

Fragestellungen der Felsmechanik und des Tunnelbaus

**Vorträge anlässlich des
8. Felsmechanik- und
Tunnelbautages 2023
im WBI-Center**

22.06.2023

Weinheim

WBI

Herausgeber:
WBI PROFESSOR DR.-ING. W. WITTKÉ
Beratende Ingenieure für GRUNDBAU UND
FELSBAU GmbH, Weinheim

© WBI GmbH. This publication is protected by copyright. The corresponding rights, especially that of printing, translation, presentation and publication, the use of figures, tables, pictures and drawings or duplicating by other means as well as saving the documents in electronic format are reserved, even in part, partially. Any use must be agreed upon with WBI GmbH.

Ökobilanzierung für Verkehrsinfrastrukturprojekte - Grundsätze, Vorgehen, Beispiele, Ansätze für die Minimierung

Dr.-Ing. Bettina Wittke-Schmitt

Zusammenfassung

Die Themen Nachhaltigkeit, Klima, CO₂ beherrschen die gesellschaftliche Diskussion und machen auch vor Verkehrsinfrastrukturprojekten nicht Halt.

Im vorliegenden Beitrag werden die Grundzüge der Nachhaltigkeitsbewertung sowie der Ökobilanz erläutert. Ebenso werden Schwierigkeiten, wie z. B. fehlende oder inkonsistente Daten, aufgezeigt. Anhand ausgewählter grundsätzlicher Betrachtungen mit Fokus auf den Tunnelbau wird beispielhaft gezeigt, welches die maßgeblichen Stellschrauben zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sind und wie eine gute und innovative Tunnelplanung maßgeblich zu dieser Reduzierung beitragen kann. Darüber hinaus wird aufgezeigt, wie die Ökobilanz in eine BIM-basierte Planung integriert werden kann und warum eine Berücksichtigung der Aspekte der Nachhaltigkeit in den frühen Planungsphasen sowie auch in der Ausschreibung für die Bauausführung sinnvoll ist. Eine BIM-basierte Ökobilanz als Teil der Nachhaltigkeitsbewertung kann bei der Variantenbetrachtung und auch bei der politischen und gesellschaftlichen Diskussion helfen. Sie kann im Zuge der Planung fortgeschrieben und detailliert werden. Und sie zeigt die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Umwelteinwirkungen auf.

Die Autorin appelliert an die Beteiligten aus Bauherrschaft, Planung, Bauindustrie und Forschung: wir müssen uns mit diesem Thema sachlich auseinandersetzen und dürfen uns die Zügel nicht aus der Hand nehmen lassen. Wir müssen gemeinsam die noch fehlende Datengrundlage schaffen bzw. ergänzen. Wir müssen dafür sorgen, dass das Thema faktenbasiert, sachlich und pragmatisch behandelt wird und nicht dogmatisch. Wir sollten darauf hinwirken, dass Innovationen und Änderungen der Vorschriftenlage möglich sind.

1. Einleitung

Die Themen "Nachhaltigkeit", "Klima", "Ökobilanz", "CO₂" sind in aller Munde, wobei nicht jeder das Gleiche darunter versteht. Auch in Projekten der Verkehrsinfrastruktur sind wir verstärkt mit diesen Themen konfrontiert - nicht immer im positiven Sinne für das Projekt. Wir müssen uns deshalb mit dem Themenkomplex auseinandersetzen und uns selber der Sache annehmen. Der vorliegende Artikel soll hierzu einen Beitrag leisten.

2. Nachhaltigkeitsbewertung

Seit der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung, die 1992 in Rio de Janeiro stattfand, ist eine nachhaltige Entwicklung als globales Leitprinzip international akzeptiert. Der im Juli 1998 präsentierte Abschlussbericht "Konzept Nachhaltigkeit - Vom Leitbild zur Umsetzung"

der Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages "Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung" (Deutscher Bundestag 1998) bildet die Basis für die Nachhaltigkeitsstrategie für Deutschland. Demnach umfasst die Bewertung der Nachhaltigkeit entgegen landläufiger bzw. veröffentlichter Meinung nicht nur Umwelt und CO₂; vielmehr sollen gleichwertig und integrativ drei Säulen betrachtet werden, die ökologische Qualität, die ökonomische Qualität und die soziale Qualität (Bild 1). In Kurzform geht es darum, dass wir in allen diesen Bereichen nicht über unsere Verhältnisse leben.

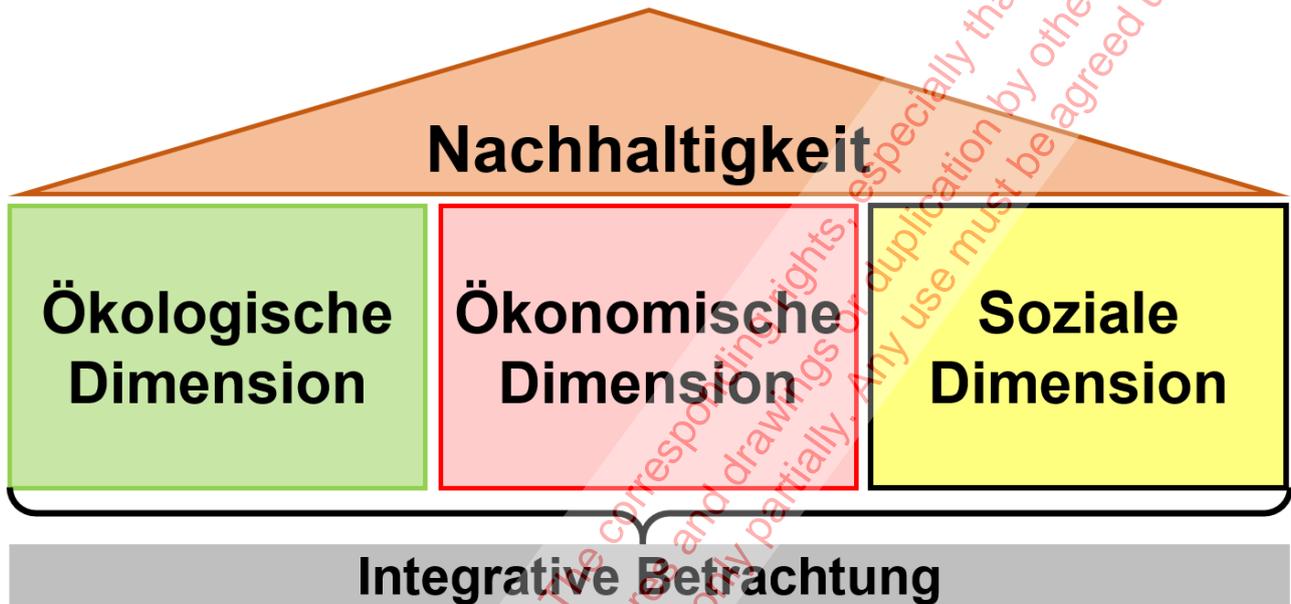


Bild 1: Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit nach Deutscher Bundestag 1998

Es gibt in Deutschland bereits ein ausgereiftes und in Anwendung befindliches Bewertungssystem für die Nachhaltigkeit, das von der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) betrieben wird (Bild 2). In diesem System werden die drei eben erwähnten Grundsäulen Ökologie, Ökonomie und Soziales gleichwertig mit 25 % bewertet. Darüber hinaus wurden die Bereiche Technische Qualität, Prozessqualität sowie Standortqualität eingeführt, die mit jeweils 10 bzw. 5 % gewichtet werden. Betrachtet wird der gesamte Lebenszyklus eines Bauwerks (vgl. Kap. 3, Bild 7). Je nach Ergebnis kann man ein Zertifikat erhalten. Das System ist im Hochbau bereits eingeführt und wird gelebt. In 2023 wurden auch die ersten Spezialtiefbau-Baustellen von der DGNB zertifiziert.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat in einer Serie von Forschungsprojekten gemeinsam mit verschiedenen anderen Forschungseinrichtungen ein Bewertungssystem für die Straßenverkehrsinfrastruktur erarbeitet (BASt 2022). Um in Deutschland ein einheitliches Bewertungssystem zu verwenden - was sicher sehr sinnvoll ist - wurde das Bewertungssystem der DGNB zur Grundlage genommen und auf die Straßeninfrastruktur angepasst. Das System umfasst die gleichen Wertungskategorien wie das System der DGNB (Bild 3). Da es insbesondere auch für die frühen Planungsphasen gedacht ist, in denen Planungs- und Bauprozesse noch nicht bewertet werden können, wird hier der Bereich Prozessqualität mit 0 bewertet. Alle anderen Bereiche gleichwertig mit 20 %. Auch hier ist es

das Ziel, den gesamten Lebenszyklus zu betrachten. Eine Zertifizierung für Verkehrsinfrastrukturprojekte gibt es nicht.

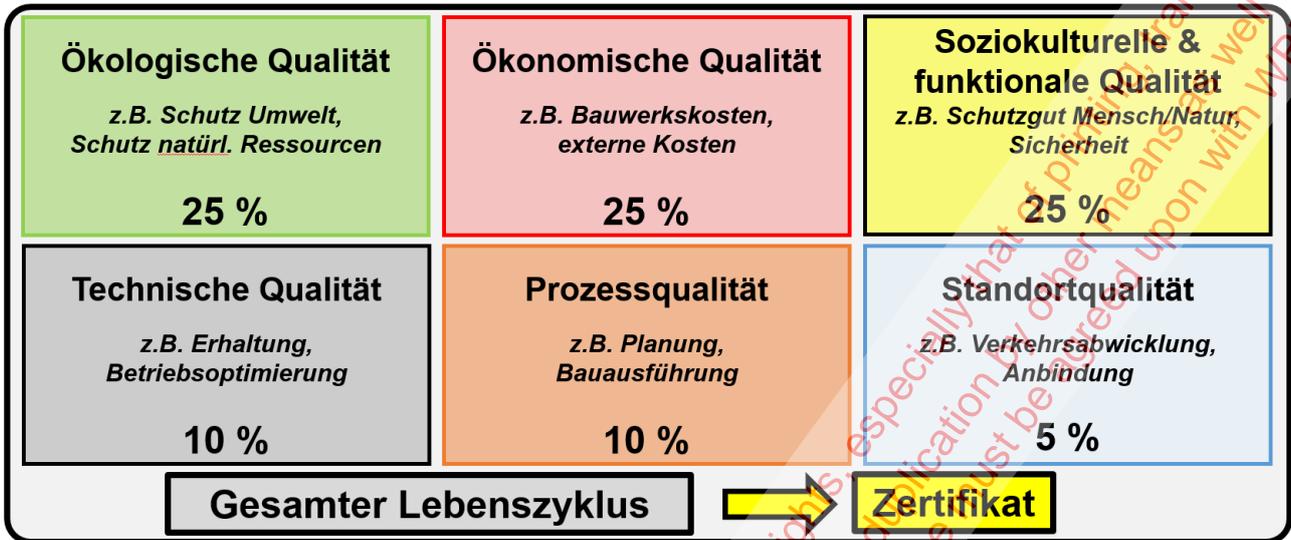


Bild 2: Bewertungssystem Nachhaltigkeit - DGNB-System (Hochbau) nach Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen 2023 und Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB) 2023

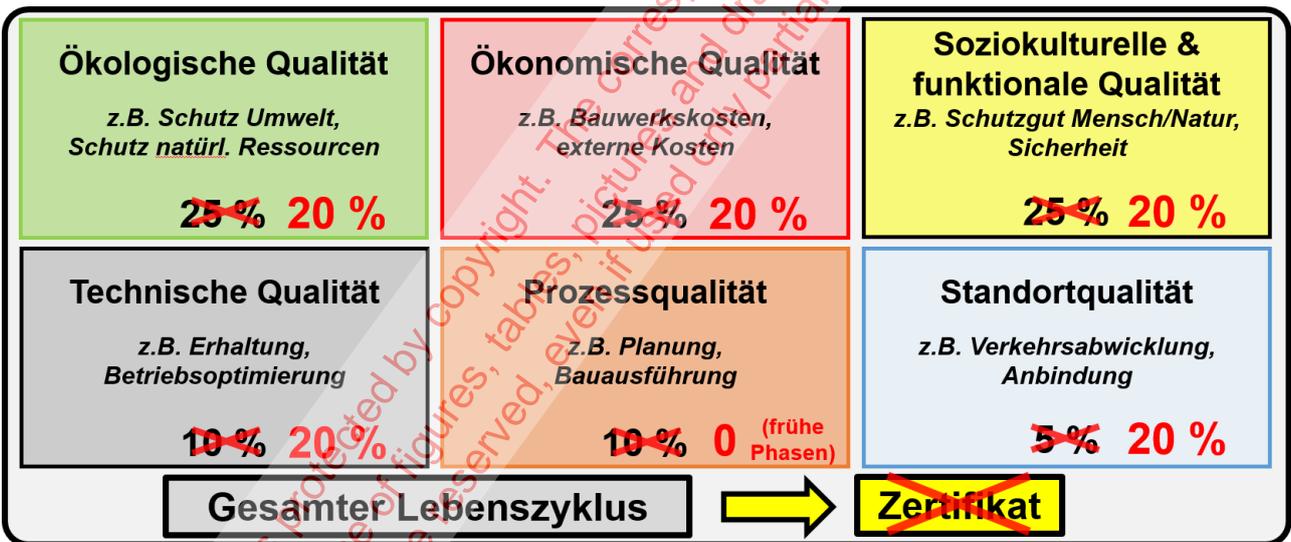


Bild 3: Bewertungssystem Nachhaltigkeit - BASt nach BASt 2022

Das in BASt 2022 vorgeschlagene Wertungskonzept ist in Bild 4 dargestellt. Für alle 6 Bereiche wurden festgelegte Kriterien eingeführt; beispielsweise für den Bereich der Ökologischen Qualität 14 Kriterien, auf die im weiteren Verlauf des Artikels noch eingegangen wird. Jedes Kriterium wird einzeln bewertet - je nach Art des Kriteriums entweder quantitativ oder qualitativ. Durch den Vergleich mit vorher festgelegten Grenz- oder Zielwerten erhält man eine Punktzahl zwischen 0 und 10. Für jedes einzelne Kriterium gibt es darüber hinaus einen Bedeutungsfaktor, der im Vorhinein festgelegt werden muss. Durch Multiplikation der Punktzahl mit dem Bedeutungsfaktor und der bereits erwähnten Gewichtung für jedes einzelne Kriterium und anschließende Summation ergibt sich eine Gesamtpunktzahl. Diese ist dann

Grundlage z. B. für eine Variantenauswahl oder Optimierung der Planung in der Verkehrsinfrastruktur. Für die Festlegung von Grenz- und Zielwerten sowie Bedeutungsfaktoren und die Bewertung selber, gibt es erste Vorschläge seitens der BAST, aber auch noch "viel zu tun".

Qualität	Anzahl Kriterien	Punkte (p)	Bedeutungsfaktor (Bf)	Gewichtung (G) (BAST)
Ökologisch	14	0 ... 10	1 ... 8	20 %
Ökonomisch	3	0 ... 10	2 ... 4	20 %
Soziokulturell & Funktional	7	0 ... 10	1 ... 5	20 %
Technisch	6	0 ... 10	1 ... 4	20 %
Prozess	5	0 ... 10	1 ... 3	0
Standort	4	0 ... 10	2 ... 3	20 %

- Grenz-/Zielwerte für jedes Kriterium
 - Bewertung quantitativ oder qualitativ
- $$\sum_i p_i \times Bf_i \times G_i$$
- Zertifikat
 - Vergleich Varianten
 - Optimierung

Bild 4: Wertungskonzept nach BAST 2022

Dieses Bewertungssystem folgt dem gleichen Prinzip wie das im Hochbau als Grundlage für die Zertifizierung eingeführte Wertungssystem. Andere Ansätze verfolgen das Ziel einer monetären Bewertung der verschiedenen Aspekte, so dass am Ende ein Kostenwert ermittelt wird. Dies ist aber auch nicht einfach.

3. Ökobilanz

Die sogenannte Ökobilanz (englisch Life Cycle Analysis, LCA) ist ein Teilelement der ganzheitlichen Bilanzierung. Sie gehört zu dem Bereich der Bewertung der ökologischen Qualität (Bilder 1, 3). Die Ökobilanz ist eine anerkannte Methode zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen, und sie kann auch auf Bauprojekte angewendet werden. Das Vorgehen ist in den Normen DIN EN ISO 14040:2021 und 14044:2021 geregelt. Gemäß DIN EN ISO 14040:2021 umfasst eine Ökobilanz vier Phasen (Bild 5):

Phase 1 Festlegung Ziel und Untersuchungsrahmen

Diesem Schritt kommt eine große Bedeutung zu, und er hat wesentlichen Einfluss auf alle weiteren Schritte. Dies sei anhand zweier Beispiele verdeutlicht: Wenn beispielsweise eine gesellschaftspolitische Gesamtbetrachtung der verschiedenen Verkehrsträger erarbeitet werden soll, dann muss eine gesamthafte Betrachtung durchgeführt werden, die das Verkehrsmittel selber und auch die Infrastruktur berücksichtigt und deren Herstellung, Nutzung, Betrieb, die Wartung, Rückbau und Recycling betrachtet. Eine nur teilweise Betrachtung würde zu fehlerhaften Ergebnissen und Entscheidungen führen.

Wenn man hingegen nur zwei Bauweisen miteinander vergleichen will, reicht es, die wesentlichen Faktoren zu berücksichtigen.

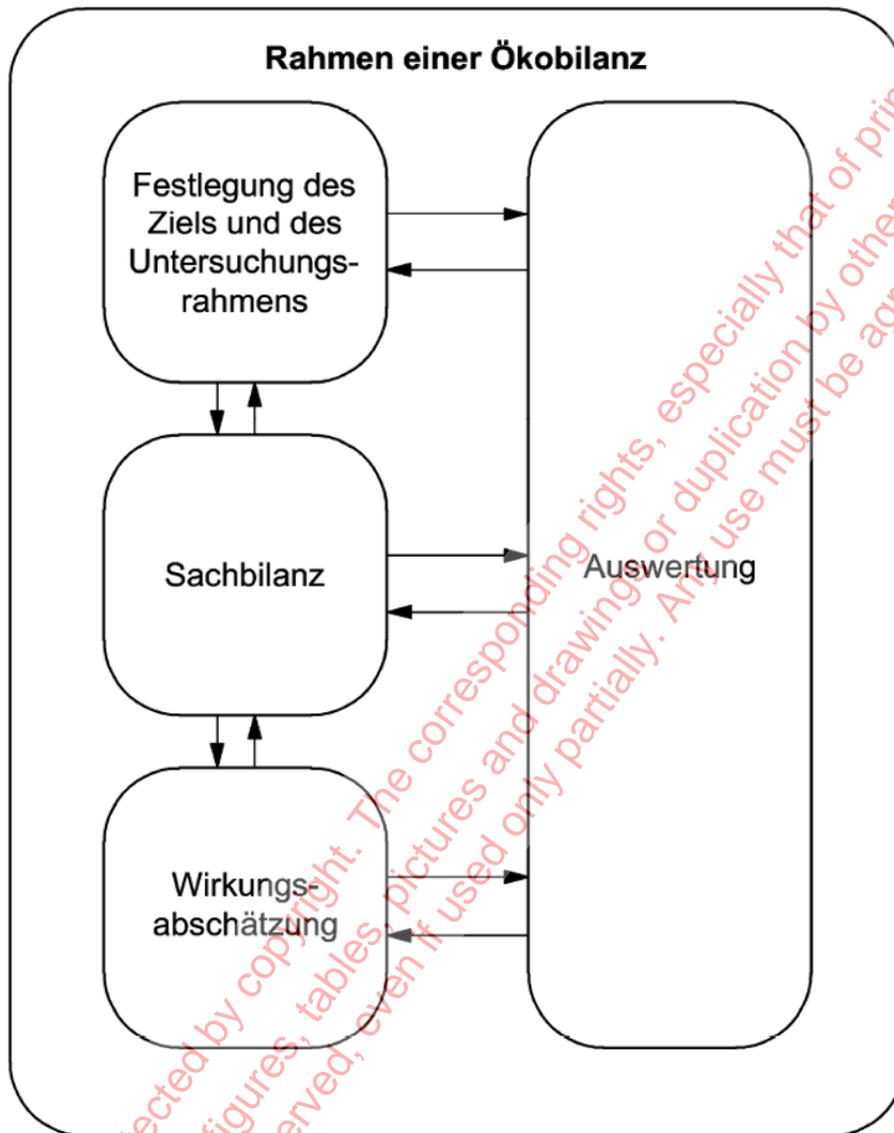


Bild 5: Phasen einer Ökobilanz gemäß DIN EN ISO 14040:2021

Phase 2 Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory, LCI)

Die Sachbilanz beinhaltet die Sammlung aller Daten, die für eine Bilanzierung benötigt werden. Hierzu gehören alle für die jeweilige Bilanzierung benötigten, eingehenden und ausgehenden Stoff- und Energieströme (Input: Energie, Rohstoffe, Flächen, Wasser / Output: Emissionen, Abfälle, Abwässer), wie beispielhaft in Bild 6 für eine Baustelle im Prinzip dargestellt. Die Art und Anzahl der Daten hängt dabei wesentlich von den in Phase 1 getroffenen Festlegungen ab.

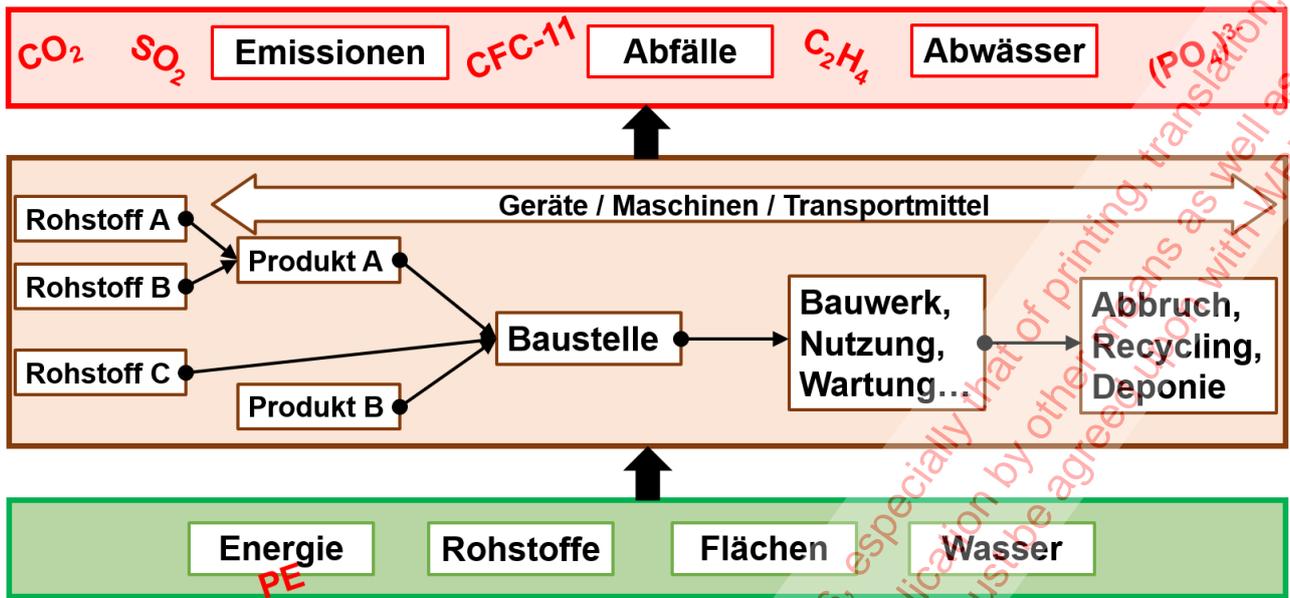


Bild 6: Sachbilanz Baumaßnahme, Prinzipbild eingehende und ausgehende Stoff- und Energieströme

Wir bereits erwähnt, ist es das Ziel, den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks zu betrachten. Nach DIN EN ISO 15804:2022 unterscheidet man verschiedene Phasen und Unterphasen (vgl. Bild 7). Zunächst die Herstellungsphase auf Produktebene. Sie umfasst die Rohstoffbereitstellung, den Transport zum Werk und die Herstellung des Produkts (A1 bis A3). Dieser Abschnitt wird auch als "cradle to gate" bezeichnet. Hierfür werden von Produktherstellern sogenannte Environmental Product Declarations (EPD) erstellt.

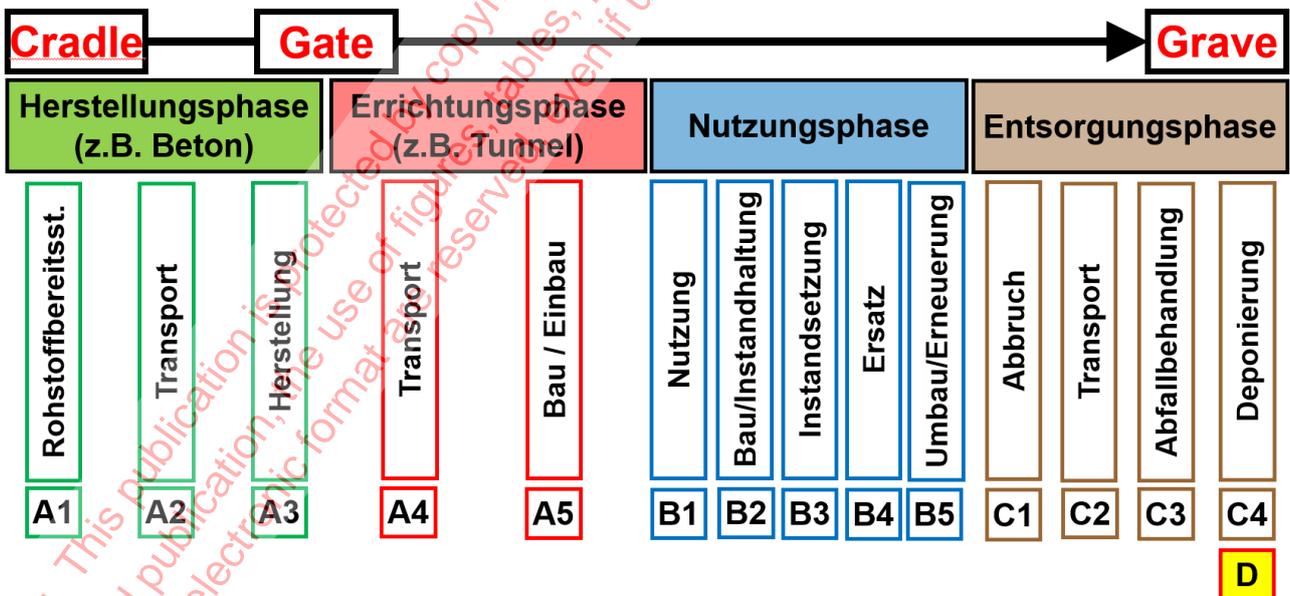


Bild 7: Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN ISO 15804:2022

Die Errichtungsphase, auf Bauwerksebene, umfasst die Transporte von und zu der Baustelle (A4) sowie den Bau selber (A5). Anschließend kommt die Nutzungsphase mit B1 bis B5. Hier werden alle Vorgänge der Nutzung, Wartung, Instandhaltung/-setzung und Umbauten oder Erneuerungen bilanziert. Abschließend werden in der Entsorgungsphase C der Abbruch, Transport, die Abfallbehandlung und Deponierung betrachtet. Die Betrachtung von Beginn bis Ende wird auch als "cradle to grave" bezeichnet.

Zusätzlich gibt es den Bereich D, in dem alle günstigen Effekte bilanziert werden können, wie z. B. die Nutzung von Recycling-Material, die Tunnelthermie, eine Rekarbonatisierung von Beton, o. ä.

Phase 3 Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment)

In dieser Phase werden basierend auf den Ergebnissen der Sachbilanz die potenziellen Umwelteinwirkungen, Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und auf die Ressourcenverfügbarkeit ermittelt. Dafür ist es notwendig, sogenannte Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren festzulegen. In DIN EN ISO 15804:2022 sind Wirkungskategorien und -indikatoren für Bauprodukte vorgegeben (vgl. Bild 8). Der in BASt 2022 vorgeschlagene Kriterienkatalog für die Ökologische Qualität (Bild 9) weicht hiervon in Teilen ab. Letztendlich hängt es von dem jeweiligen Fall ab und muss jeweils neu überlegt und festgelegt werden (vgl. Phasen 1 und 2), welche Wirkungskategorien und -indikatoren zur Anwendung kommen. Dabei sind auch die Vorgaben in DIN EN ISO 14040:2021 und DIN EN ISO 14044:2021 zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse der Sachbilanz müssen den Wirkungskategorien zugeordnet werden (siehe Bild 10 links und Mitte, "Klassifizierung"). Auf dieser Basis können die Werte der Wirkungsindikatoren berechnet werden ("Charakterisierung").

Im Weiteren unterscheiden sich die im internationalen Rahmen üblichen Verfahren. Es gibt sogenannte "teilaggrierende Methoden". Bei diesen werden die errechneten Wirkungsindikatoren (Midpoint) einer Bewertung unterzogen (Bild 10, Fischer & Schuster & Maydl 2014). Hierzu gehört auch das von der BASt vorgeschlagene Vorgehen zur Wertung (vgl. Bilder 9 und 4).

Daneben gibt es sogenannte "vollaggrierende Methoden", bei denen die Wirkungsindikatoren den drei Schutzgütern "Menschliche Gesundheit", "Ökosystemqualität", "Ressourcenknappheit" zugeordnet werden und auf dieser Basis Schädigungspotentiale für diese Schutzgüter errechnet werden. Basierend hierfür wird dann ein schädigungsbasierter Indikator, ein einzelner Kennwert zur Bewertung des betrachteten Systems, ermittelt. Die Bezeichnung dieses Wertes ist je nach betrachtetem System verschieden (Bild 10, Fischer & Schuster & Maydl 2014).

	Wirkungskategorie / Indikator	Kürzel	Einheit
Umweltwirkungen - Kernindikatoren -	Klimawandel / Treibhausgaspotenzial -gesamt / -fossil / -biogen / -luluc	GWP -gesamt /-fossil / -biogen /-luluc	kg CO ₂ -Äq.
	Ozonabbau / Potenzial des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg CFC-11-Äq.
	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser / Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung	AP	mol H ⁺ -Äq. (kg SO ₂ -Äq.)
	Eutrophierung / Eutrophierungspotenzial - Süßwasser / - Salzwasser / - Land	EP - Süßwasser/ - Salzwasser/ - Land	kg PO ₄ ³⁻ -Äq. - kg P-Äq./ - kg N-Äq / - mol N-Äq.
	Photochemische Ozonbildung / Troposphärisches Ozonbildungspotenzial	POCP	Kg C ₂ H ₄ -Äq.
	Verknappung abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle) / Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für nicht fossile Ressourcen	ADPe	Kg SB-Äq.
	Verknappung von abiotischen Ressourcen – fossile Energieträger / Potenzial für die Verknappung von abiotischen Ressourcen für fossile Ressourcen	ADPf	MJ
	Wassernutzung / Wasser-Entzugspotenzial (Benutzer; entzugsgewichteter Wasserverbrauch)	WDP	M ³ world Äq.
Umweltwirkungen - Zusätzliche Indikatoren -	Feinstaubemissionen / potenzielles Auftreten von Krankheiten aufgrund von Feinstaubemissionen	PM	Auftreten von Krankheiten
	Ionisierende Strahlung, menschliche Gesundheit / Potenzielle Wirkung durch Exposition des Menschen mit U235	IRP	kBq U235-Äq.
	Ökotoxizität (Süßwasser) / potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für Ökosysteme	ETP-fw	CTUe
	Humantoxizität - kanzerogen / potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	HTP-c	CTUh
	Humantoxizität - nicht kanzerogen / potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen	HTTP-nc	CTUh
	Mit der Landnutzung verbundene Wirkungen/Bodenqualität / Potenzieller Bodenqualitätsindex	SQP	-
Ressourceneinsatz	Einsatz erneuerbare Primärenergie (energetisch / stofflich / gesamt)	PER (PERE /PERM/ PERT)	MJ
	Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie (energetisch / stofflich / gesamt)	PENR (PENRE /PENRM/ PENRT)	MJ
	Einsatz von Sekundärstoffen	SM	Kg
	Einsatz von erneuerbaren Sekundärbrennstoffen	SF	MJ
	Einsatz von nicht erneuerbaren sekundären Brennstoffen	NRSF	MJ
	Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen	FW	m ³
Abfallkategorien	Deponierter gefährlicher Abfall	HWD	Kg
	Deponierter nicht gefährlicher Abfall (Siedlungsabfall)	NHWD	Kg
	Radioaktiver Abfall	RWD	Kg
Output-Flüsse	Komponenten für die Weiterverwendung	CRU	Kg
	Stoffe zum Recycling	MFR	Kg
	Stoffe für die Energierückgewinnung	MER	Kg
	Exportierte Energie elektrische EEE / thermische EET	EE (EEE / EET)	MJ

Blau: Wegen Einschränkungen nicht relevant für Standard-Baumaßnahme

Rot: Werte unsicher ⇒ Vorsicht bei Wertung

Bild 8: Wirkungskategorien und -indikatoren gemäß DIN EN ISO 15804:2022

Nr.	Kriterium	Abkürzung	Einheit
1	Globales Erwärmungspotenzial	GWP	[kg CO ₂ -Äq.]
2	Abbaupotential der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	[kg CFC-11/R11-Äq.]
3	Bildungspotential für troposphärisches Ozon	POCP	[kg C ₂ H ₄ -Äq.]
4	Versäuerungspotential von Boden und Wasser	AP	[kg SO ₂ -Äq.]
5	Eutrophierungspotential	EP	[(PO ₄) ³⁻ -Äq.]
6	Risiken für die lokale Umwelt / lokale Umweltverträglichkeit (Teil A – Flora und Fauna)	-	-
7	Risiken für die lokale Umwelt / lokale Umweltverträglichkeit (Teil B – Boden, Wasser, Luft)	-	-
8	Umweltwirkungen infolge baubedingter Verkehrsbeeinträchtigung	-	-
9	Umweltwirkungen infolge Linienführung	-	-
10	Primärenergiebedarf	PE _{ERN} , PE _{NERN}	[MJ]
11	Abwasseraufkommen		
12	Flächeninanspruchnahme		
13	-		
14	Ressourcenschonung		

Bild 9: Kriterienkatalog Ökologische Qualität nach BASt 2022

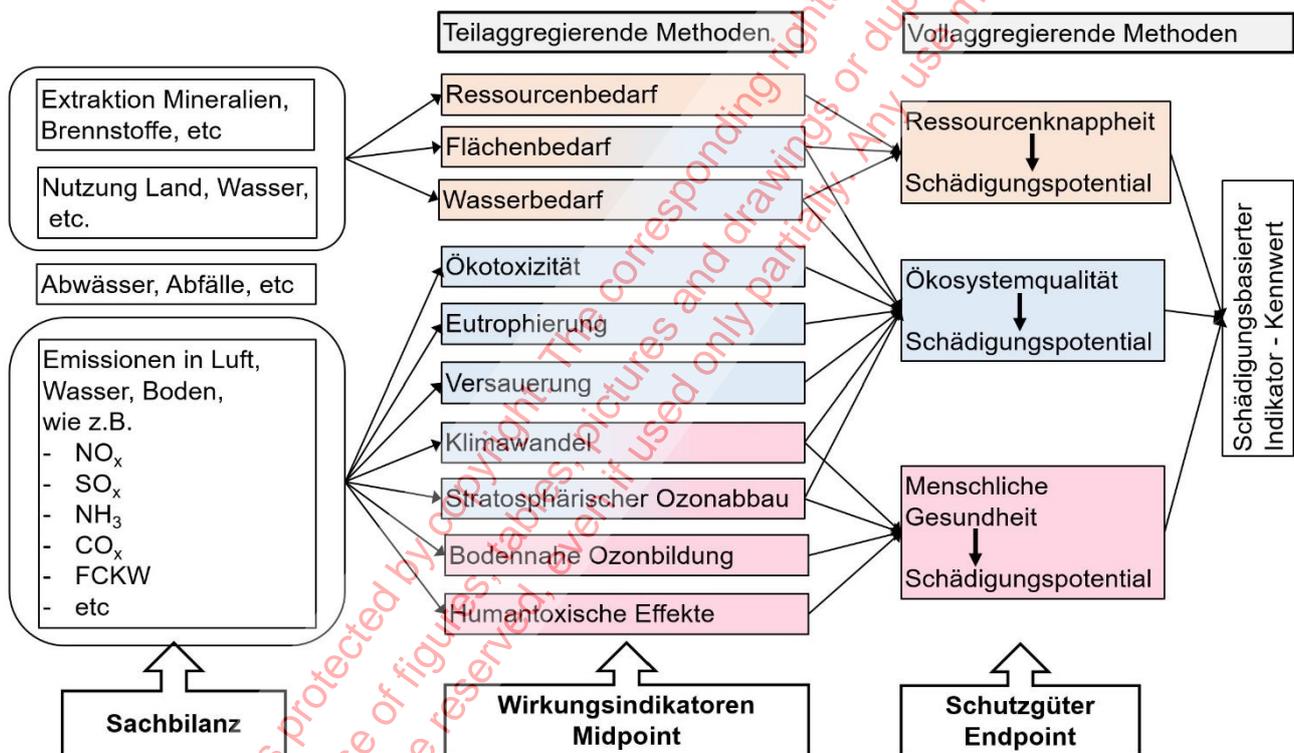


Bild 10: Sachbilanz - Wirkungskategorien - Schutzgüter - Wertung in Anlehnung an (Fischer & Schulters & Maydl 2014; Jolliet et al. 2004; European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability 2010)

Phase 4 Auswertung

Abschließend werden die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung in Bezug auf das Ziel der Ökobilanzstudie interpretiert.

Herausforderungen und Schwierigkeiten bei der Erstellung einer Ökobilanz

Einerseits gibt es weltweit eine Vielzahl verschiedener Bilanzierungsverfahren und Bewertungssysteme und in der Folge auch verschiedene Datenbanken und Softwares für die Bilanzierung, die auf den verschiedenen Systemen basieren und teilweise intransparent sind. Das führt dazu, dass die Ergebnisse weder vergleichbar noch übertragbar sind. Bei der Recherche nach Bilanzierungsgrößen oder Verwendung von Bilanzierungsmodellen muss man also sehr darauf Acht geben, dass man nur solche Werte und Modelle gemeinsam verwendet, die den gleichen Prinzipien folgen und somit zusammenpassen (Einheitlichkeit des Systems).

Weiterhin fehlen im Moment noch eine Vielzahl von Daten und Kriterien, weshalb die Erstellung einer Ökobilanz noch sehr mühsam sein kann. Es müssen häufig Annahmen getroffen werden. Es sollte das Ziel sein, gemeinsam (Bauherren, Planer, Baufirmen, Forschung) entsprechende Daten- und Kriterienkataloge zu erarbeiten.

Schließlich werden mit Bilanzierungen zuweilen verschiedene Ziele, auch politischer Natur, verfolgt. Es ist durchaus möglich, die Ergebnisse einer Ökobilanz durch entsprechende Annahmen zu steuern. Auf diese Weise wurden auch Infrastrukturprojekte oder ein Infrastruktur-Typ insgesamt schon mehrfach "schlecht gerechnet". Deshalb ist es wichtig, dass die Projektverantwortlichen - Bauherren, Planer und Bauindustrie - sich dieser Thematik selber annehmen und im Sinne der Sache zur Versachlichung beitragen.

4. BIM-basierte Ökobilanz

In BAST 2022 wird für die Bilanzierung in den frühen Leistungsphasen ein "Baukasten-System" vorgeschlagen. In diesem werden mangels Kenntnis nicht alle Schritte des Lebenszyklus direkt mit Massen berücksichtigt, sondern z. T. nur vereinfacht oder über Faktoren. Für Straßenzüge wurde ein fertiger Katalog erarbeitet mit Emissionsfaktoren pro Laufmeter Straße in Abhängigkeit von der Straßenklasse. Für Brücken gibt es erste Ansätze für Emissionsfaktoren pro m² in Abhängigkeit von der Bauweise (z. B. Zinke 2016, Lünser 1999)]. Die bisher für Tunnel vorliegenden Ansätze beschränken sich auf die CO₂-Emissionen (z. B. Sauer 2016) oder Arbeiten aus dem Ausland, die z. T. anderen Ansätzen folgen.

Wir verfolgen derzeit das Prinzip einer BIM-basierten Ökobilanz. Das BIM-Modell für das Bauwerk, welches ohnehin für die Planung erstellt werden muss, beinhaltet die Geometrie und damit die Mengen sowie die Materialien und Baustoffe mit ihren Eigenschaften (Bild 11 links). Zusätzlich kann man ein BIM-Modell für die Nutzungsphase einführen, indem alle Daten zur Nutzung festgehalten sind (Bild 11 rechts oben). Im Gebäudesektor wäre dies das Modell für das Facility Management. Aus diesem Modell ergibt sich eine entsprechende Erhöhung der Mengen, die bei der Bilanzierung berücksichtigt werden muss, z. B. infolge eines regelmäßigen Ersatzes des Straßenoberbaus oder der Schienen während der 100-jährigen Lebensdauer. Darüber hinaus gibt es eine LCA-Datenbank, die alle Daten für die Ökobilanz beinhaltet, wie z. B. Emissionsfaktoren für Zement Typ CEM II (Bild 11 rechts unten). Aufgrund der bereits erwähnten fehlenden oder inkonsistenten Daten bauen wir

diese Datenbank derzeit selber auf. Denkbar ist jedoch auch eine Schnittstelle mit öffentlichen Datenbanken.

Das Vorgehen ist also ähnlich wie bei der BIM-basierten Zeit- und Kostenplanung (4D/5D).

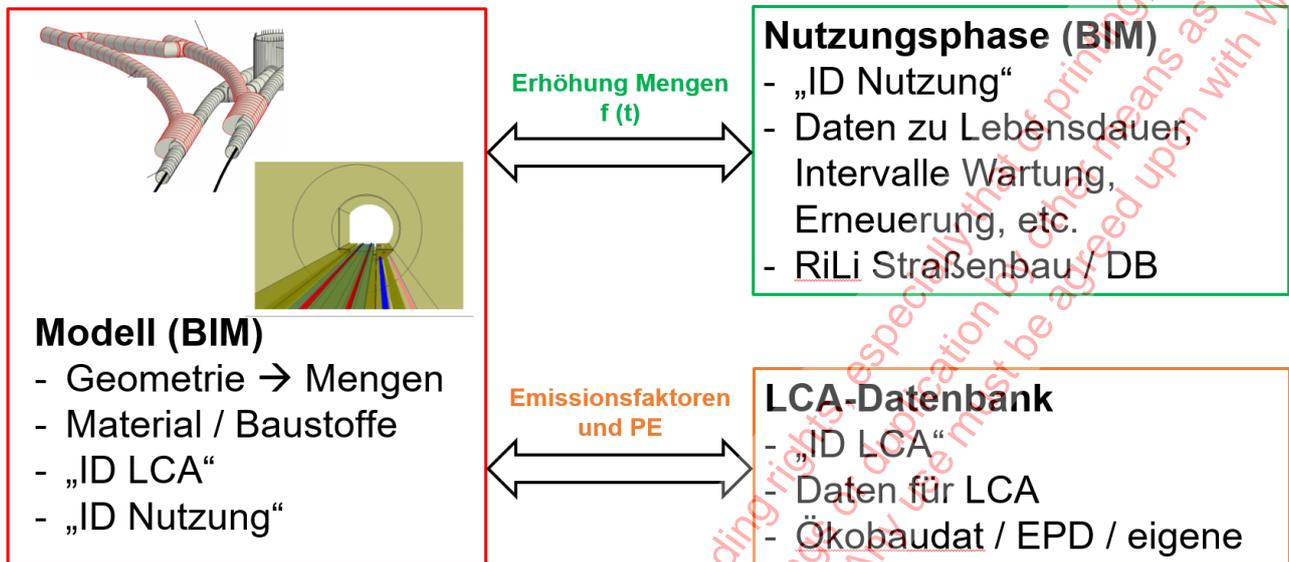


Bild 11: BIM-basierte Ökobilanzierung

5. Beispielhafte Darstellung von Stellschrauben

Um beispielhaft einige der wesentlichen Stellschrauben aufzuzeigen, haben wir zwei BIM-Bauwerkmodelle, für einen Autobahntunnel nach der Spritzbetonbauweise und für einen eingleisigen, mit einer TVM aufgefahrenen Eisenbahntunnel erstellt. Ein Auszug aus beiden Modellen ist in Bild 12 dargestellt.

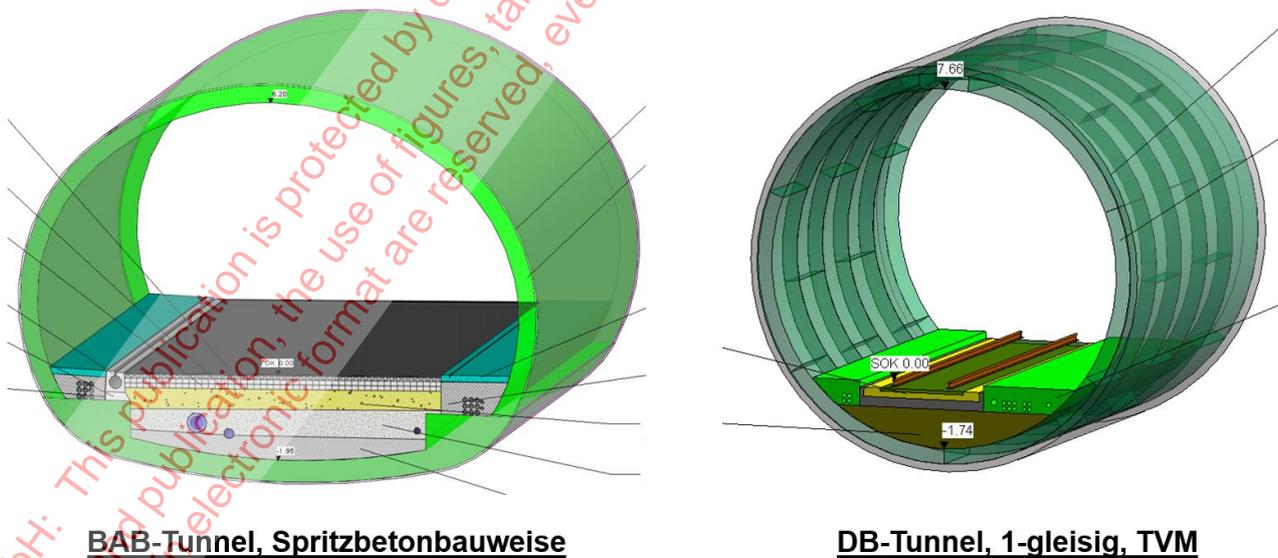


Bild 12: Auszug aus BIM-Modellen

Bild 13 zeigt für den Autobahntunnel (Bild 12 links), bei einer Länge von 1 km und für den gesamten Lebenszyklus mit einer Lebensdauer von 100 Jahren, den Energiebedarf und die Emissionen. Für jede Wirkungskategorie sind die prozentualen Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen dargestellt. Es wird deutlich, dass diese sehr verschiedene Auswirkungen auf die Wirkungskategorien haben. Beispielsweise wird der Energiebedarf wesentlich von der Betriebsphase beeinflusst, obwohl die Einwirkungen aus dem Verkehr selber entsprechend dem Modell der BASt hier nicht berücksichtigt wurden. Der Ozonabbau hingegen wird im Wesentlichen von der Bauphase und der Transportphase beeinflusst, die globale Erwärmung von der Produktherstellung, Bau und Transport sowie der Betriebsphase. Diese Darstellung macht deutlich, dass es unzureichend ist, nur eine Wirkungskategorie, wie z. B. die CO₂-Emissionen, zu betrachten. Fischer et al. 2014 haben darüber hinaus gezeigt, dass je nach Betrachtung die anderen Wirkungsfaktoren eine wichtigere Rolle spielen als die CO₂-Emissionen.

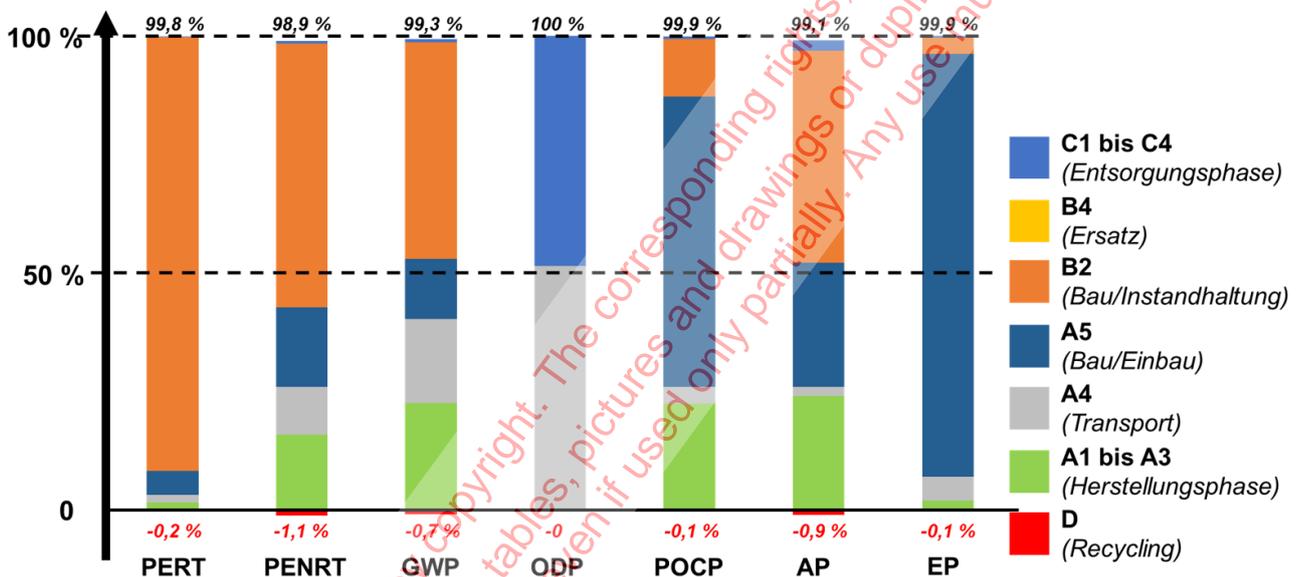


Bild 13: BAB-Tunnel, Energiebedarf und Emissionen, Anteile Lebenszyklusphasen für eine Lebensdauer von 100 Jahren und eine Länge von 1 km

Ebenfalls interessant ist es, dass die Emissionen während der Bauphase im Zuge der Lebensdauer eines Projekts in der Regel von den Emissionen der Betriebsphase überschritten werden (Bild 14). Der Zeitpunkt der Überschreitung hängt von den Randbedingungen ab, liegt aber z. T. überraschend früh, auch dann, wenn die Auswirkungen des Verkehrs nicht in der Ökobilanz berücksichtigt werden. Deshalb ist es aus Sicht der Ökobilanz durchaus lohnenswert, so zu planen und zu bauen, dass die Emissionen in der Betriebsphase verringert werden, auch dann, wenn dies in der Bauphase zu Mehremissionen und Mehrkosten führt.

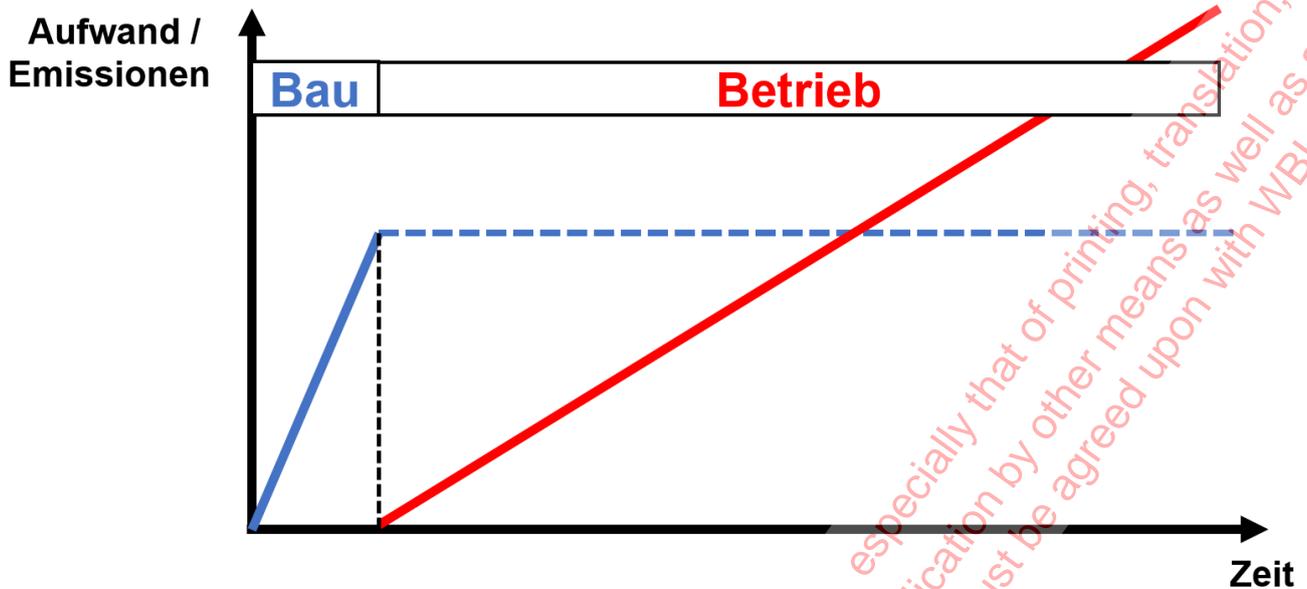


Bild 14: BAB-Tunnel, Energieaufwand und Emissionen - Bau vs. Betrieb, Prinzip

Wenn man nur die Herstell-, Transport- und Bauphase (A1 bis A5) betrachtet, spielt für einige Wirkungskategorien der Vortrieb (Diesel-/Strombedarf) für andere Wirkungskategorien der Materialbedarf, insbesondere von Beton und Stahl, eine wesentliche Rolle (Bild 15).

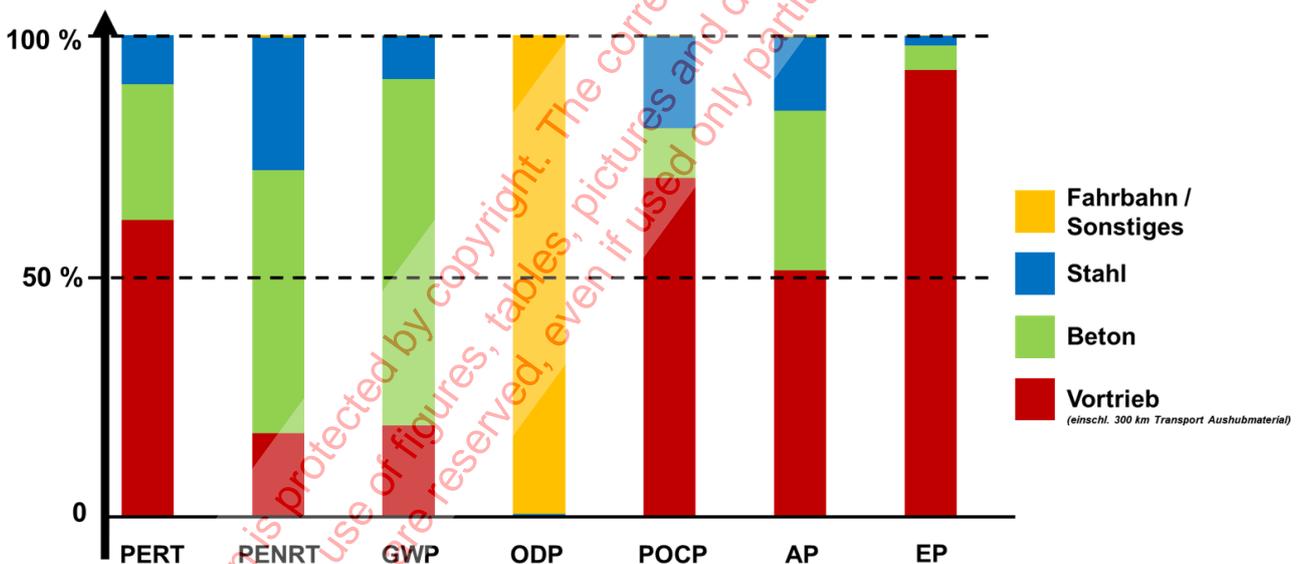


Bild 15: BAB-Tunnel, Energieaufwand und Emissionen, Anteil Baustoffe an A1 - A5 (Herstellungs- und Bauphase)

Für den eingleisigen, mit einer TVM aufgefahrenen Tunnel mit einer festen Fahrbahn (Bild 12 rechts) ist das Treibhausgaspotenzial (GWP in t CO₂-Äq.) für die Herstellungs- und Bauphase (A1 bis A5) pro Laufmeter Tunnel sowie die prozentuale Aufteilung auf verschiedene Elemente in Bild 16 dargestellt. Hier ist eine deutliche Dominanz des Betons sowie auch des Vortriebs zu erkennen. Bei den durch den Beton bedingten Emissionen spielt die Zusammensetzung, insbesondere der Zementanteil des Betons und der Klinkeranteil des Zements, eine große Rolle. Diesbezüglich lohnt sich eine Optimierung im Zuge der Planung.

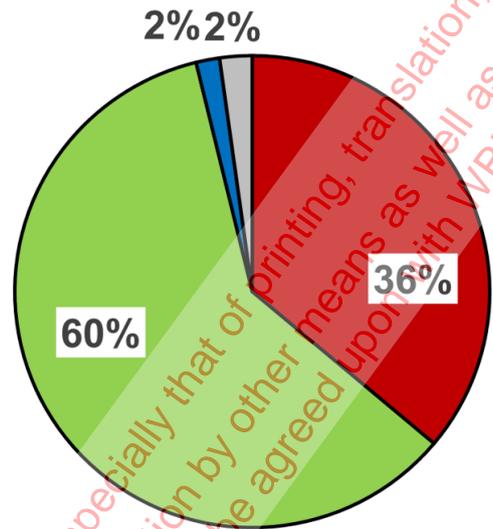
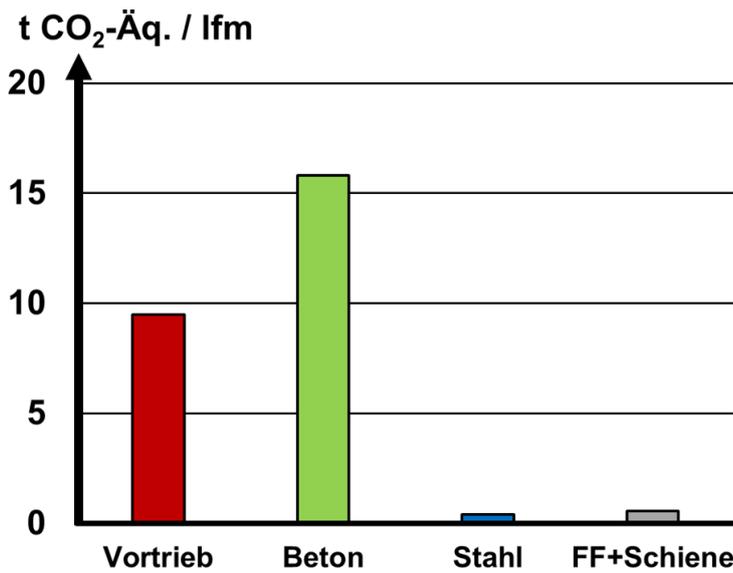


Bild 16: DB-Tübbingtunnel, GWP für A1 - A5 (Herstellungs- und Bauphase)

Bild 17 zeigt das Treibhausgaspotenzial pro Laufmeter Tunnel, welches sich aus dem Transport des Ausbruchmaterials ergibt. Wenn ein Transport mit einem LKW (40 to) zugrunde gelegt wird, führt die Reduzierung der Transportentfernung zu einer erheblichen Reduzierung der CO₂-Emissionen pro lfm Tunnel. Vor diesem Hintergrund sollten die Richtlinien zur Entsorgung von Tunnelausbruch in Teilen überdacht werden. Beispielsweise wäre es im Sinne der Nachhaltigkeit durchaus sinnvoll, es bei Ersatzneubauten zu genehmigen, dass die alte Tunnelröhre mit dem Tunnelausbruch aus der neuen Tunnelröhre verfüllt wird - auch dann, wenn der Ausbruch geogen belastet sein sollte.

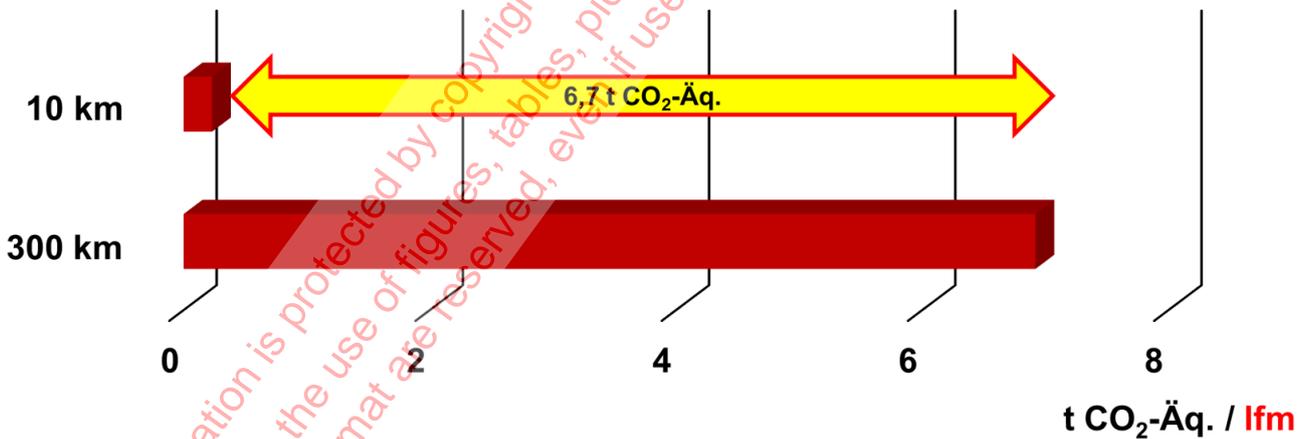


Bild 17: DB-Tübbingtunnel: Einfluss Transportweiten des Aushubmaterials auf das GWP (Errichtungsphase A4)

In Bild 18 werden zwei Fälle gegenübergestellt. In dem einen Fall wird der Zuschlag für die Tübbinge aus einer Kiesgrube gewonnen, über 50 km transportiert zu der im Baustellenbereich liegenden Tübbingfabrik, und der Tunnelausbruch wird über 300 km zu einer Deponie transportiert (GWP: gelber Balken). In dem anderen Fall wird 80 % des Tunnelausbruchs als Zuschlagsmaterial verwendet und nur 20 % zugeliefert. Der Ausbruch muss hierfür auf-

bereitet werden. Dies sowie die Reduzierung der Transporte wurde in der Bilanzierung berücksichtigt (GWP: grüner Balken). Die Graphik zeigt, dass eine Verwertung des Ausbruchs im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu einer erheblichen Reduzierung des Treibhausgaspotenzials führt.

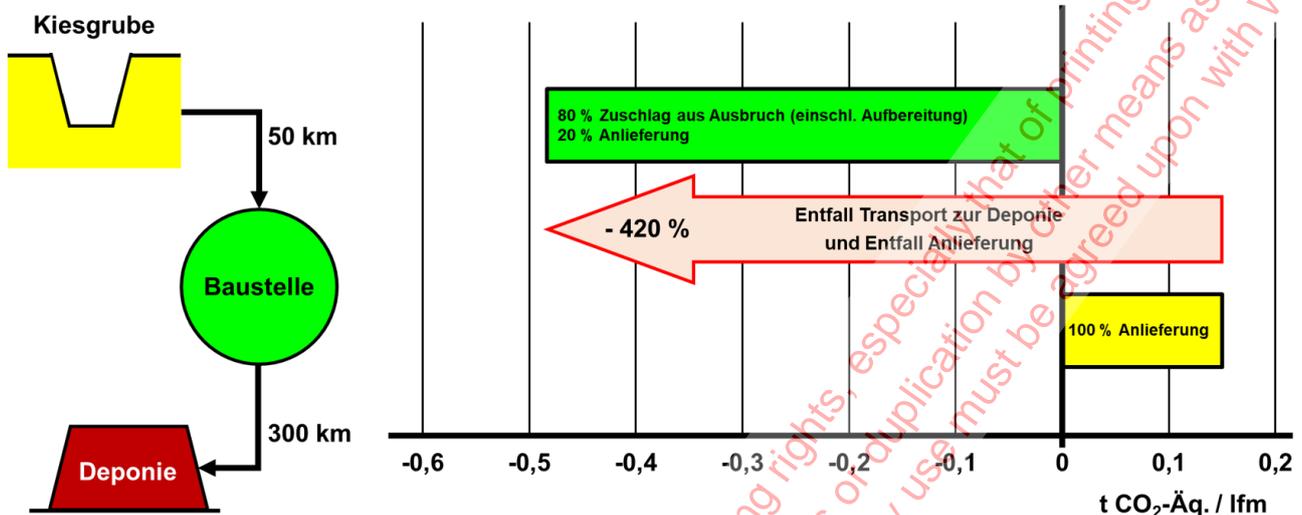


Bild 18: DB-Tübbingtunnel: Reduzierung des GWP durch Nutzung des Aushubs als Zuschlag

6. Ansätze für die Minimierung der Umwelteinwirkungen

Die Möglichkeit der Minimierung der Umwelteinwirkungen beginnt bereits in der frühen Planungsphase. Beispielhaft seien die folgenden Ansatzpunkte genannt:

- Trasse und Gradiente:
Optimierung im Hinblick auf die Wirkungskategorien in der Betriebsphase.
- Tunnelquerschnitt und Vortriebskonzept:
Optimierung basierend auf einer modernen Tunnelplanung unter Berücksichtigung der Interaktion Baugrund-Bauwerk.
- Baustoffe und Bauteile
 - Einsatz von Recycling-Produkten ermöglichen.
 - Auf Dauerhaftigkeit und hohe Qualität achten.
 - Wesentliche Komponenten gut schützen.
 - Wartungsarm planen.
 - Auf Wiederverwendbarkeit achten.

Ein Beispiel für die Reduzierung des Primärenergiebedarfs und der Umweltwirkungen, die mit einer modernen Tunnelplanung erreicht werden kann, ist in Bild 19 dargestellt. Weitere sehr interessante Beispiele finden sich in Wittke, W. et al. 2022 und Wittke, W. & Wittke, M. 2023.

Die Bauherren-Seite könnte im Rahmen der Ausschreibung von Baumaßnahmen ebenfalls positiven Einfluss auf die Ökobilanz nehmen, indem Wertungskriterien und/oder Anreize und/oder Vorgaben eingeführt werden. Aspekte, die hier einbezogen werden könnten, sind beispielsweise: moderne Planung / kurze Transportwege / emissionsarme Geräte / Transporte / Maschinen / innovative Baustoffe / Recycling-Produkte / Weiterverwendung des Ausbruchs.

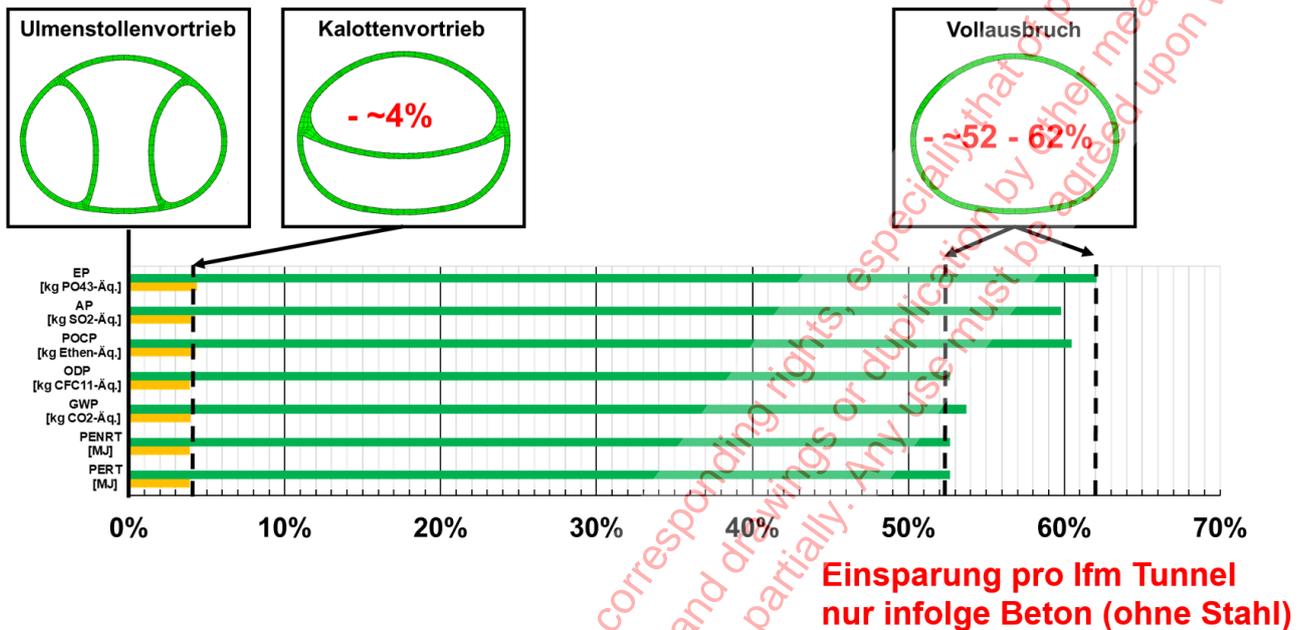


Bild 19: Reduktion des Primärenergiebedarfs und der Umweltwirkungen durch eine moderne Tunnelplanung

Literatur

BASSt: Nachhaltigkeitsbewertung von Streckenzügen der Straßeninfrastruktur. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 361, Juli 2022.

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen BNB. <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/>, Abruf im Juni 2023.

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (DGNB): Nachhaltigkeitsansatz der DGNB. <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/nachhaltigkeitsansatz-der-dgnb>, abgerufen im Juni 2023.

Deutscher Bundestag: Abschlussbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung". Drucksache 13/11200, Berlin, 1998.

DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen.

DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.

DIN EN ISO/TR 14047:2016-06: Umweltmanagement - Ökobilanz - Beispiele zur Anwendung von ISO 14044 zur Wirkungsabschätzung.

DIN EN ISO/TR 14049:2012-06: Umweltmanagement - Ökobilanz - Beispiele zur Anwendung von ISO 14044 zur Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie zur Sachbilanz.

DIN EN ISO 15804:2022-03: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: ILCD Handbook: International Reference Life Cycle Data System - Analysis of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment, Italy, 2010.

Fischer, G.; Schulter, D.; Maydl, P.: Neue Indikatoren zur Bewertung der Umweltwirkung von Bauprodukten und Bauweisen. TU Graz, 2014.

Jolliet O. et al.: UNEP/SETAC Life Cycle Initiative - The LCIA Midpoint-damage Framework of the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative, International Journal of LCA 9 (6), 2004.

Lünser, H.: Ökobilanzen im Brückenbau, Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung. Springer Basel AG, 1999.

Sauer, J.: Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur. TUM, Lehrstuhl für Massivbau, Institut für Baustoffe und Konstruktion. 2016.

Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Druffel, R.: Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO₂-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau. In: Tunnel 3/2022.

Wittke, W.; Wittke, M.: Einsparung von CO₂-Emissionen und Kosten mit einschaliger konventioneller Tunnelbauweise. Vortrag anlässlich des 8. Felsmechanik- und Tunnelbautags im WBI-Center am 22.06.2023. WBI-PRINT 25, Weinheim, 2023.

Zinke, T.: Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken: Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte. KIT, Versuchsanstalt für Stahl, Holz, Steine. 2016.