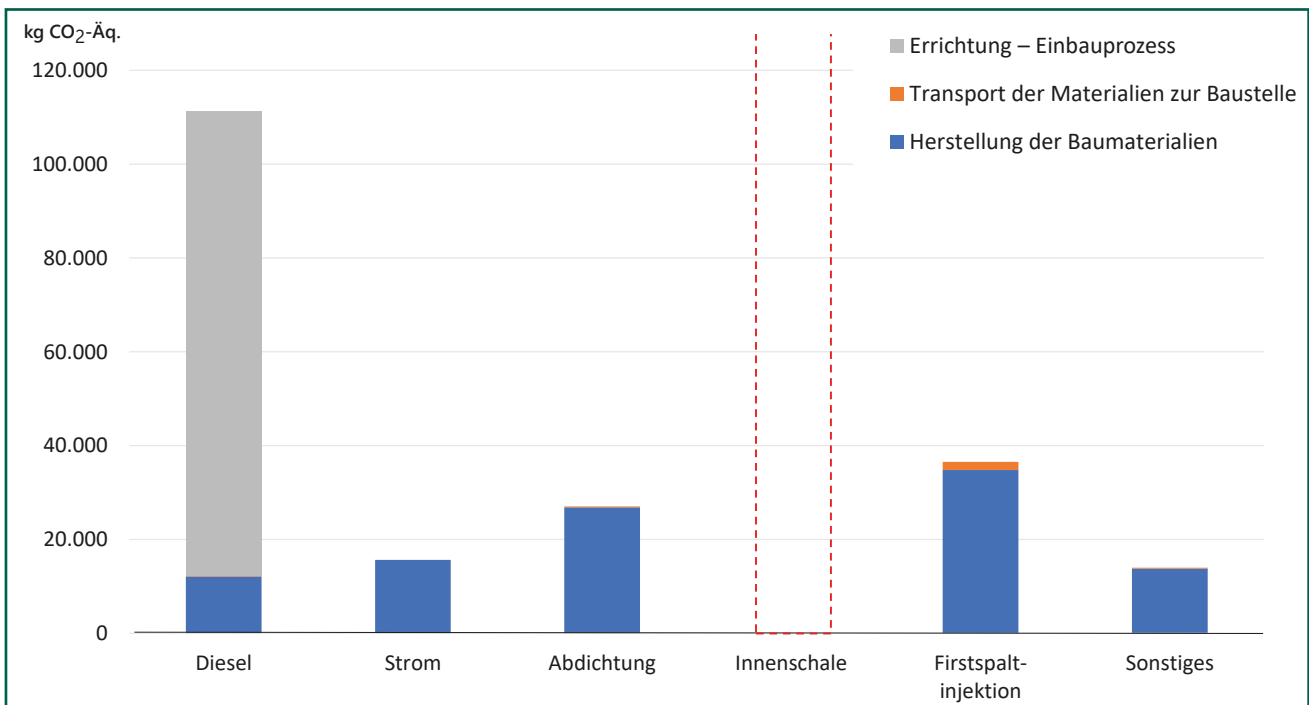


Abbildung A-14b THG-Emissionen Baugruppe „Innenschale“ (Ausschnittvergrößerung ohne Innenschale)

In dieser Baugruppe ist das Bauteil „Innenschale“ mit 97 % (7.101.798 kg CO₂-Äq.) der maßgebende Treiber. Dazu gehören der Innenschalenbeton, die Bewehrung und die Betonzusatzmittel.

Durch die Herstellung, den Transport und die Nutzung des Diesels auf der Baustelle entstehen 1,5 % der Treibhausgasemissionen der Baugruppe „Innenschale“ (111.203 kg CO₂-Äq.).

Die Herstellung und der Transport der Materialien der Firstspaltinjektion, der Materialien der Abdichtung (PE-Folie, Gleitschicht, Geotextil, Fugenband), des Stroms, sowie sonstiger Materialien (Öle, Fette, Schmierstoffe, Schalöl) machen 1,3 % der Gesamtemissionen dieser Baugruppe aus (93.171 kg CO₂-Äq.).

In **Abbildung A-15** sind die Treibhausgasemissionen für den Beton, die Bewehrung und die Zusatz-

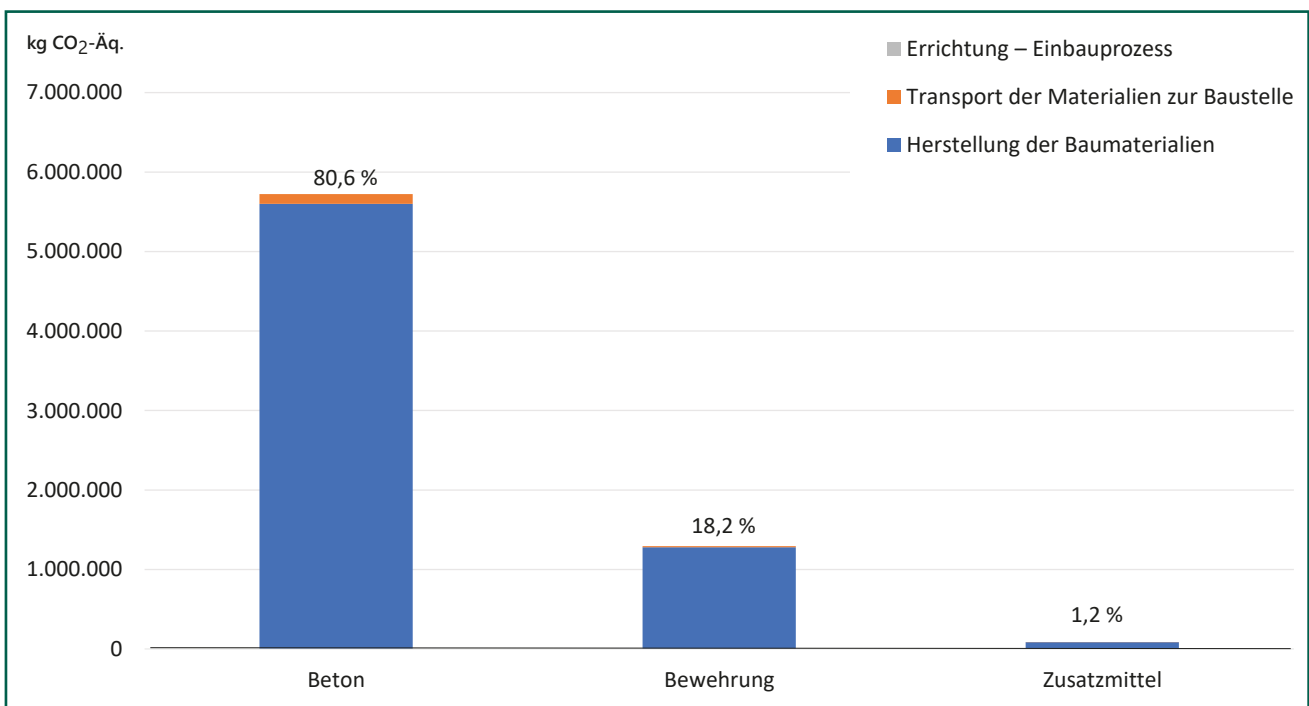


Abbildung A-15 THG-Emissionen Bauteil „Innenschale“ (in der Baugruppe „Innenschale“)

mittel der Innenschale dargestellt. Auf die Herstellung und den Transport des Betons des Bauteils „Innenschale“ entfallen 81 % der Treibhausgasmissionen (5.723.845 kg CO₂-Äq.).

Aus der Herstellung und des Transports der Bewehrung kommen 18 % der Treibhausgasmissionen (1.293.215 kg CO₂-Äq.) des Bauteils „Innenschale“.

Aus der Herstellung und des Transports der Zusatzmittel kommen 1 % der Treibhausgasmissionen (84.737 kg CO₂-Äq.) des Bauteils „Innenschale“.

A/5.4 Baugruppe „Innenausbau“

In **Abbildung A-16** sind die THG-Emissionen der Baugruppe „Innenausbau“ für die verschiedene Bauteile abgebildet. Der Anteil der Baugruppe „Innenausbau“ an den Gesamtemissionen beträgt 2 % (386.023 kg CO₂-Äq., vgl. auch **Abbildung 5-3**).

In dieser Baugruppe ist der Füllbeton Sohle mit 57,7 % (222.689 kg CO₂-Äq.) der maßgebende Treiber.

Der zweite wesentliche Haupttreiber sind die Materialien zur Herstellung der Bankette mit 32,5 % der Gesamtemissionen dieser Baugruppe (125.277 kg CO₂-Äq.).

Die restlichen 10 % der Treibhausgasmissionen (38.058 kg CO₂-Äq.) entstehen durch die Herstellung und den Transport der Materialien für die Entwässerung und der Erdung.

A/5.5 Gesamtbilanz nach Baugruppen

Die Gesamtemissionen des Tunnelrohbaus für das Beispielprojekt betragen für die Module A1 bis A5 ca. **17.931.000 kg CO₂-Äq.**

In **Abbildung A-17** sind die Gesamtemissionen aufgeteilt nach den Baugruppen dargestellt. Die Baugruppe „Innenschale“ ist der maßgebliche Treiber mit 41 % der Gesamtemissionen (7.306.172 kg CO₂-Äq.). Der Anteil der Baugruppe „Sicherung“ an den Gesamtemissionen beträgt 34 % (6.134.363 kg CO₂-Äq.). Auf die Baugruppe „Ausbruch“ entfallen 23 % der Gesamtemissionen (4.104.698 kg CO₂-Äq.). Den geringsten Anteil an den Gesamtemissionen hat die Baugruppe „Innenausbau“ mit 2 % (386.023 kg CO₂-Äq.). Diesel und Strom sind nur in der 1. und 3. Baugruppe („Ausbruch“ und „Innenschale“) enthalten. Die Treibhausgasmissionen von Diesel und Strom betragen 14,2 % der Gesamtemissionen.

In **Abbildung A-18** sind die THG-Emissionen der Baugruppen aufgeteilt nach den Lebenszyklusphasen dargestellt. In den Baugruppen „Sicherung“, „Innenschale“ und „Innenausbau“ sind die Module A1–A3 (Herstellung der Baumaterialien) die dominierenden Module. In diesen drei Baugruppen entfallen jeweils über 95 % der Gesamtemissionen auf die Module A1–A3. In den Baugruppen „Sicherung“ und „Innenausbau“ ist in der Treibhausgasbilanzierung das Modul A5, aufgrund mangelnder Daten, nicht berücksichtigt. In der Baugruppe „Ausbruch“ dominiert das Modul A5 (Errichtung – Einbauprozess) mit 74 %. Dies ist darauf

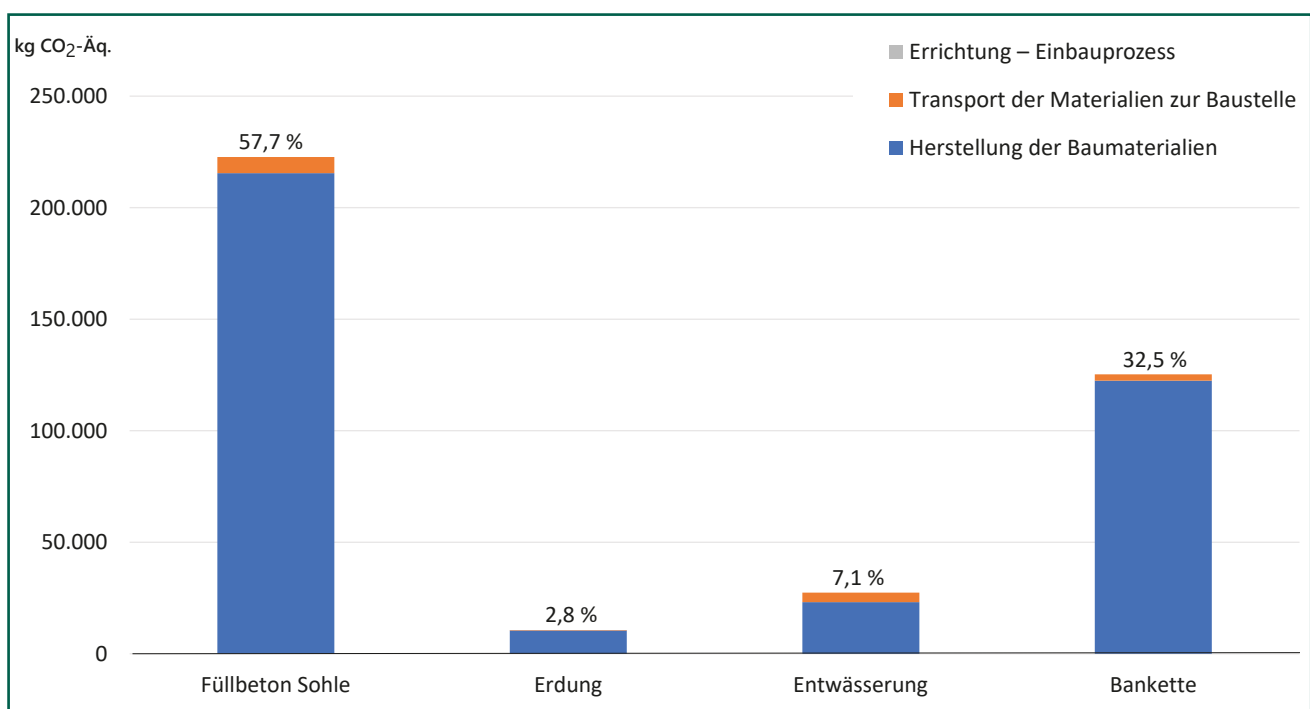


Abbildung A-16 THG-Emissionen Baugruppe „Innenausbau“

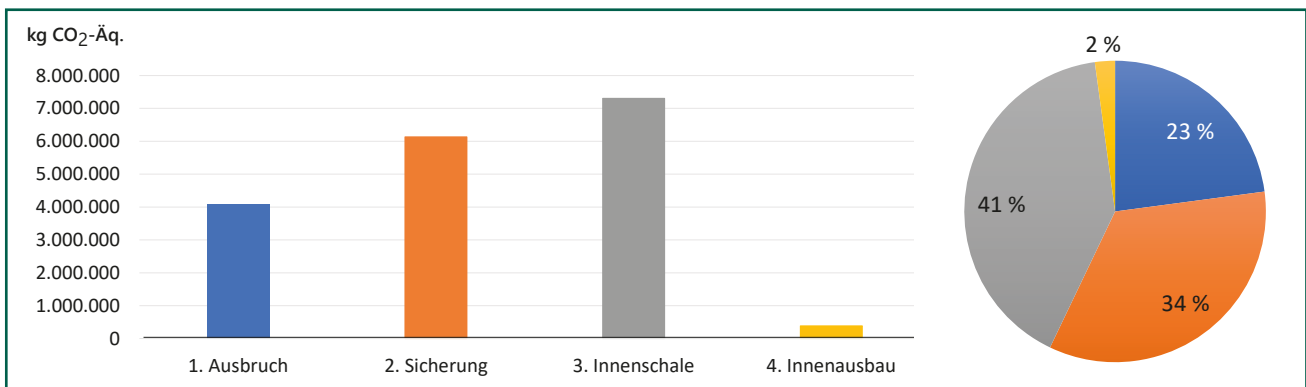


Abbildung A-17 THG-Emissionen der Baugruppen (Diesel und Strom nur in Baugruppe 1 und 3 enthalten)

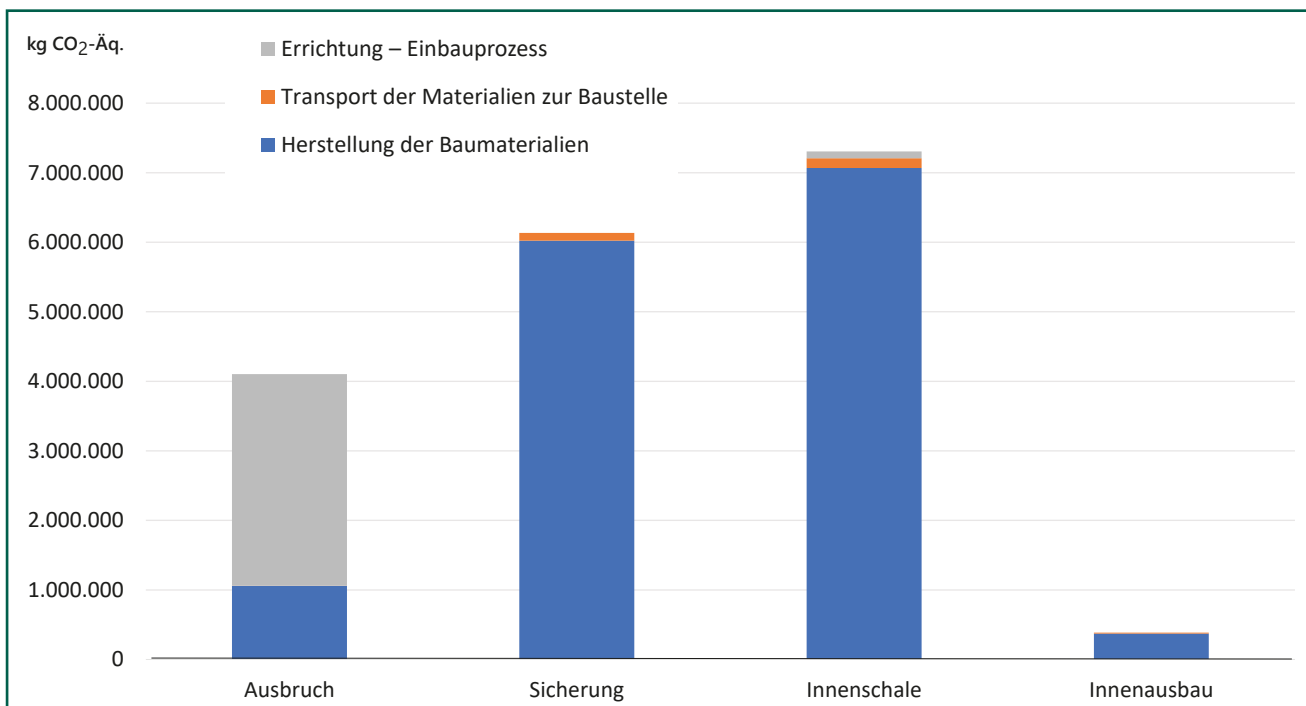


Abbildung A-18 THG-Emissionen der Baugruppen und Lebenszyklusphasen

zurückzuführen, dass der Transport des Ausbruchmaterials und der damit verbundene Dieselverbrauch dieser Lebenszyklusphase zugeordnet ist.

A/5.6 Analyse der Lebenszyklusmodule

In **Abbildung A-19** sind die Gesamtemissionen zur Herstellung des Tunnelrohbaus aufgeteilt nach den Lebenszyklusmodulen dargestellt. Durch die Herstellung der Baumaterialien entstehen 81 % der Gesamtemissionen. Durch die Errichtung und den Einbauprozess entstehen 18 % der Gesamtemissionen. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials in dieser Lebenszyklusphase bilanziert ist. Auf den Transport der Materialien zur Baustelle entfallen 1 % der Gesamtemissionen.

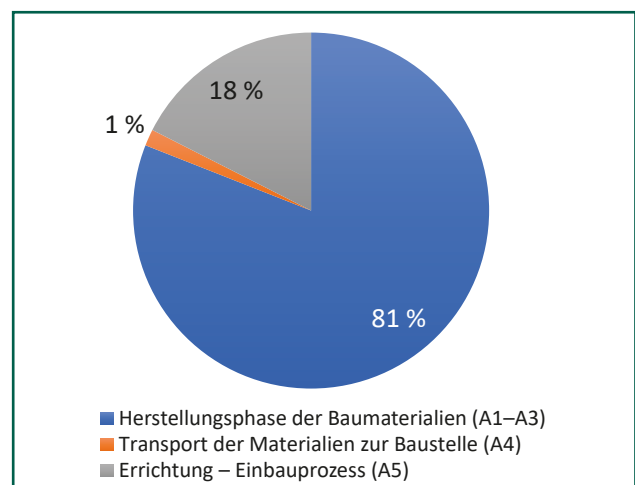


Abbildung A-19 Gesamtemissionen aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen

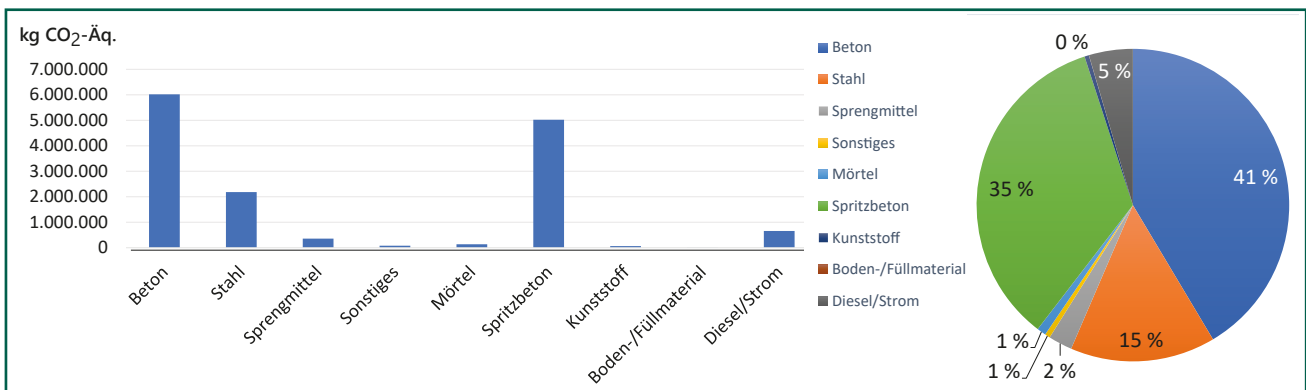


Abbildung A-20 THG-Bilanzierung Ebene 6 „Material“ (Lebenszyklusmodule A1–A3)

In **Abbildung A-20** werden die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung der Materialien entstehen, genauer betrachtet. Durch die Betonproduktion entstehen 41 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 33,6 % der Gesamtemissionen.

Durch die Produktion des Spritzbetons entstehen 35 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3, das sind 28 % der Gesamtemissionen. Somit entstehen 61,6 % der Gesamtemissionen durch die Herstellung des Konstruktions- und Spritzbetons.

Durch die Stahlproduktion entstehen 15 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3, das sind 12 % der Gesamtemissionen.

In **Abbildung A-21** werden die Treibhausgasemissionen, die durch „Errichtung – Einbauprozess“ entstehen, genauer betrachtet. Durch die Verbrennung von Diesel entstehen 60 % der Emissionen des Moduls A5, das sind 9,0 % der Gesamtemissionen.

Durch den Abtransport des Tunnelausbruchmaterials entstehen 40 % der Treibhausgasemissionen des Moduls A5, das sind 6,1 % der Gesamtemissionen.

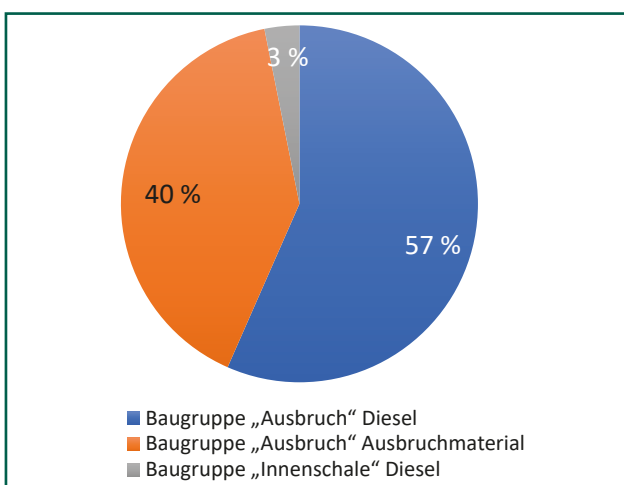


Abbildung A-21 THG-Emissionen Modul A5

A/6 Auswertung

Die letzte Phase „Auswertung“ stellt die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengefasst dar. In dieser Phase wird versucht, anhand der Ergebnisse Schlussfolgerungen, Erläuterungen oder Empfehlungen abzuleiten.

In **Tabelle 7** sind die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung des einröhrigen Straßentunnels in Spritzbetonbauweise zusammengefasst. Es sind die gesamten Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äq., die Treibhausgasemissionen pro Tunnelmeter (1.590 m) und die Treibhausgasemissionen pro m³ Ausbruch (164.711 m³) angegeben.

Maßgebliche Treiber sind die Innenschale (Beton- und Bewehrung) mit 39,6 % der Gesamtemissionen (7.101.798 kg CO₂-Äq.) und der Spritzbeton mit 28,5 % der Gesamtemissionen (5.115.902 kg CO₂-Äq.).

Wie in **Kapitel A/5.6** dieses Anhangs erläutert, entstehen 81 % der Gesamtemissionen in den Modulen A1–A3, also während der Herstellung der Materialien. Davon entfallen 76 % auf die Herstellung des Betons und Spritzbetons und 15 % auf die Stahlherstellung. Diese Gewichtung ist stark von den ausgeführten Ausbruchsklassen und deren Längen abhängig. Bei sicherungsintensiven Vortrieben können die Treibhausgasemissionen des Stahls relevanter werden.

Die Materialtransporte auf die Baustelle haben im Beispielprojekt mit 1 % der gesamten Treibhausgasemissionen eine untergeordnete Rolle.

Auf die Herstellprozesse entfallen 18 % der Gesamtemissionen. Maßgeblich hierfür ist die Verbrennung des Diesels durch die Nutzung von Baumaschinen/Baugeräten (60 %) und der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle (40 %) mit einer Transportstrecke von 20 km. Je länger die Transportstrecke, desto größer wird auch der Anteil an den Gesamtemissionen. Die Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch eine Wiederverwendung des Ausbruchmaterials ist in diesem Beispiel nicht enthalten.

Tabelle A-7 Gesamtemissionen

Baugruppe	Bauteil	Treibhausgasemissionen GWP [kg CO ₂ -Äq.]		
		Total	pro Tunnelmeter	pro m ³ Ausbruch
Ausbruch	Diesel	1.998.472	1.257	12
	Strom	413.934	260	3
	Ausbruchmaterial	1.265.011	796	8
	Sprengmittel	360.164	227	2
	Sonstiges	67.117	42	0
		4.104.588	2.582	25
Sicherung	Vorausseilende Sicherung	169.505	107	1
	Anker	256.528	161	2
	Bewehrung	586.346	369	4
	Spritzbeton	5.115.902	3.218	31
	Konstruktionsbeton	6.083	4	0
		6.134.364	3.858	37
Innenschale	Diesel	111.203	70	1
	Strom	15.640	10	0
	Abdichtung	27.025	17	0
	Innenschale	7.101.798	4.466	43
	Firstspaltinjektion	36.523	23	0
	Sonstiges	13.983	9	0
		7.306.173	4.595	44
Innenausbau	Füllbeton Sohle	222.689	140	1
	Erdung	10.664	7	0
	Entwässerung	27.394	17	0
	Bankette	125.277	79	1
		386.023	243	2
SUMME		17.931.258	11.278	109

ANHANG B: Beispiel Treibhausgasbilanzierung für einen einschaligen Tunnel in Tübbingbauweise

B/1 Allgemeine Vorbemerkungen

In diesem Anhang wird für einen Tunnel im maschinellen Vortrieb eine vereinfachte Ökobilanzierung (nur Auswertung der Wirkungskategorie Klimawandel, somit eine Treibhausgasbilanzierung) nach DIN EN ISO 14040:2021 und 14044:2021 durchgeführt. Ökobilanzierungen bestehen generell aus 4 Phasen (vgl. **Tabelle 7** im Hauptteil):

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Demgemäß wird die Treibhausgasbilanzierung im Folgenden durchgeführt.

B/2 Projektbeschreibung

Bei dem für das Beispiel gewählten Projekt handelt es sich um zwei 8.800 m lange, 1-gleisige Tunnelröhren mit einem Außendurchmesser von 10,94 m. Der Vortrieb erfolgt mittels einer Tunnelbohrmaschine mit Erddruckschild. Die Tunnelröhren werden im Regelfall mit einem einschaligen Tübbingausbau mit ei-

ner Stärke von 45 cm hergestellt. In den als druckhaft prognostizierten Bereichen kommt ein 65 cm dicker Tübbing zum Einsatz. Der Ringspalt beträgt ca. 25 cm und wird mit einem 2-Komponenten Mörtel verfüllt. Der Ausbruchdurchmesser beträgt 11,44 m und der theoretische Ausbruchquerschnitt beträgt ca. 103 m² (**Abbildung B-1**).

Die Ringteilung beträgt 6 Steine + 1 Schlussstein. Jeder Ring hat eine mittlere Länge von 2,00 m. Zusätzlich zu den Standardtübbingungen werden spezielle Sondertübbinge verwendet. Dabei handelt es sich um:

- Tübbinge mit Ankerschienen
- Tübbinge mit zusätzlichen Verpressstutzen
- Tübbinge mit Hülsen + Dübeln
- Übergangstübbinge (beim Wechsel von 45 cm auf 65 cm dicke Tübbinge)

Die Fertigung der Bewehrungskörbe der Tübbinge sowie die Herstellung der Tübbinge erfolgt direkt auf der Baustelle in einer Feldfabrik.

Der Auftragsumfang der ausführenden Baufirma für dieses Projekt beinhaltet die Errichtung des erweiterten Rohbaus der beiden Tunnelröhren. Der Gleisbau und der Einbau der Verkehrsinfrastruktur sowie die Verbindungsbauwerke zwischen den zwei Tunnelröhren sind nicht Teil dieser Treibhausgasbilanzierung.

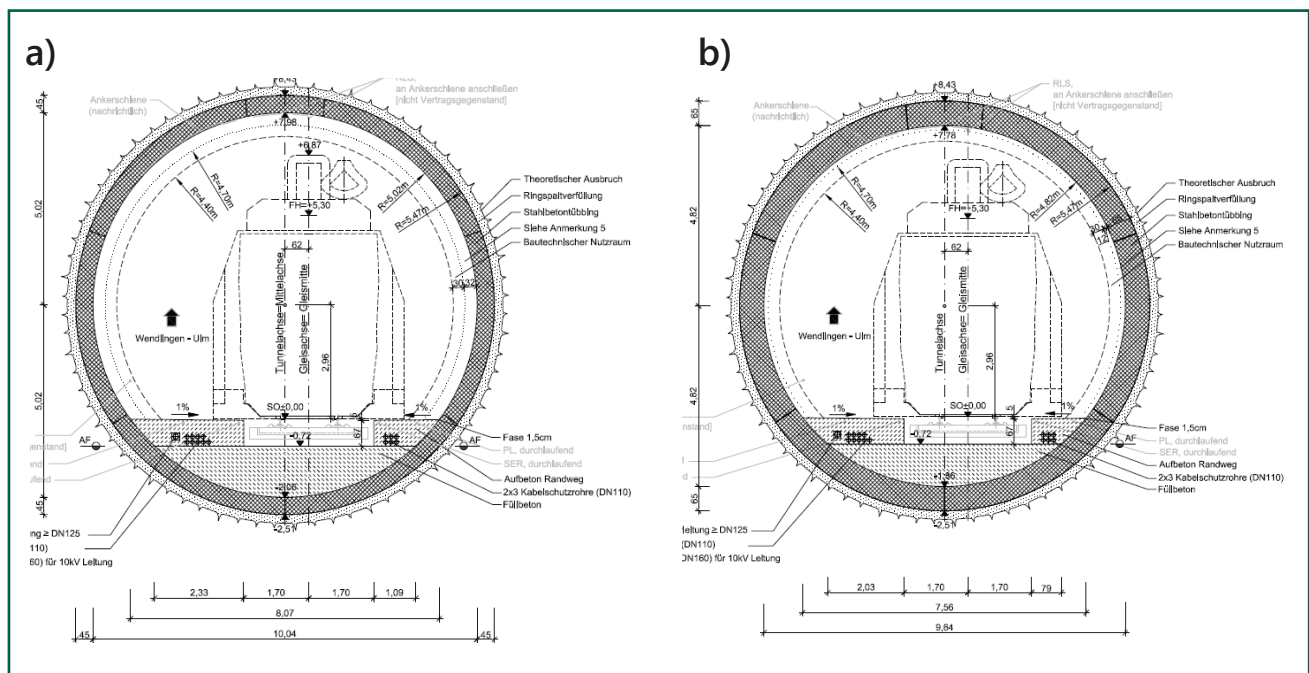


Abbildung B-1 Regelquerschnitte a) 45 cm Tübbing (links), b) 65 cm Tübbing (rechts)

B/3 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Treibhausgasbilanzierung des Beispiel-Projekts soll maßgebliche Treiber der Treibhausgasemissionen während der Herstellung (Lebenszyklusphasen A1 bis A5) des Tunnelrohbaus identifizieren.

B/3.1 Definition des Bauwerktyps

Das betrachtete Bauwerk ist ein zweiröhriges Tunnelbauwerk mit einem eingleisigen Tunnelquerschnitt für den Personenfern- und Nahverkehr in Deutschland. Der Tunnelvortrieb erfolgt mittels Tunnelbohrmaschine mit Erddruckschild. Betrachtet wird nur der Tunnelrohbaus beider Röhren (Tübbingausbau, Sohlauauffüllung).

B/3.2 Definition der berücksichtigten Lebenszyklusphasen

Es werden die Lebenszyklusphasen „Herstellungsphase“ (A1–A3) und „Errichtungsphase“ (A4–A5) berücksichtigt. Diese beiden Phasen umfassen die Leistungen zur Herstellung des Tunnelrohbaus von der Rohstoffproduktion bis zum fertigen Tunnelrohbaus.

B/3.3 Definition des Betrachtungszeitraums

Ein Tunnel wird in Deutschland auf einen Lebenszeitraum von 100 Jahren bemessen. Für die Ökobilanzierung der Module A1 bis A5 spielt die Lebensdauer des Tunnelbauwerks keine Rolle. Für die Bewertung der Gesamtemissionen während dem Lebenszyklus ist die Lebensdauer des Tunnelbauwerks aber nicht zu vernachlässigen

B/3.4 Definition der funktionellen Einheit

Der Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz muss die Funktionen (Leistungsmerkmale) des untersuchten Systems eindeutig festlegen. Die funktionelle Einheit muss dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen. Einer der Hauptzwecke einer funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die die Input- und Outputdaten normiert werden (im mathematischen Sinn). Deshalb muss die funktionelle Einheit eindeutig definiert und messbar sein. Für einen Tunnel können verschiedene funktionelle Einheiten definiert werden, wie z. B. CO₂-Äq. pro Tunnelmeter oder CO₂-Äq. pro m³ Ausbruchsmenge.

Die funktionelle Einheit in diesem Beispiel ist CO₂-Äq. pro Tunnelrohbaumeter.

B/3.5 Definition des funktionalen Äquivalents

Das funktionale Äquivalent ist eine Darstellung der geforderten technischen Merkmale und Eigenschaften sowie Funktionalitäten des Ingenieurbauwerks. In diesem Beispiel ist das funktionale Äquivalent der Rohbau eines eingleisigen, zweiröhriigen Bahntunnels. Der Tunnel wird wasserdicht mit einem einschaligen Tübbingausbau hergestellt.

B/3.6 Definition der Systemgrenzen

Für das vorliegende Anwendungsbeispiel werden die Systemgrenzen über die Herstellung des Rohbaus des Tunnels definiert. Folgende Leistungen und zugehörige Arbeiten sind Teil der Herstellung des Tunnelrohbaus:

- Ausbruchsarbeiten
- Ringbauarbeiten
- Nachinjektionsarbeiten
- Innenausbauarbeiten

Der Gleisbau, der Einbau der Verkehrsinfrastruktur sowie die Herstellung der Verbindungsbauwerke zwischen den zwei Tunnelröhren sind in der Treibhausgasbilanzierung nicht berücksichtigt.

Die Systemgrenzen werden nachfolgend näher erläutert. Dazu werden die oben genannten Leistungen in 5 Baugruppen unterteilt:

1. Ausbruch
2. Sicherung
3. Dauerhafter Ausbau
4. Innenausbau
5. Baustelleneinrichtung

Um die Treibhausgasbilanzierung und die Systemgrenzen graphisch zu veranschaulichen wird eine Baumstruktur definiert. Die Baumstruktur umfasst 6 Ebenen und summiert die Umwelteinwirkungen einzelner Produkte bzw. Bauteile auf, ausgehend von der untersten Ebene 6. Die Ebenen sind:

- Ebene 1: Projekt
- Ebene 2: Bauwerk
- Ebene 3: Baugruppe (siehe oben)
- Ebene 4: Bauteil
 - Modul A4 (falls nicht bereits in Ebene 5 berücksichtigt)
 - Modul A5 (falls Daten vorhanden): Errichtungs- und Einbauprozess

- Ebene 5: Einzelteil
 - Modul A4: Transport der Materialien zur Baustelle
- Ebene 6: Material
 - Module A1-A3: Herstellung Materialien

Die Treibhausgasbilanzierungsstruktur ist wie in **Abbildung B-2** farblich markiert:

- **Grün:** wird in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt
- **Orange:** nicht vollständig in der Treibhausgasbilanzierung erfasst aufgrund der Datensätze
- **Rot:** Wird in der Treibhausgasbilanzierung nicht berücksichtigt
- **Blau:** Material, wird in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt

Systemgrenze Material – Ausbruch

Der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials ist in der Bilanzierung berücksichtigt und dem Modul A5 zugeordnet (**Abbildung B-3**). Ein möglicher treibhausgasreduzierender Einfluss einer Wiederverwendung des Ausbruchmaterials ist in diesem Beispiel nicht enthalten. Der Einbau des Ausbruchmaterials auf Deponien sowie alle anderen Arbeiten betreffend die Deponierung sind nicht berücksichtigt.

Die TBM mit ihren Maschinenkomponenten, den Werkzeugen und den Betriebsmitteln ist ebenfalls in dieser Braugruppe berücksichtigt. Es sind nur die



Abbildung B-2 Legende Baumstruktur

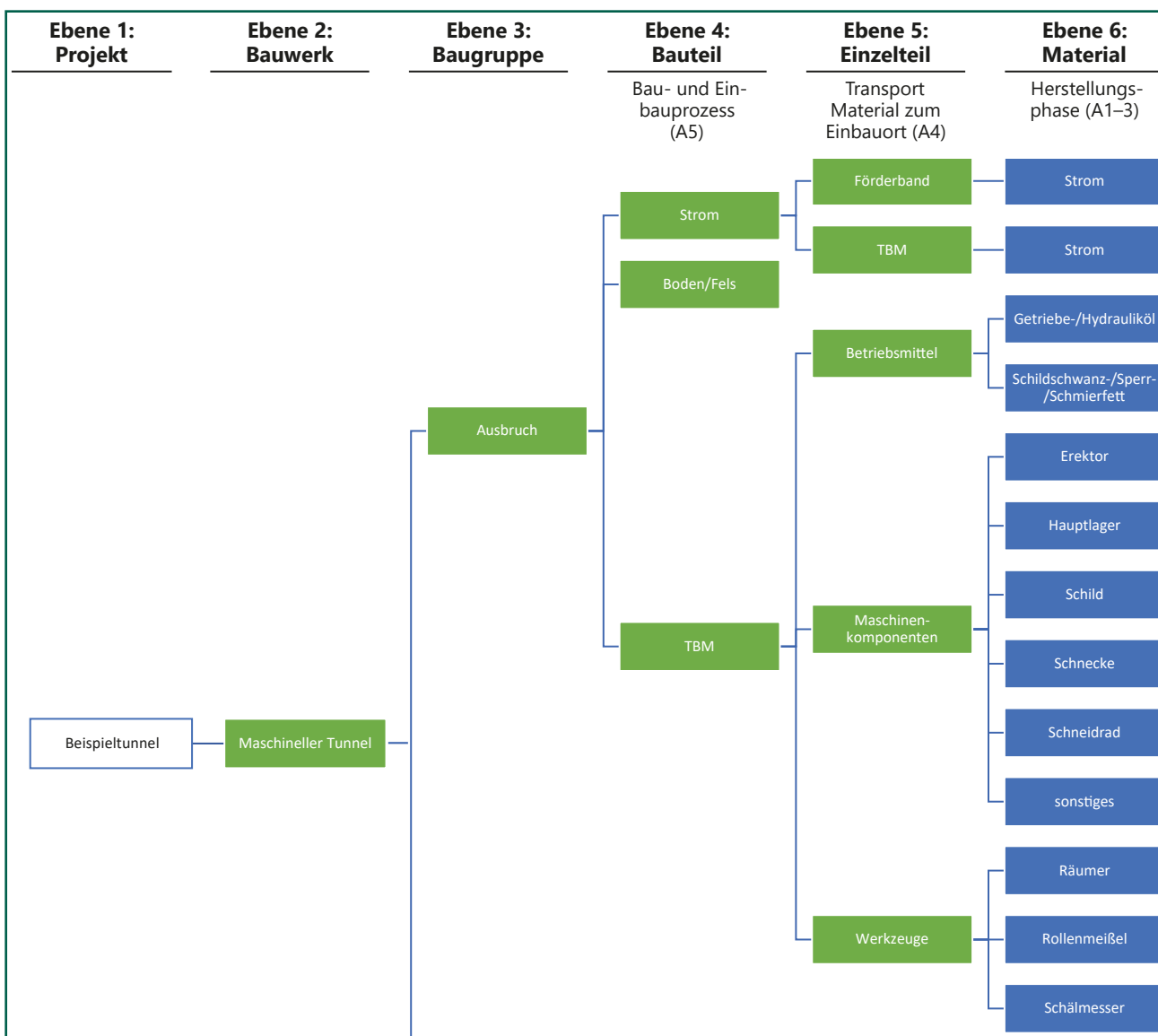


Abbildung B-3 Systemgrenze Ausbruch

Maschinenkomponenten berücksichtigt, die keine Gebraucht Komponenten sind und auch nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden. Die Nachläufer werden komplett wiederverwendet (Rückkauf durch den Maschinenhersteller, Aufbereitung und Verwendung für ein anderes Projekt). Die Motoren, Hydraulikpumpen, Vortriebszylinder etc. sind Gebraucht Komponenten und werden nach Projektende aufgearbeitet. Damit ergeben sich folgende berücksichtigte Komponenten:

- Schneidrad
- Hauptlager
- Erektor-Fahrträger
- Erektor
- Schneckenförderer
- Schildsegmente
- Erektortragkreuz
- Schneckenverschluss
- Rohrleitungen
- Sondierbohrgerät
- Schildschwanz
- Zus. Gewicht (Podeste o. ä.)

In dieser Baugruppe sind die Stromverbräuche des Förderbands und der TBM berücksichtigt.

Systemgrenze Material – Sicherung

Bei der Tunnelbohrmaschine mit Erddruckschild werden zur Konditionierung des Erdbreis Kalk, Tenside (MC-Foamliquid 04 von MC-Bauchemie) und Wasser eingesetzt. In der Treibhausgasbilanzierung ist nur der Kalk berücksichtigt. Zu den Tensiden liegen in den öffentlich zugänglichen Datenbanken keine Angaben zu den Treibhausgas-Emissionsfaktoren vor, daher sind diese nicht berücksichtigt in der Treibhausgas-

bilanzierung. Das zur Konditionierung des Erdbreis benötigte Wasser wird ebenfalls nicht berücksichtigt (**Abbildung B-4**).

Systemgrenze Material – dauerhafter Ausbau

In der Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ sind die Materialien zur Herstellung der Tübbinge berücksichtigt, sowie die Materialien zur Verfüllung des Ringspalts (**Abbildung B-5**).

Die Tübbinge werden mit einem Beton der Druckfestigkeitsklasse C45/55 und C50/60 hergestellt. Für eine erhöhte Brandbeständigkeit werden dem Beton PP-Fasern zugegeben. Bewehrt werden die Tübbinge mit Betonstahl B500B, sowie mit S235 und S355. Folgende Einbauteile der Tübbinge sind in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt:

- Tübbingdichtung
- TOK-Band
- Kunststoffdübel für Stahlschrauben
- Verpressstutzen Typ ZU
- Verpressstutzen Typ III
- Ankerschienen
- Injektionsschläuche
- Edelstahlschrauben
- Schwarzschrauben
- Hartfaserplatten

Der Ringspalt wird mit einem 2-Komponenten Mörtel verfüllt, hierzu liegen detaillierte Daten vor. In der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigt sind das Bentonit, der Zement, der Stabilisator (CBS1) und der Beschleuniger (CBS2). Das zur Herstellung des 2-Komponenten Mörtels benötigte Wasser wird nicht berücksichtigt (**Abbildung B-6**). Die Nachinjektion

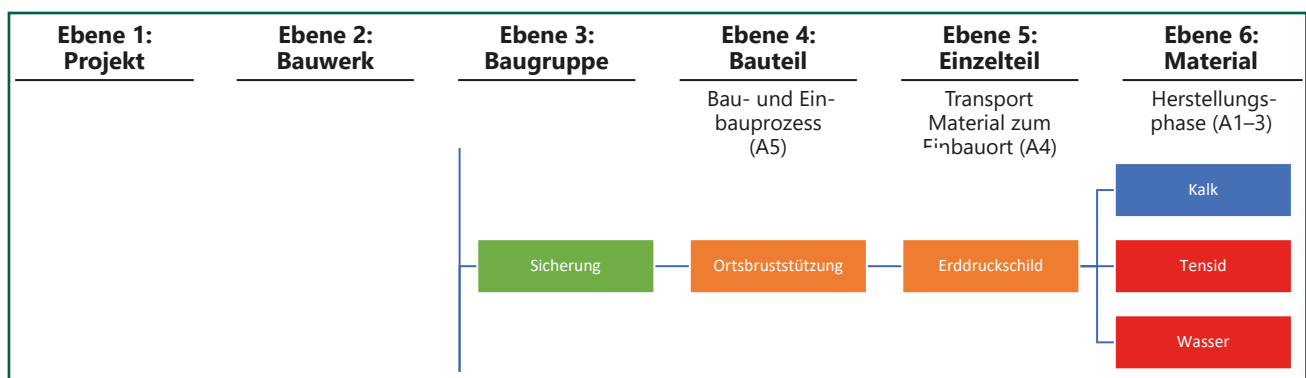


Abbildung B-4 Systemgrenze Sicherung

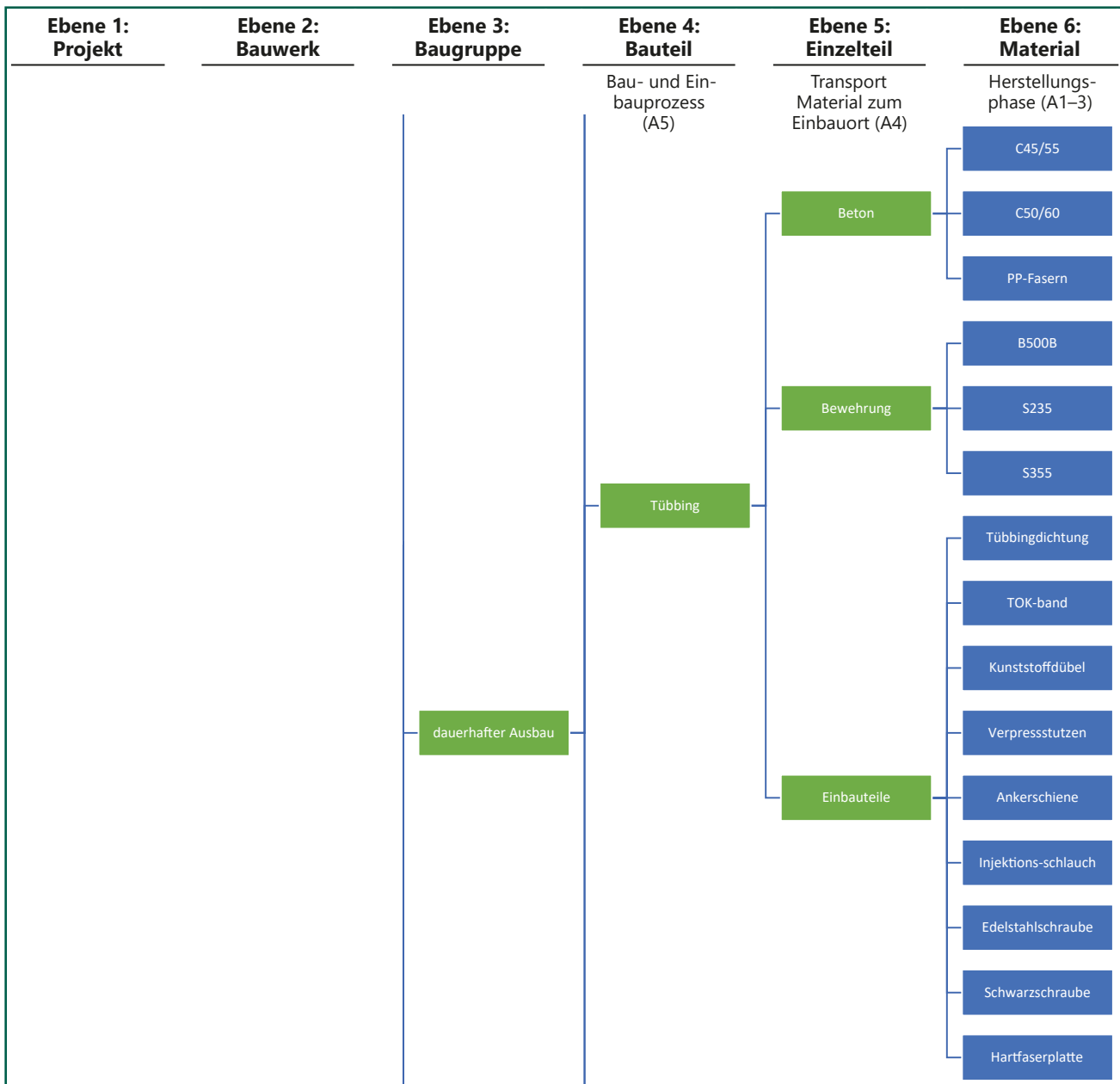


Abbildung B-5 Systemgrenze dauerhafter Ausbau – Tübbing

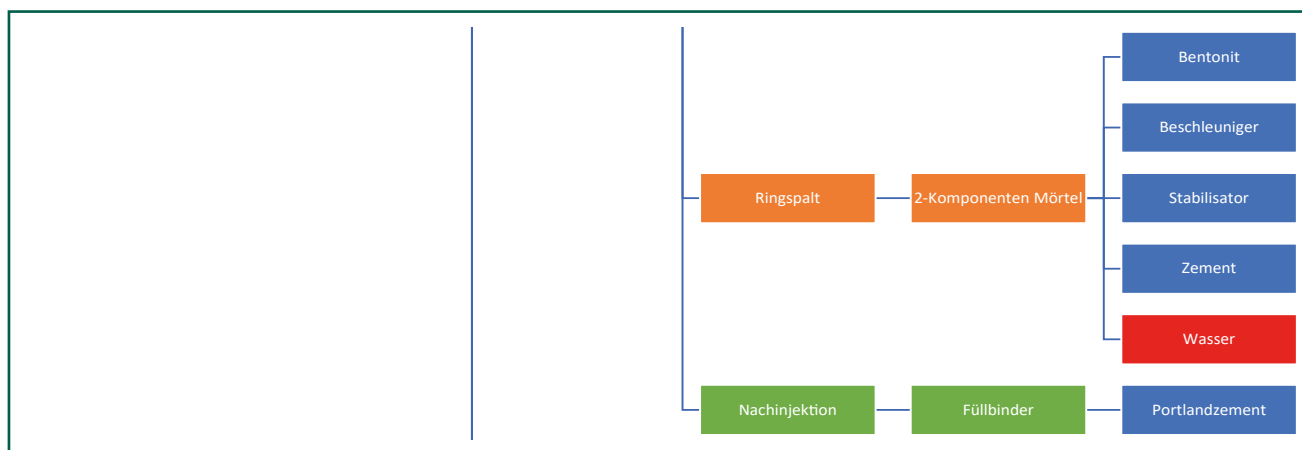


Abbildung B-6 Systemgrenze dauerhafter Ausbau – Ringspalt + Nachinjektion

des Ringspalts erfolgt mit Füllbinder. In dieser Baugruppe sind die Dieselverbräuche der Versorgungszüge (Lokomotiven) und der Stromverbrauch der Tübbingproduktion berücksichtigt (**Abbildung B-7**).

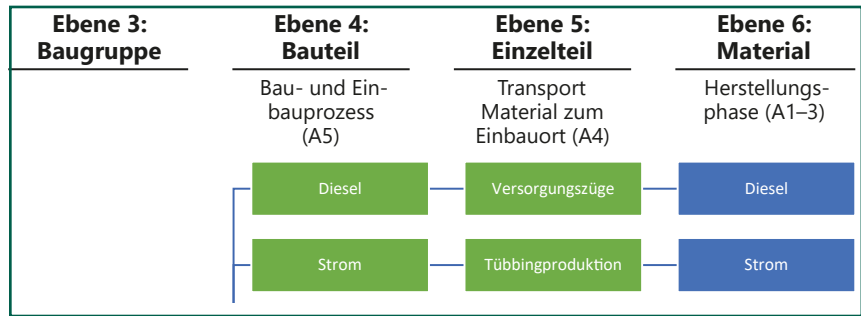


Abbildung B-7 Systemgrenze dauerhafter Ausbau – Diesel- und Stromverbräuche

Systemgrenze Material – Innenausbau

In der Baugruppe „Innenausbau“ sind die Materialien zur Herstellung der Sohlauauffüllung berücksichtigt. Die Treibhausgasbilanzierung der Sohlauauffüllung berücksichtigt den Filterbeton, den Sandbeton, den Füllbeton und die Teilsickerrohre für die Längsentwässerung (**Abbildung B-8**).

In dieser Baugruppe ist der Dieselverbrauch durch den Einbau der Sohlauauffüllung berücksichtigt.

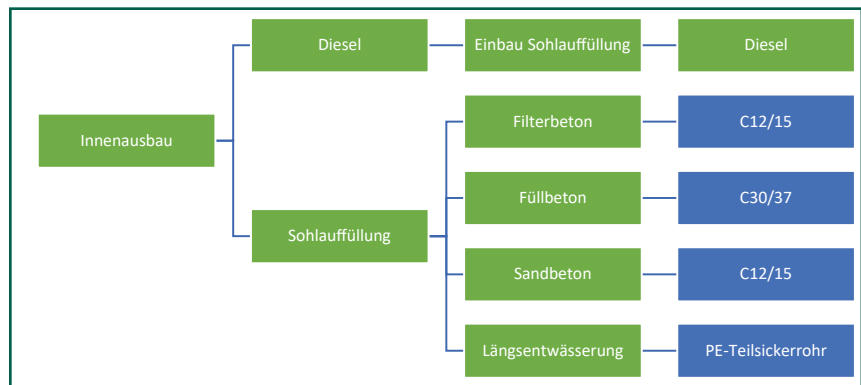


Abbildung B-8 Systemgrenze Innenausbau

Systemgrenze Material – Baustelleneinrichtung

In der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“ sind der Strom- und Dieselverbrauch der kompletten Baustelleneinrichtung berücksichtigt (**Abbildung B-9**). Dazu gehören die Baustellenbüros, der Strom- und Dieselverbrauch aller Baumaschinen und -geräte auf der BE-Fläche (Radlader, Portalkräne, etc.) sowie der Stromverbrauch der Mischanlage für die Sohlauauffüllung.

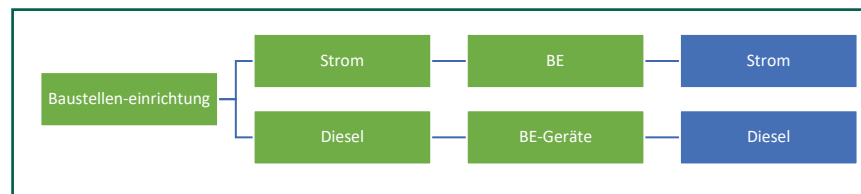


Abbildung B-9 Systemgrenze Baustelleneinrichtung

Systemgrenze Strom- und Dieselverbräuche in der Errichtungsphase

Die Dieselverbräuche liegen für die Versorgungszüge, die BE-Geräte und für den Einbau der Sohlauauffüllung vor. Der Dieselverbrauch der Versorgungszüge ist der Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ zugeordnet, da die Versorgungszüge hauptsächlich zum Tübbing- und Personentransport benötigt werden. Der Dieselverbrauch der BE-Geräte ist in der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“ berücksichtigt. Der Dieselverbrauch aller Maschinen für den Einbau der Sohlauauffüllung ist in der Baugruppe „Innenausbau“ berücksichtigt.

Die Stromverbräuche liegen getrennt vor für den Betrieb des Förderbands, den Betrieb der TBM, die Tübbingproduktion und die restliche Baustelle. Die Stromverbräuche für den Betrieb des Förderbands und der TBM sind in der Baugruppe „Ausbruch“ berücksichtigt. Der Stromverbrauch der Tübbingpro-

duktion ist in der Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ berücksichtigt. Der Stromverbrauch der restlichen Baustelle beinhaltet die komplette BE und ist somit in der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“ berücksichtigt.

Es ist nicht möglich, die Diesel- und Stromverbräuche den einzelnen Arbeitsgängen/Materialien innerhalb dieser Baugruppen zuzuordnen. Deshalb sind die Diesel- und Stromverbräuche in einer eigenen Kategorie bilanziert.

Die Bilanzierung des Diesels berücksichtigt die Module A1 bis A5. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung des Diesels entstehen sind in den Modulen A1–A3 abgebildet. Der Transport des Diesels auf die Baustelle ist in Modul A4 abgebildet. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Verbrennung des Diesels durch den Betrieb der Baumaschinen/Baugeräte entstehen, sind in Modul A5 abgebildet.

Die Treibhausgasbilanzierung des Stroms berücksichtigt die Module A1–A3. Die Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung des Stroms entstehen sind in den Modulen A1–A3 abgebildet. Treibhausgasemissionen, die aufgrund von Leitungs- und/oder Transformationsverlusten entstehen (also in Modul A4), sind nicht berücksichtigt. Durch die Nutzung des Stroms entstehen keine Emissionen, somit wird Modul A5 nicht berücksichtigt.

Systemgrenze Wasser/Abwasser

Aufgrund nicht vorhandener Daten sind alle Arten von Wasserverbräuchen und Wasseraufbereitungsmaßnahmen auf der Baustelle sowie eventuell notwendige Transporte von Brauchwasser zur Baustelle oder von verunreinigtem Wasser zu Kläranlagen nicht berücksichtigt. Wasserverbräuche für die Produkt- und Materialherstellung sind bei den jeweiligen Produktions-/Herzstellprozessen berücksichtigt.

Systemgrenzen Baurestemassen und Bauabfälle

Gängige Baurestemassen und Bauabfälle sind Bewehrungsverschnitt, Betonrestmassen, Spritzbetonrückprall, Holz und Verpackungsmaterial. Aufgrund fehlender Informationen zur Behandlung der Baurestemassen und Bauabfälle sind diese nicht berücksichtigt.

Systemgrenze Transport

Der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle ist in der Bilanzierung berücksichtigt und Modul A5 zugeordnet. Es liegen detaillierte Daten zu den Transporten des Ausbruchmaterials vor. Die Transporte des Betons auf die Baustelle zur Herstellung der Tübbinge sowie zur Herstellung der Sohlauauffüllung entfallen, da der Beton in einer baustelleneigenen Mischanlage hergestellt wird. Für den Transport aller anderen Materialien auf die Baustelle werden Annahmen bzgl. der Transportdistanzen und der Art des Transports getroffen.

Systemgrenze Maschinen und Geräte

In dieser Studie berücksichtigt sind nur die Komponenten der TBM die eindeutig keine Gebraucht Komponenten sind und auch nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden. Aufgrund fehlender Informationen zu Wiederverwendung, Herkunft, Alter und Zustand der restlichen Maschinen und Geräte sind in dieser Studie die Herstellung und Verwendung sowie der Transport zur und von der Baustelle der restlichen Maschinen und Geräte nicht berücksichtigt.

B/4 Sachbilanz

Die zweite Phase für die Ökobilanzierung ist die „Sachbilanz“. Sie beinhaltet die Datenerhebung und Datenaufbereitung.

B/4.1 Datenerhebung

Die für das Beispiel verwendeten Daten basieren auf den Verbrauchsmengen. In **Tabelle B-1** sind die in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigten Verbrauchsmengen angegeben.

In **Tabelle B-2** sind die in der Treibhausgasbilanzierung berücksichtigten Transportentfernungen gegeben. Für die Transportentfernungen des Ausbruchmaterials liegen Daten vor. Für die Maschinenkomponenten und Werkzeuge der TBM ist eine Transportentfernung von 180 km angenommen. Dies entspricht der Entfernung vom Herrenknecht-Werk in Schwanau zur Baustelle. Die Transporte des Betons zur Baustelle entfallen, da der Beton in einer baustelleneigenen Mischanlage hergestellt wird. Für alle anderen Materialien ist eine Transportentfernung von 100 km angenommen.

Tabelle B-1 Berücksichtigte Verbrauchsmengen

Baugruppe	Materialbezeichnung	Menge	Einheit
Ausbruch	Strom – Förderband	8.108.900	kWh
	Strom – TBM	13.414.975	kWh
	Ausbruchmaterial	1.728.649	m ³
	Getriebe-/Hydrauliköl	212.000	l
	Schildschwanz-/Sperr-/Schmierfett	976	t
	Erektor	57	t
	Erektor-Fahrträger	49	t
	Erektor-Tragkreuz	41	t
	Hauptlager	175	t
	Rohrleitungen	1	t
	Schildschwanz	92	t
	Schildsegmente	380	t
	Schneckenförderer	103	t
	Schneckenverschluss	3	t
	Schneidrad	199	t
	Sondierbohrgerät	1	t
	Zus. Gewicht (Podeste o. ä.)	8	t
	Rollmeißel	858	Stück
	Schälmesser	61	Stück
Räumer	148	Stück	
Sicherung	Kalk	5.153	t
	Tensid	263	m ³
Dauerhafter Ausbau	Diesel – Versorgungszüge	433.827	l
	Strom – Tübbingproduktion	5.241.556	kWh
	Beton C45/55	193.288	m ³
	Beton C50/60	86.361	m ³
	PP-Fasern	336.000	kg
	BSt 500B	29.619	t
	S235	6	t
	S355	107	t
	Tübbingdichtung	835.960	m
	TOK-Band	843.806	m

Fortsetzung Tabelle B-1

Baugruppe	Materialbezeichnung	Menge	Einheit
Dauerhafter Ausbau	Kunststoffdübel für Tübbingschraube	348.680	Stück
	Verpressstutzen Typ ZU	30.681	Stück
	Verpressstutzen Typ III	2.232	Stück
	Ankerschiene	16.776	m
	Hartfaserplatte	47.224	m ²
	Injektionsschlauch	59.603	m
	Edelstahlschraube, Länge 0,55 m	2.145	Stück
	Edelstahlschraube, Länge 0,75 m	676	Stück
	Schwarzschraube, Länge 0,55 m	16.700	Stück
	Schwarzschraube, Länge 0,75 m	6.700	Stück
	Bentonit	4.522	t
	Zement CEM III 52,5 N	35.330	t
	Stabilisator (CBS1)	882	t
	Beschleuniger (CBS2)	12.884	t
Füllbinder	4.077	t	
Innenausbau	Diesel – Einbau Sohlauffüllung	125.573	l
	Beton C12/15	2.846	m ³
	Beton C30/37	86.916	m ³
	Teilsickerrohr	17.450	m
Baustelleneinrichtung	Strom	22.098.955	kWh
	Diesel	94.184	l

Tabelle B-2 Verwendete Transportentfernungen

Bezeichnung Material	Transportentfernung in km	Kommentar
Ausbruchmaterial	80	Aus vorliegenden Daten
TBM	180	Annahme, Entfernung Herrenknecht-Werk – Baustelle
Beton	—	Entfällt, da baustelleneigene Mischanlage
Alle anderen Materialien	100	Annahme, da keine Daten vorliegen

B/4.2 Emissionsfaktoren – Treibhausgase

Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren werden die Ökobaudat, die Datenbank des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (kurz IBU) und die EPD-Norge-Digi herangezogen. Die Ökobaudat und die IBU-Datenbank sind die primär verwendeten Datenbanken. Die ver-

wendeten Emissionsfaktoren der Lebenszyklusphasen A1 bis A3 sind in **Tabelle B-3** zusammengestellt. Die berücksichtigten Datenbanken beinhalten keinen Eintrag für TOK-Bänder. In der Treibhausgasbilanzierung ist der Emissionsfaktor einer Bitumendickbeschichtung angesetzt. Für den Füllbinder liegen ebenfalls keine Angaben vor. Der Hauptbestandteil des verwendete-

Tabelle B-3 Verwendete Emissionsfaktoren der Module A1–A3 (Herstellung)

Material		Quelle	Emissionsfaktor GWP	Einheit
Beton	C50/60	IBU-Datenbank	275,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C45/55	IBU-Datenbank	273,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C30/37	IBU-Datenbank	196,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
	C12/15	IBU-Datenbank	129,00	kg CO ₂ -Äq./m ³
Zement	CEM III 52,5	Ökobaudat	0,46	kg CO ₂ -Äq./kg
Stahl	Betonstahl	IBU-Datenbank	474,00	kg CO ₂ -Äq./t
	Baustahl	IBU-Datenbank	560,00	kg CO ₂ -Äq./t
	Ankerschiene	IBU-Datenbank	4,46	kg CO ₂ -Äq./m
	Befestigungsmittel Edelstahl	Ökobaudat	4,26	kg CO ₂ -Äq./kg
	Grobbleche (für TBM)	IBU-Datenbank	2.280	kg CO ₂ -Äq./t
Kunststoff	Tübbingdichtung (EPDM Profil)	Ökobaudat	3,97	kg CO ₂ -Äq./kg
	PVC-Rohr	Ökobaudat	1,93	kg CO ₂ -Äq./kg
	PE-Rohr	Ökobaudat	2,04	kg CO ₂ -Äq./kg
	Bitumendickbeschichtung	IBU-Datenbank	1,11	kg CO ₂ -Äq./kg
	Polypropylen-Fasern	IBU-Datenbank	2,57	kg CO ₂ -Äq./kg
	Kunststoffdübel Tübbingschraube	Herstellerangabe	0,20	kg CO ₂ -Äq./Stk
	Verpressstutzen Typ ZU	Herstellerangabe	0,56	kg CO ₂ -Äq./Stk
	Verpressstutzen Typ III	Herstellerangabe	0,71	kg CO ₂ -Äq./Stk
Stabilisator (CBS1)	Fließmittel	IBU-Datenbank	1,53	kg CO ₂ -Äq./kg
Beschleuniger (CBS2)	Erhärtungsbeschleuniger	IBU-Datenbank	1,79	kg CO ₂ -Äq./kg
Füllbinder	Zement CEM I	Ökobaudat	665,00	kg CO ₂ -Äq./t
Kalk	Kalk für Konditionierung Erdbrei	Ökobaudat	1,46	kg CO ₂ -Äq./kg
Bentonit	Bentonit für Ringspaltmörtel	Informationsblatt CO ₂ -Faktoren	50,00	kg CO ₂ -Äq./t
Holz	Holzfaserverplatte	IBU-Datenbank	-198,40	kg CO ₂ -Äq./m ³
Sonstiges	Öl, Fette, Schmierstoffe	siehe Diesel		
Diesel/Strom	Diesel-Herstellung	Sphera Datenbank	0,41	kg CO ₂ -Äq./l
	Strom	Ökobaudat (Strommix 2021)	0,40	kg CO ₂ -Äq./kWh

ten Füllbinder ist Portlandzementklinker, daher ist der Emissionsfaktor von Portlandzement CEM I für Füllbinder angesetzt. Für den Stabilisator liegen in den Datenbanken keine Angaben vor. Es ist der Emissionswert für Fließmittel angesetzt. Für Bentonit ist in den Datenbanken ebenfalls kein GWP-Wert zu finden, es ist der Wert aus dem Informationsblatt CO₂-Faktoren des Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle angesetzt.

Die Treibhausgasemissionen des Transports (Modul A4) sind mit Erfahrungswerten für Treibstoffverbräuche von realen Projekten berücksichtigt. Die angesetzten Treibstoffverbräuche und die zugehörigen Emissionswerte sind in **Tabelle B-4** zusammengestellt.

In Modul A5 sind die Treibhausgasemissionen abgebildet, die bei der Verbrennung von Diesel im Be-

trieb der Baumaschinen/Baugeräte entstehen. Der verwendete Emissionsfaktor ist in **Tabelle B-5** angegeben.

B/4.3 Ergebnisse der Sachbilanz

Die Informationen der Sachbilanz bilden die Basis für die Wirkungsabschätzung. Um die Materialmengen aus **Tabelle B-1** mit den Emissionswerten aus **Tabelle B-3** verknüpfen zu können müssen die Einheiten kompatibel sein. Dazu bedarf es teilweise Umrechnungen der Materialmengen. Nachfolgenden sind in **Tabelle B-6** die Annahmen für die Treibhausgasbilanzierung der Materialien zusammengefasst.

Tabelle B-4 Angesetzte Treibstoffverbräuche und zugehörige Emissionswerte (Modul A4 – Transport)

Fahrzeug	Treibstoffverbrauch [l/100 km]		Emissionen [kg CO ₂ Äq./km]	
	nicht beladen	voll beladen	nicht beladen	voll beladen
4-Achser 30 t (Ladefähigkeit 5 m ³ , 30 t)	22,7	37,1	0,73	1,19
Betonmischer (Ladefähigkeit 8 m ³)	22,7	37,1	0,73	1,19

Tabelle B-5 Verwendete Emissionsfaktoren des Moduls A5 (Errichtung – Einbauprozess)

Prozess	Quelle	Emissionsfaktor	Einheit
Verbrennung Diesel durch den Betrieb von Baumaschinen/Geräten	Sphera Datenbank	3,35	kg CO ₂ -Äq./l

Tabelle B-6 Wichtige Annahmen für die Treibhausgasbilanzierung der Materialien

Baugruppe	Materialbezeichnung	Annahme für Treibhausgasbilanzierung
Ausbruch	Rollmeißel	34,80 kg/Stück
	Schälmesser	21,60 kg/Stück
	Räumer	53,40 kg/Stück
Dauerhafter Ausbau	Tübbingdichtung	EPDM, Dichte 1,4 g/cm ³ , Profilfläche 540,5 mm ²
	TOK-Band	Bitumendeckbeschichtung, Dichte 1.200 kg/m ³ , Breite 20 mm, Dicke 9 mm
	Injektionsschlauch	PVC-Schlauch, Dichte 1,38 g/cm ³ , Durchmesser innen 10 mm, Durchmesser außen 16 mm
	Edelstahlschraube, Länge 0,55 m	Dichte Edelstahl 7,9 g/cm ³ , Durchmesser 25 mm
	Edelstahlschraube, Länge 0,75 m	Dichte Edelstahl 7,9 g/cm ³ , Durchmesser 25 mm
	Schwarzschraube, Länge 0,55 m Schwarzschraube, Länge 0,75 m	Dichte Stahl 7,85 g/cm ³ , Durchmesser 25 mm
Innenausbau	Teilsickerrohr	DN 200 PE80 SDR26, Dichte 950 kg/m ³

B/5 Wirkungsabschätzung

B/5.1 Baugruppe „Ausbruch“

In **Abbildung B-10** sind die THG-Emissionen der Baugruppe „Ausbruch“ für die verschiedene Bauteile abgebildet. In dieser Baugruppe ist der Abtransport des Ausbruchmaterials von der Baustelle mit 81,8 % der maßgebende Treiber. Gut 13 % der Treibhaus-

gasemissionen der Baugruppe „Ausbruch“ entstehen durch den Stromverbrauch. Die Herstellung und der Transport der berücksichtigten Maschinen- und Werkzeugteile der TBM haben einen Anteil von 4,9 % an den Treibhausgasemissionen dieser Baugruppe.

B/5.2 Baugruppe „Sicherung“

In **Abbildung B-11** sind die THG-Emissionen der Baugruppe „Sicherung“ abgebildet. In der Treibhausgas-

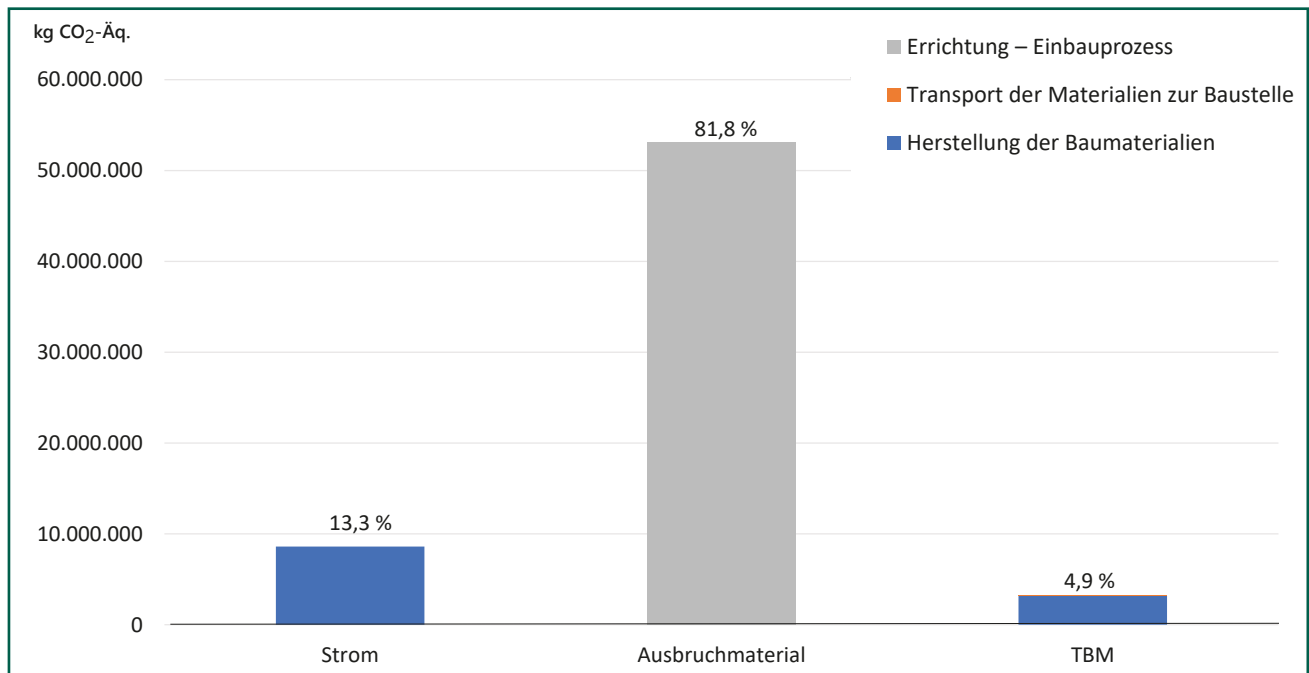


Abbildung B-10 THG-Emissionen der Baugruppe „Ausbruch“

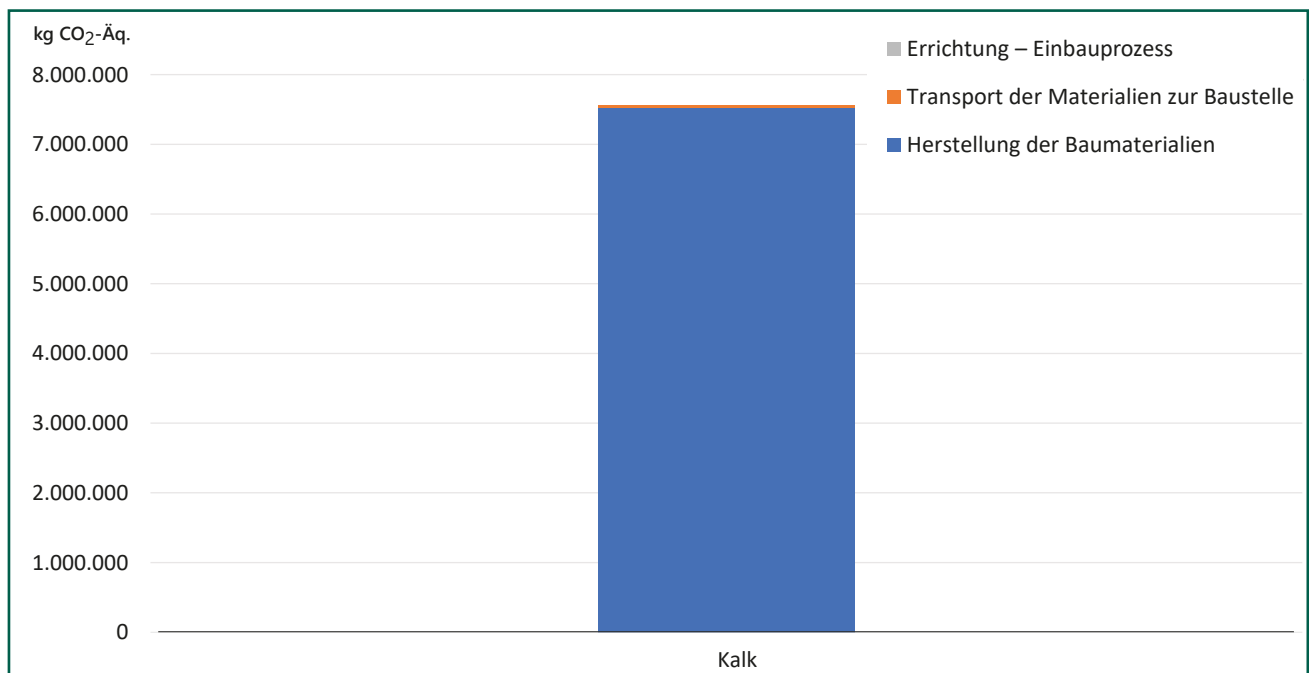


Abbildung B-11 THG-Emissionen der Baugruppe „Sicherung“

bilanzierung ist nur der Kalk berücksichtigt, Tenside und Wasser sind nicht berücksichtigt. Durch den Abbau und die Aufbereitung des Kalks (Module A1–A3) entstehen 99,6 % der Treibhausgasemissionen. Durch den Transport des Kalks auf die Baustelle entstehen 0,4 % der Treibhausgasemissionen.

verschiedene Bauteile abgebildet. In dieser Baugruppe sind die Tübbinge mit 66,4 % der maßgebende Treiber. Durch die Herstellung und den Transport des Ringspaltmörtels entstehen 29 % der Treibhausgasemissionen. Die Herstellung und der Transport der Materialien der Nachinjektion, des Stroms sowie die Herstellung, Transport und Verbrennung des Diesels haben einen Anteil von 4,6 % an den Treibhausgasemissionen dieser Baugruppe (1,9 % Nachinjektion, 1,5 % Strom, 1,2 % Diesel).

B/5.3 Baugruppe „dauerhafter Ausbau“

In den **Abbildungen B-12a/b** sind die THG-Emissionen der Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ für die

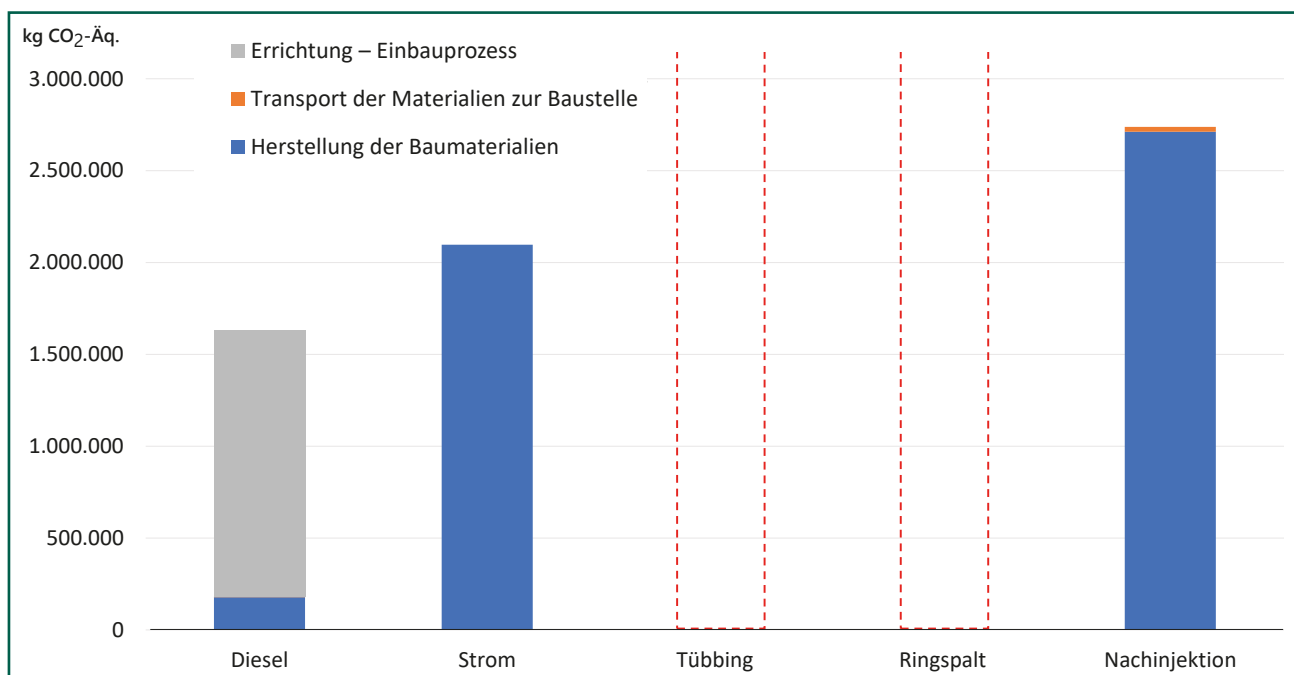
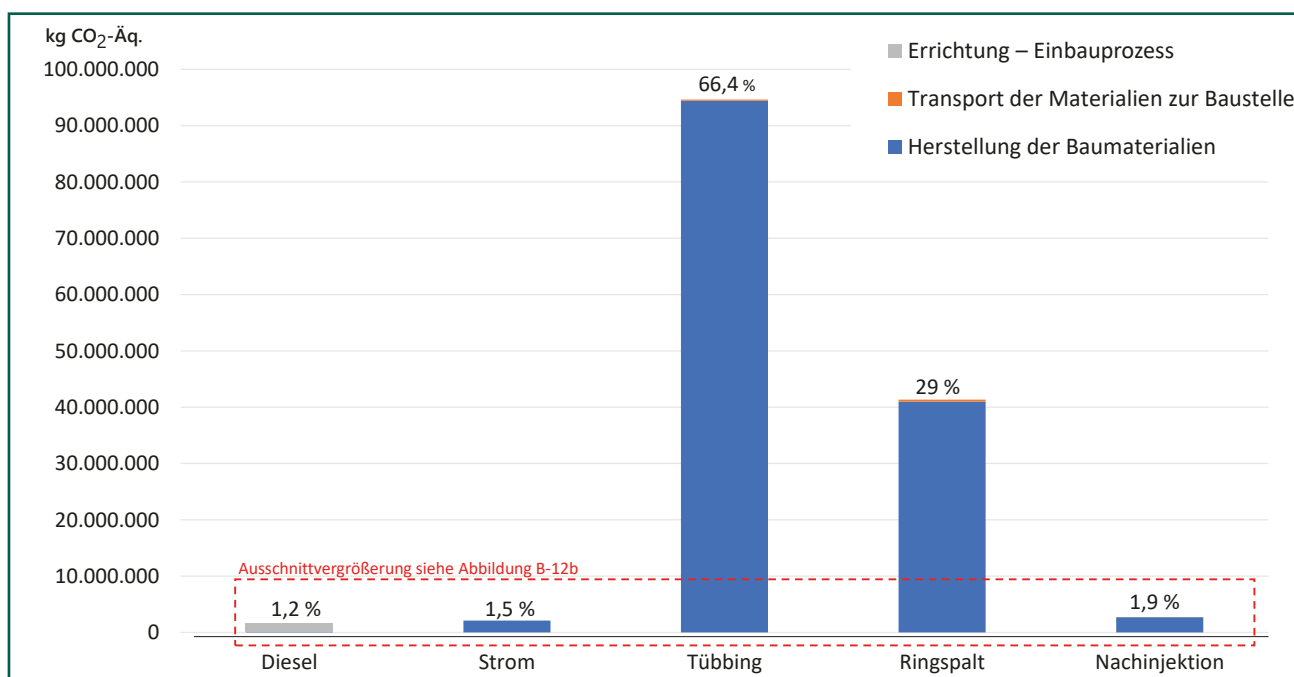


Abbildung B-12a/b THG-Emissionen Baugruppe „dauerhafter Ausbau“

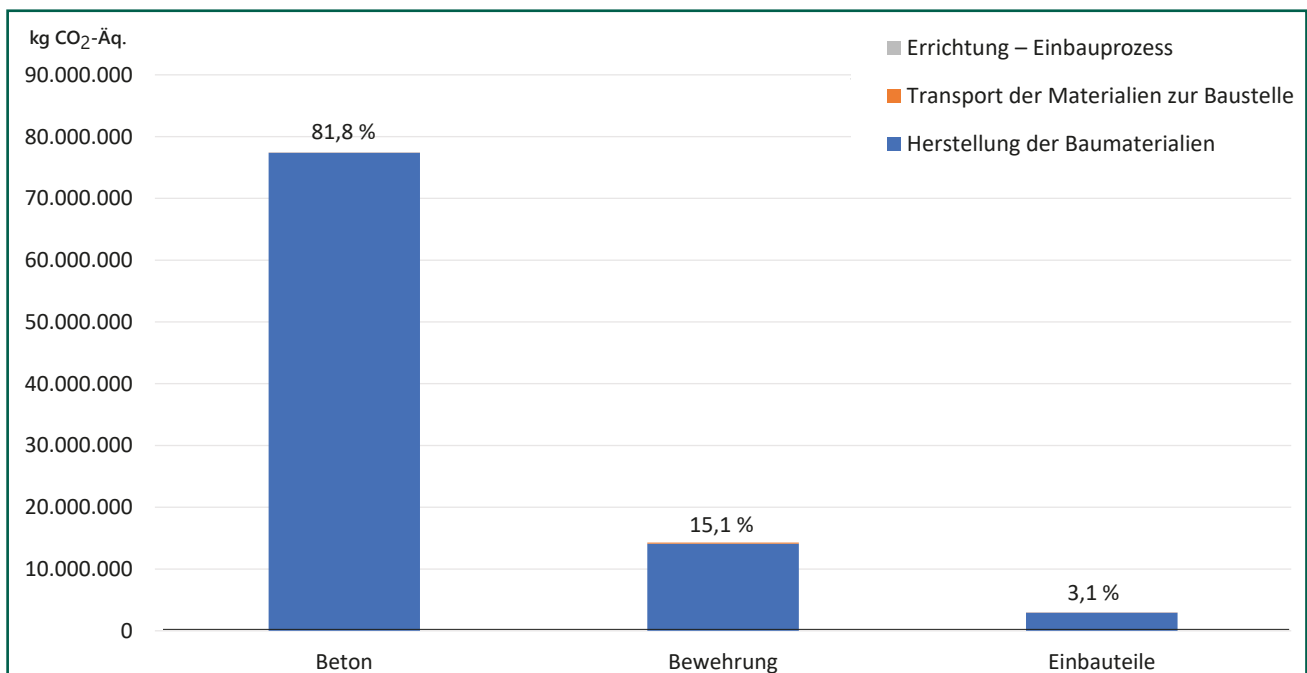


Abbildung B-13 THG-Emissionen Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ – Bauteil „Tübbing“

In **Abbildung B-13** sind die Treibhausgasemissionen für den Beton, die Bewehrung und die Einbauteile der Tübbinge dargestellt. Auf die Herstellung und den Transport des Betons entfallen 81,8 % der Treibhausgasemissionen des Bauteils „Tübbing“. Aus der Herstellung und dem Transport der Bewehrung kommen 15,1 % der Treibhausgasemissionen. Aus der Herstellung und dem Transport der Einbauteile kommen 3,1 % der Treibhausgasemissionen.

B/5.4 Baugruppe „Innenausbau“

In **Abbildung B-14** sind die GWP-Anteile der Baugruppe „Innenausbau“ für die verschiedene Bauteile abgebildet. In dieser Baugruppe ist die Sohlauffüllung mit 97,4 % der maßgebende Treiber. Herstellung, Transport und Verbrennung des Diesels zur Herstellung der Sohlauffüllung haben einen Anteil von 2,6 % an den Treibhausgasemissionen dieser Baugruppe.

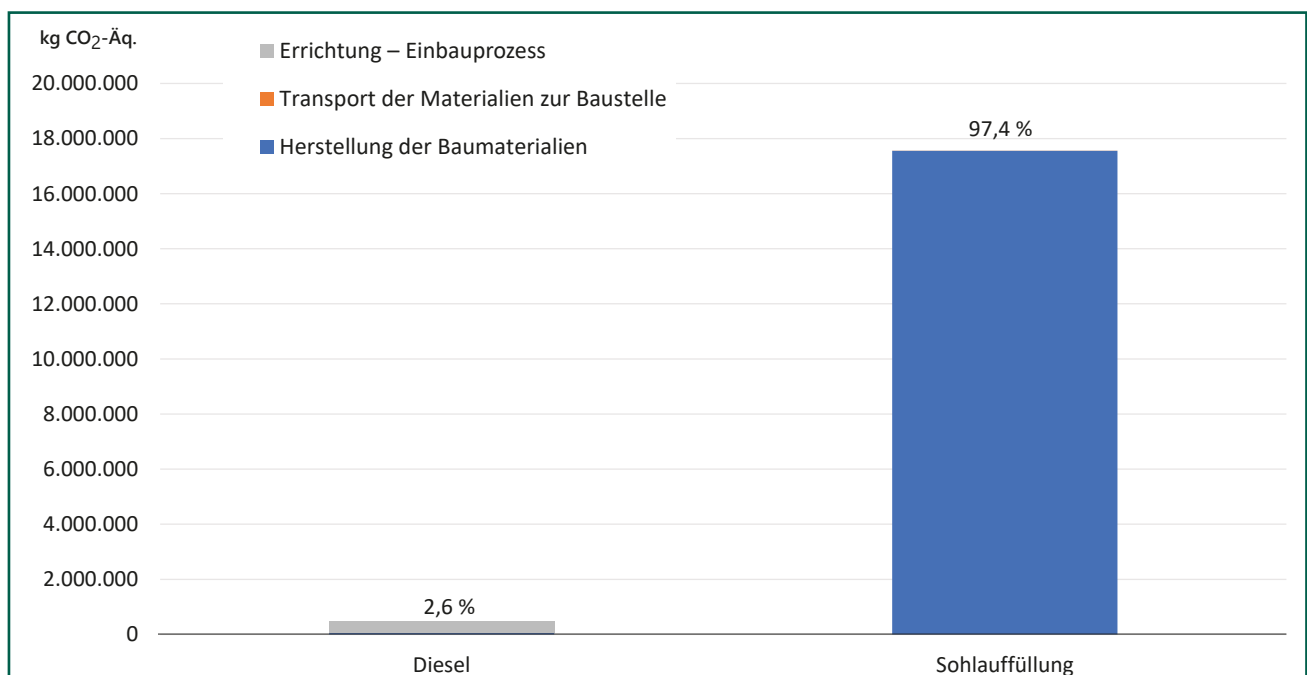


Abbildung B-14 THG-Emissionen Baugruppe „Innenausbau“

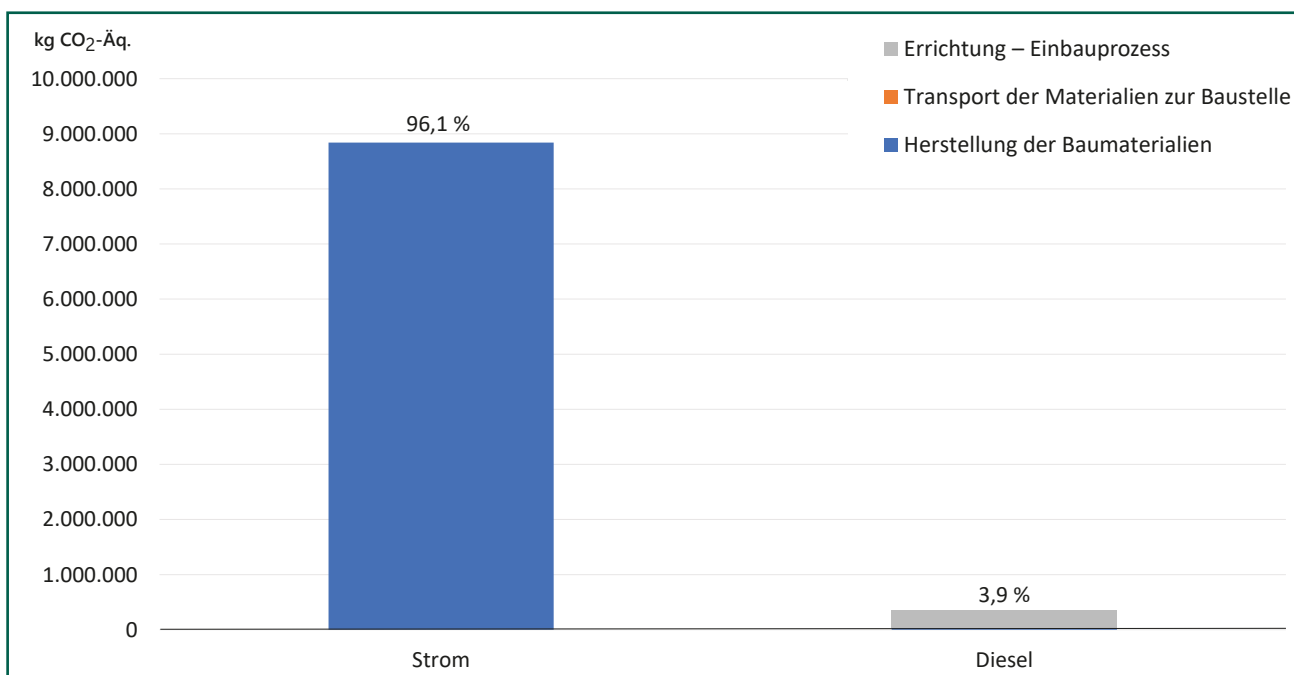


Abbildung B-15 THG-Emissionen Baugruppe „Baustelleneinrichtung“

B/5.5 Baugruppe „Baustelleneinrichtung“

In **Abbildung B-15** sind die THG-Emissionen der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“ abgebildet. In dieser Baugruppe hat der Strom einen Anteil von 96 % an den Treibhausgasemissionen. Durch die Herstellung und Verbrennung des Diesels entstehen ca. 4 % der Treibhausgasemissionen.

B/5.6 Baugruppe „Dauerhafter Ausbau“

Die Gesamtemissionen des Tunnelrohbaus für das Beispielprojekt betragen für die Module A1 bis A5 ca. **242.117.657 kg CO₂-Äq.**

In **Abbildung B-16** sind die Gesamtemissionen aufgeteilt nach den Baugruppen dargestellt. Die Baugruppe „dauerhafter Ausbau“ ist der maßgebliche Treiber mit 59 % der Gesamtemissionen. Hier ist der Strom zur Tübbingproduktion und der Diesel für die Versorgungszüge berücksichtigt. Der Anteil der Baugruppe „Ausbruch“ an den Gesamtemissionen beträgt 27 %. Hier ist der Strom für den Betrieb des Förderbands und der TBM berücksichtigt, sowie die Stahlbauteile der TBM. Der Baugruppe „Innenausbau“ werden 7 % der Gesamtemissionen zugeordnet. Der Anteil der Baugruppe „Baustelleneinrichtung“ an den Gesamtemissionen beträgt 4 %. Den geringsten Anteil an den Gesamtemissionen hat die Baugruppe „Sicherung“ mit 3 %.

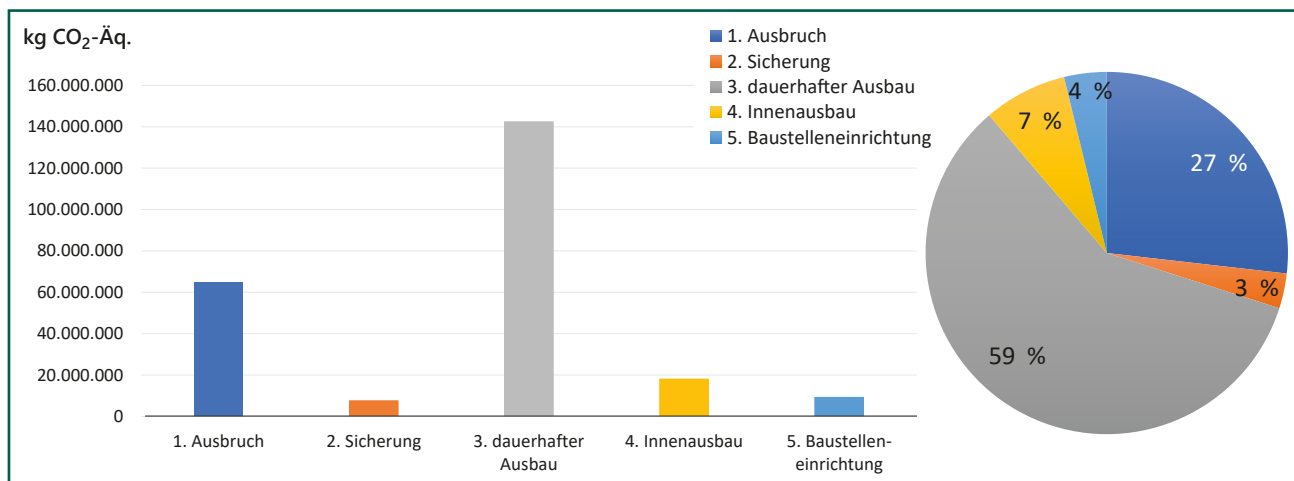


Abbildung B-16 THG-Emissionen der Baugruppen (in Baugruppe 2 kein Diesel und Strom enthalten)

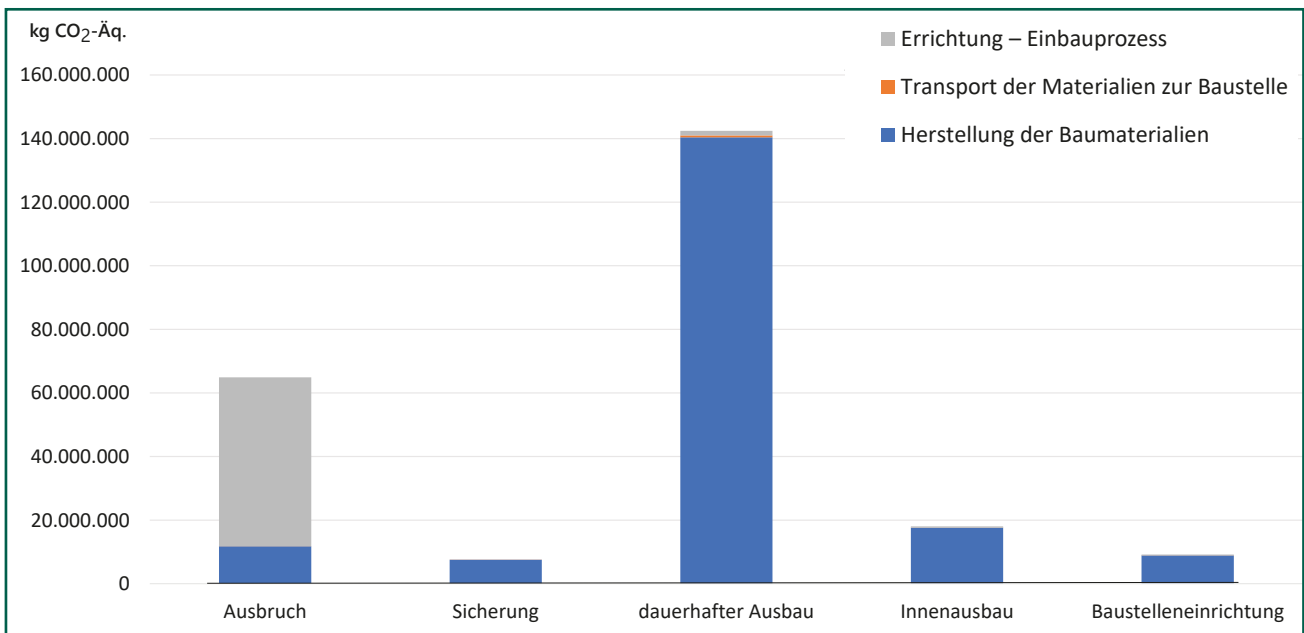


Abbildung B-17 THG-Emissionen der Baugruppen und Lebenszyklusphasen

In **Abbildung B-17** sind die GWP-Anteile der Baugruppen aufgeteilt nach den Lebenszyklusmodulen dargestellt. In allen Baugruppen, außer in der Baugruppe „Ausbruch“, sind die Module A1–A3 die dominierenden Module. In diesen 4 Baugruppen entfallen jeweils über 95 % der Gesamtemissionen auf die Module A1–A3. In der Baugruppe „Sicherung“ ist in der Treibhausgasbilanzierung das Modul A5 aufgrund mangelnder Daten nicht berücksichtigt. In der Baugruppe „Ausbruch“ dominiert das Modul A5 mit 82 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Transport des Ausbruchmaterials und die Dieselverbrennung dieser Lebenszyklusphase zugeordnet sind.

Durch die Produktion des Ringspaltmörtels entstehen 22 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 17 % der Gesamtemissionen.

Durch die Strom- und Dieselherstellung entstehen 11 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 8 % der Gesamtemissionen.

Durch die Herstellung des Konstruktionsbetons entstehen 9 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 7 % der Gesamtemissionen. Knapp 38,6 % der Gesamtemissionen entstehen durch die Herstellung des Tübbing- und Konstruktionsbetons.

B/5.7 Analyse der Lebenszyklusphasen

In **Abbildung B-18** sind die Gesamttreibhausgasemissionen zur Herstellung des Tunnelrohbaus aufgeteilt nach den Lebenszyklusmodulen dargestellt. Während der Herstellung der Materialien entstehen 77 % und durch die Herstellprozesse 23 % der Gesamtemissionen. Hierbei muss allerdings beachtet werden, dass der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials in dieser Lebenszyklusphase bilanziert ist. Auf den Transport der Materialien zur Baustelle entfallen 0,26 % der Gesamtemissionen.

In **Abbildung B-19** werden die Treibhausgasemissionen, die durch die Herstellung der Materialien entstehen, genauer betrachtet. Durch die Tübbingbetonproduktion entstehen 41 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 31,6 % der Gesamtemissionen.

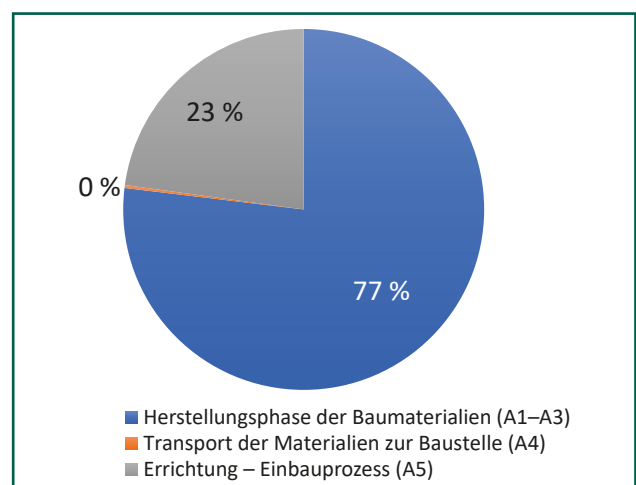


Abbildung B-18 Gesamttreibhausgasemissionen aufgeteilt nach Lebenszyklusphasen

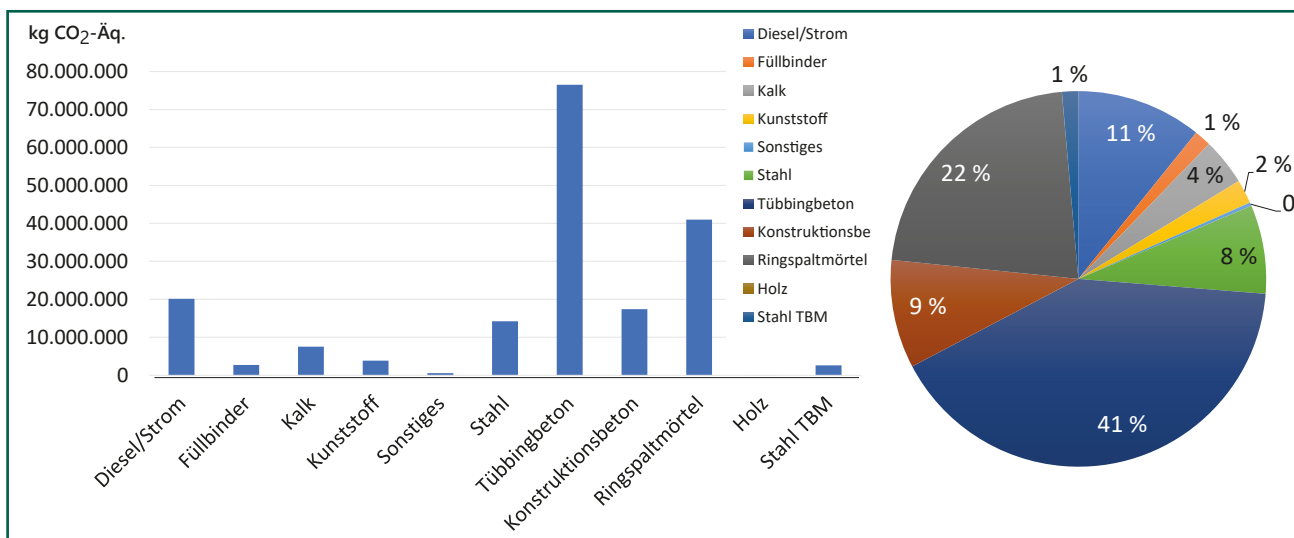


Abbildung B-19 GWP-Anteil Materialien (Lebenszyklusmodule A1-A3)

Durch die Stahlproduktion entstehen 8 % der Treibhausgasemissionen der Module A1–A3. Das sind 5,9 % der Gesamtemissionen.

Durch die Herstellung der TBM entstehen 1,4 % der Treibhausgasmissionen der Module A1–A3. Das sind 1,3 % der Gesamtemissionen. Es sind nur die Maschinenkomponenten berücksichtigt, die keine Gebrauchtkomponenten sind und auch nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden.

In **Abbildung B-20** werden die Emissionen, die in Module A5 entstehen, genauer betrachtet. Durch den Abtransport des Tunnelausbruchmaterials entstehen 96 % der Treibhausgasemissionen des Moduls A5. Das sind 22 % der Gesamtemissionen.

Durch die Verbrennung des Diesels der Versorgungszüge entstehen 3 % der Emissionen des Moduls A5. Das sind 0,6 % der Gesamtemissionen.

B/6 Auswertung

Die letzte Phase "Auswertung" stellt die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengefasst dar. In dieser Phase wird versucht anhand der Ergebnisse Schlussfolgerungen, Erläuterungen oder Empfehlungen abzuleiten.

In **Tabelle B-7** sind die Ergebnisse der Treibhausgasbilanzierung des zweiröhrigen, maschinell vorgefahrenen Bahntunnels zusammengefasst. Es sind die gesamten Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äq., die Treibhausgasemissionen pro Tunnelmeter (2 x 8.800 m) und die Treibhausgasemissionen pro m³ Ausbruch (1.728.649 m³) angegeben.

Maßgebliche Treiber sind die Herstellung der Tübbinge (Material 94.617.786 kg CO₂-Äq. und der Stromverbrauch der Tübbingproduktion 2.096.622 kg CO₂-Äq.) mit 40 % der Gesamtemissionen sowie der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle mit 22 % der Gesamtemissionen (53.104.128 kg CO₂-Äq.). Durch die Herstellung der Materialien des Ringspaltmörtels entstehen 17 % der Gesamtemissionen (41.339.666 kg CO₂-Äq.).

Wie in **Kapitel B/5** dieses Anhangs erläutert, entstehen 77 % der Gesamtemissionen in den Modulen A1–A3, also während der Herstellung der Materialien. Davon entfallen 50 % auf die Herstellung des Tübbing- und Konstruktionsbetons und 22 % auf die Herstellung des Ringspaltmörtels. Der Stahl spielt mit 9 % eine untergeordnete Rolle.

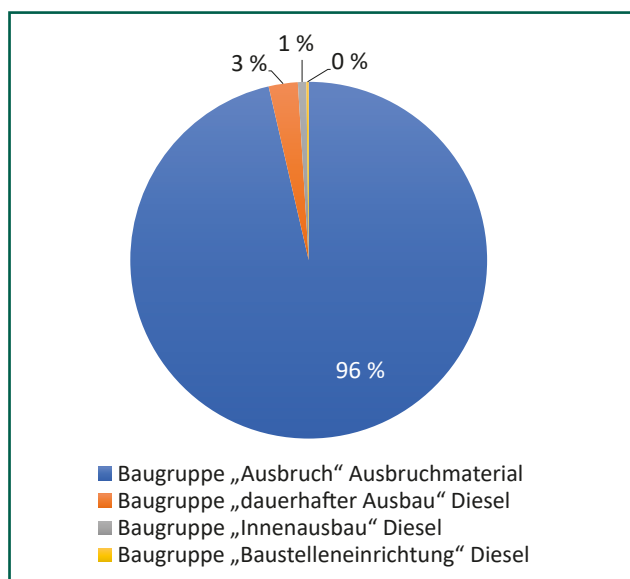


Abbildung B-20 THG-Emissionen Modul A5

Tabelle B-7 Gesamtemissionen

Baugruppe	Bauteil	Treibhausgasemissionen GWP [kg CO ₂ -Äq.]		
		Total	pro Tunnelmeter	pro m ³ Ausbruch
Ausbruch	Strom	8.609.550	489	5
	Ausbruchmaterial	53.104.128	3.017	31
	TBM	3.196.456	181	2
		64.910.134	3.688	38
Sicherung	Ortsbruststützung	7.556.404	429	4
		7.556.404	429	4
Dauerhafter Ausbau	Diesel	1.633.686	93	1
	Strom	2.096.622	119	1
	Tübbing	94.617.786	5.376	55
	Ringspalt	41.339.666	2.349	24
	Nachinjektion	2.737.650	156	2
		142.425.410	8.092	82
Innenausbau	Diesel	472.923	27	0
	Sohlauffüllung	17.558.496	998	10
		18.031.419	1.025	10
Baustellen-einrichtung	Strom	8.839.582	502	5
	Diesel	354.708	20	0
		9.194.290	522	5
SUMME		242.117.657	13.757	140

Die Transporte der Materialien auf die Baustelle haben im Beispielprojekt mit 0,26 % der gesamten Treibhausgasemissionen einen geringen Einfluss.

Auf die Herstellprozesse entfallen 23 % der Gesamtemissionen. Maßgeblich hierfür ist der Abtransport des Tunnelausbruchmaterials von der Baustelle mit einer Transportstrecke von 80 km (96 %). Je länger die Transportstrecke, desto größer wird auch der Anteil an den Gesamtemissionen. Die Vermeidung von Treibhausgasemissionen durch eine Wiederverwendung des Ausbruchmaterials ist in diesem Beispiel nicht enthalten. Die Verbrennung des Diesels durch die Nutzung von Versorgungszügen und Baumaschi-

nen/Baugeräten hat mit 4 % Treibhausgasemissionen eine untergeordnete Rolle.

Der Anteil der Herstellung der TBM an den Gesamtemissionen beträgt 1,3 %. Hier gilt es zu berücksichtigen, dass nur die Maschinenkomponenten berücksichtigt sind, die keine Gebrauchtkomponenten sind und auch nicht nach Projektabschluss wiederverwendet werden. Die Herstellung und die Verwendung der restlichen Baumaschinen und Geräte sowie der Transport zur und von der Baustelle sind nicht bilanziert. Daher kann auch keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich dies auf die Treibhausgasbilanzierung auswirkt.

