

Empfehlungen zur

Nachhaltigkeit im Untertagebau

Teil 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen,
Lösungsansätze und Projektbewertung

Empfehlungen zur Nachhaltigkeit im Untertagebau – Teil 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen, Lösungsansätze und Projektbewertung

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 Offene Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung und Fazit
- 7 Verweise

Anhang A: Kriterien und Indikatoren für Nachhaltigkeitsbewertungen

Anhang B: Projektbeispiele mit Beiträgen zur verbesserten Nachhaltigkeit

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	5 Projektbewertung	40
Glossar	8	5.1 Generelle Anmerkungen	40
Präambel	10	5.2 Theoretische Ansätze zur Projektbewertung	41
1 Politische Rahmenbedingungen	11	5.2.1 Allgemeines zur Nachhaltigkeitsbewertung von Projekten der unterirdischen Infrastruktur	41
1.1 UN Nachhaltigkeitsziele	11	5.2.2 Bewertungsmatrix für untertägige Bauwerke	42
1.2 EU Vorgaben	12	5.3 Grundlagen zu Bewertungsverfahren	43
1.3 Umsetzung in Deutschland	12	5.3.1 Allgemeines	43
2 Status Quo und aktuelle Herausforderungen	12	5.3.2 Die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)	44
2.1 Generelle Situation	12	5.3.3 Die Nutzwertanalyse (NWA)	44
2.2 Atmosphäre und Klimaschutz	13	5.3.4 Multikriterielle Verfahren	45
2.3 Natürliche Ressourcen	16	5.4 Mögliche Bewertungsverfahren für einen Einsatz bei Bauten der unterirdischen Infrastruktur	47
2.4 Biodiversität	16	5.4.1 Allgemeine Hinweise	47
3 Beiträge der Untertagebauten zur Nachhaltigkeit	20	5.4.2 BREEAM Infrastructure	47
3.1 Ökologie	20	5.4.3 Envision	48
3.1.1 Ökologische Aspekte – innerstädtisch	20	5.4.4 Standardisierte Bewertung	49
3.1.2 Ökologische Aspekte – außerorts	22	5.4.5 Methodik der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen	49
3.2 Soziales	23	5.4.6 Methodik der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS)	50
3.2.1 Soziale Aspekte – innerstädtisch	23	5.4.7 Nachhaltigkeits-Indikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte (NISTRA)	50
3.2.2 Soziale Aspekte – außerorts	24	5.4.8 Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Bewertungsverfahren	51
3.3 Ökonomie	25	5.5 Empfehlung für die Auswahl von Kriterien, Indikatoren und Zielsysteme der Nach- haltigkeitsbewertung im Untertagebau	51
3.3.1 Allgemeines	25	5.6 Empfehlungen zur Durchführung von Projektbewertung bei untertägigen Bauten	51
3.3.2 Volkswirtschaftlicher Nutzen	25	5.6.1 Allgemeines	51
3.3.3 Lebensdauer und Langlebigkeit	25	5.6.2 Durchführung der Bewertung	52
3.3.4 Wartungs- und Instandhaltungsaufwand	25	6 Offene Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung und Fazit	53
4 Wege zum nachhaltigen Untertagebau	27	6.1 Bewertung des derzeitigen Wissen- standes	53
4.1 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen	27	6.1.1 Zur Nachhaltigkeitsbewertung und der vorliegenden Empfehlung	53
4.2 Genese eines Projektes	27	6.1.2 Hinweise zur Anpassung politisch- administrativer Randbedingungen	54
4.2.1 Bedarf, Projektziele	27	6.1.3 Hinweise zur Weiterentwicklung der methodischen Ansätze von Bewertungssystemen	54
4.2.2 Aufgaben und Verantwortung des Bauherrn	28	6.1.4 Priorisierung und Wichtung von Kriterien und Indikatoren	55
4.3 Projektstrukturierung	28	6.2 Fazit	55
4.4 Planung und Projektabwicklung	28	7 Verweise	56
4.4.1 Integraler Planungsprozess	28	Anhänge	61
4.4.2 Integrierte Projektabwicklung	29		
4.4.3 Querschnittsoptimierung	29		
4.4.4 Verwendung von Recycling-Material	30		
4.4.5 Dauerhaftigkeit	30		
4.4.6 Abwärme, Energiegewinnung	30		
4.4.7 Vertragliche Festlegungen	30		
4.5 Maßnahmen	31		
4.5.1 Maßnahmen zum Klimaschutz	31		
4.5.2 Umgang mit Ressourcen	34		
4.5.3 Förderung der Biodiversität	37		
4.5.4 Verlängerung der Lebensdauer und Umnutzung	38		

Abkürzungen

AbfRRL	EU-Abfallrahmenrichtlinie
AP	Acidification Potential (Versauerungspotenzial)
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
ASV	Automated Service Vehicle
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BIM	Building Information Modelling
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Method
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CBD	Convention on Biological Diversity
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
CEN	European Committee for Standardization
CSA	Calcium-Sulfo-Aluminat
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente
CO₂-Eq/cap	CO ₂ -Äquivalente pro Kopf
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
DepV	Deponieverordnung
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
EPD	Environmental Product Declaration (Umweltproduktdeklaration)
GWP	Global Warming Potential (Treibhausgaspotenzial)
HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen
IBU	Institut Bauen und Umwelt e. V.
ITC	Integrated Tunnel Carrier

KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Klimaschutzgesetz
LAGA	Länderarbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LCC	Life Cycle Costs (Lebenszykluskosten)
LCI	Life Cycle Inventory Analysis (Sachbilanz)
LCIA	Life Cycle Impact Assessment (Wirkungsabschätzung)
MADM	Multi attribute decision making (Multiattributive Entscheidungsfindung)
MCDM	Multi criterial decision making (Multikriterielle Entscheidungsfindung)
MODM	Multi objective decision making (Mehrstufige Entscheidungsfindung)
MSV	Multi Service Vehicle
NISTRA	Nachhaltigkeits-Indikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NKI	Nutzen-Kosten-Indikator
NWA	Nutzwertanalyse
ODP	Ozone Depletion Potential (Ozonschichtabbau-potenzial)
PCR	Product Category Rules (Produktkategorie-Regeln)
PENRT	Primary energy non-renewable, total use (nicht erneuerbarer Primärenergiebedarf)
PERT	Primary energy renewable, total use (erneuerbarer Primärenergiebedarf)
PP	Polypropylen
SDG	Sustainable Development Goal (Nachhaltigkeitsziel)
SNBS	Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz
TAS	Tunnelaufweitungssystem
THG	Treibhausgas
TiT	Tunnel-in-Tunnel Methode

Glossar

Agenda 21	Unter der „Agenda 21“ versteht man das Aktionsprogramm der Vereinten Nationen, welches 1992 von 178 Staaten auf der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen (UNCED) in Rio de Janeiro beschlossen wurde. Die „Agenda 21“ setzt Leitlinien zur nachhaltigen Entwicklung im 21. Jahrhundert.
Agenda 2030	Die „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ ist das erste internationale Abkommen, in dem das Prinzip der Nachhaltigkeit mit der Armutsbekämpfung und der ökonomischen, ökologischen und sozialen Entwicklung verknüpft wird. Sie wurde am 25. September 2015 in der UN-Generalversammlung in New York verabschiedet. Sie enthält 17 Entwicklungsziele („Sustainable Development Goals“, SDGs).
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>
CCS	Carbon Capture and Storage, Abtrennung und dauerhafte (unterirdische) Speicherung von Kohlenstoffdioxid (CO ₂) aus Kraftwerksabgasen und Industrieprozessen.
CCU	Carbon Capture and Utilisation, Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO ₂) insbesondere aus Verbrennungsabgasen und dessen anschließende Verwendung bei chemischen Prozessen.
CO₂-Äq.	CO ₂ -Äquivalente (CO ₂ -Äq., engl. CO ₂ e) sind eine Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase (Methan hat z. B. eine 28-fach größere Klimawirkung als CO ₂ , Lachgas übersteigt die von CO ₂ sogar um beinahe das 300-fache).
Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie	In Deutschland wurde 2002 eine erste nationale Nachhaltigkeitsstrategie erstellt. Seit 2004 wird diese in einem vierjährigen Zyklus fortgeschrieben. Basierend auf der im September 2015 von 193 UN-Mitgliedstaaten verabschiedeten „Agenda 2030“ erfolgte 2016 eine grundlegende Überarbeitung und der Name wurde in „Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie“ geändert. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie enthält die Überführung der Ziele der UN „Agenda 2030“ (SDG) der Vereinten Nationen in eine nationale Strategie. Mit der Weiterentwicklung 2021 wurden auch die Ziele des EU Green Deals aufgenommen.
EU Green Deal	Der European Green Deal ist ein von der Europäischen Kommission am 11. Dezember 2019 vorgestelltes Konzept mit dem Ziel, bis 2050 in der Europäischen Union die Netto-Emissionen von Treibhausgasen auf null zu reduzieren und somit als erster „Kontinent“ klimaneutral zu werden.

EU Industrieplan	Der EU Industrieplan ist Bestandteil des EU Green Deals und soll die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen CO ₂ -neutralen Industrie stärken und den raschen Übergang zur Klima-Neutralität unterstützen. Mit dem Industrieplan soll ein günstigeres Umfeld für die Ausweitung der EU-Produktionskapazität von CO ₂ -neutralen Technologien und Produkten geschaffen werden, die zum Erreichen der Klimaziele Europas erforderlich sind.
EU Taxonomie-Verordnung	Die europäische Taxonomie-Verordnung (Taxonomy Regulation, TR, VO (EU) 2020/852) legt ein einheitliches System von Kriterien fest, anhand dessen sich bestimmen lässt, ob eine wirtschaftliche Tätigkeit als ökologisch nachhaltig einzustufen ist.
GWP	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 CO ₂ zur globalen Erwärmung beiträgt. Das Treibhauspotential ist ein Kennwert mit der Dimension Zahl und dem Formelzeichen CO ₂ e bzw. CO ₂ -Äq.
Pocket-Parks	Ein Pocket-Park (deutsch sinngemäß: Westentaschen-Park, auch Taschenpark auch vest-pocket park) ist ein kleiner Freiraum im städtischen Kontext, der gärtnerisch gestaltet ist und zuvor als „toter“ Winkel nicht wahrgenommen wurde oder brach lag (Wikipedia).
Schwammstadt	Schwammstadt (englisch Sponge City) ist ein neues Konzept der Stadtplanung, um möglichst viel des anfallenden Regen- bzw. Oberflächenwassers vor Ort aufzunehmen und zu speichern. Das wertvolle Wasser soll nicht mehr schnell abgeleitet werden und in der Kanalisation verschwinden. Dadurch sollen z. B. Überflutungen bei Starkregen-Ereignissen vermieden bzw. verringert, das Stadtklima verbessert und die Gesundheit von Stadtbäumen sowie die Resilienz von gesamten Stadtökosystemen gefördert werden, was im Zuge der Globalen Erwärmung und der Biodiversitätskrise immer wichtiger wird. Darüber hinaus tragen Stadtpflanzen zur Verbesserung der „Grünen Infrastruktur“, der Stadthygiene sowie des Mikroklimas bei.
Treibhausgase (THG)	Treibhausgase sind diejenigen Gase in der Erdatmosphäre, die den sogenannten Treibhauseffekt hervorrufen. Treibhausgase können einen natürlichen, aber auch einen anthropogenen (menschengemachten) Ursprung haben. Als Treibhausgase werden Kohlenstoffdioxid (CO ₂), Methan (CH ₄), Distickstoffoxid (Lachgas, N ₂ O), fluorierte Treibhausgase (F-Gase), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF ₆) und Stickstofftrifluorid (NF ₃) erfasst.
Treibhausgasbilanzierung	Die Treibhausgasbilanzierung umfasst die Menge der Treibhausgasemissionen, die durch ein Unternehmen, ein Produkt oder eine Dienstleistung entstehen.
Tiny Forest	Ein Tiny Forest (deutsch: Kleinwald, Mikrowald/Nanowald) ist ein angepflanzter Wald auf einer relativ kleinen Fläche mit einer großen Dichte. Ziel solcher Neuanpflanzungen ist, in urbanen Räumen auf kleinen Flächen möglichst vielfältige, schnell wachsende und sich selbst erhaltende Habitate anzulegen und dadurch eine Verbesserung der Umweltsituation zu erreichen (Wikipedia).

Präambel

Die Bewahrung der natürlichen Lebensgrundlagen für aktuelle und künftige Generationen beschäftigt die Gesellschaft und die Politik seit längerer Zeit. Gleichzeitig gibt es weiterhin anhaltende Bedürfnisse (Nachfragen) nach Wohnraum, Arbeit, Bildung, Mobilität, Ver-/Entsorgung, Austausch von Leistungen und Gütern etc. Diese Bedürfnisse sollen in Zukunft unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsziele gedeckt werden. Dazu muss in Deutschland die Infrastruktur deutlich ertüchtigt und, wo notwendig, ausgebaut werden. Der Untertagebau liefert dazu einen wesentlichen Beitrag.

Die vorliegenden Empfehlungen zeigen Zahlen und Fakten zum Thema Nachhaltigkeit im Untertagebau auf, um daraus den themenspezifischen Handlungsbedarf nachvollziehbar herzuleiten, damit die aus den politischen Rahmenbedingungen vorgegebenen Ziele erreicht werden können. Damit soll die Grundlage für sachliche Diskussionen und konkret formulierte Maßnahmen geschaffen werden. Maßnahmenkataloge veranschaulichen, wie die formulierten Ziele umgesetzt werden können.

Untertagebauten stehen oft in Konkurrenz zu alternativen, übertägigen Lösungen. Die Bestvariante unter Berücksichtigung der Anforderungen der Nachhaltigkeit kann nur dann gefunden werden, wenn die eingesetzten Bewertungssysteme sämtliche Aspekte der Nachhaltigkeit korrekt und nachvollziehbar abbilden. Die vorliegenden Empfehlungen zeigen auch hierfür Lösungsansätze auf.

Die bereits spürbaren Folgen des Klimawandels erfordern eine Berücksichtigung bei der Planung und Ausführung von Bauwerken, die sicher genutzt und betrieben werden sollen. Die Ressourcenschonung und das Erreichen der Klimaneutralität sind eng miteinander verknüpft. Beide Ziele bedürfen des Bewusstseins und der Zusammenarbeit sämtlicher Beteiligten aus Industrie, Politik, Ausführung und Planung.

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

- Teil 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen, Lösungsansätze und Projektbewertung
- 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.

Das vorliegende Dokument befasst sich als Teil 1 der Empfehlungen „Nachhaltigkeit im Untertagebau“ mit den allgemeinen politischen Rahmenbedingungen und legt den Status Quo sowie aktuellen Herausforderungen dar. Des Weiteren wird erläutert, welche Beiträge Untertagebauten zur Nachhaltigkeit leisten können. Dabei wird auf ökologische, soziale und ökonomische Aspekte eingegangen. Es werden Lösungsansätze aufgezeigt, wie der Untertagebau noch nachhaltiger wird, indem insbesondere auf die Themen nachhaltige Planung, Kreislaufwirtschaft, neuartige Materialien und verbesserte Bauweisen, Biodiversität sowie Umnutzung von Untertagebauten eingegangen wird. Es werden die theoretischen Ansätze zur Projektbewertung erläutert und mögliche Bewertungsverfahren für einen Einsatz bei Bauten der unterirdischen Infrastruktur vorgestellt und bewertet.

In Teil 2 der Empfehlungen „Nachhaltigkeit im Untertagebau“ [1] werden Informationen und Hilfestellungen für die Durchführung einer Treibhausgasbilanzierung im Untertagebau bereitgestellt. Dies soll Bauherren und Planern eine einheitliche Berechnung ermöglichen. Es werden zwei konkrete Beispiele für die Treibhausgasbilanzierung von Untertagebauwerken vorgestellt. Diese Beispiele sollen veranschaulichen, wie bei einer Treibhausgasbilanzierung von Untertagebauwerken vorgegangen werden kann.

Zum Thema der Nachhaltigkeit im Untertagebau wird auch auf die bereits vorliegenden DAUB-Empfehlungen „Lebenszykluskosten“ [2] und „Verwertung von Tunnelausbruchmaterial“ [3] hingewiesen.

1 Politische Rahmenbedingungen

1.1 UN Nachhaltigkeitsziele

Mit der UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung wurden 1992 in Rio de Janeiro [4] erste Grundsteine für ein international abgestimmtes Vorgehen für den Umgang mit den Forderungen zur nachhaltigen Entwicklung des Planeten Erde und der Menschheit in Form der Agenda 21 gelegt. Dabei wurde die Gleichwertigkeit von Ökologie, Ökonomie und Sozialem als Grundvoraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung festgehalten (**Abbildung 1-1**). Zwei rechtlich bindende Rahmenabkommen über Klimaänderungen [5] und über die biologische Vielfalt [6] wurden zusätzlich verabschiedet.

Zwischenzeitlich wurden die Abkommen weiterentwickelt und mit konkreten Zielvorgaben versehen. Mit dem Klimaabkommen von Paris 2015 [7] wurde z. B. festgehalten, dass die Treibhausgasemissionen so weit reduziert werden sollen, dass die globale Erwärmung gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter auf 1,5 °C beschränkt wird.

Mit der von der UN Generalversammlung einstimmig verabschiedeten Agenda 2030 (ebenfalls aus dem Jahr 2015) [8] wurden 17 spezifische Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDG) formuliert (**Abbildung 1-2**). Diese richten sich an die Regierungen weltweit, aber auch an die Zivilgesellschaft, die Privatwirtschaft und die Wissenschaft.

Die Bauwirtschaft und damit auch der Untertagebau können Auswirkungen auf die 17 SDG haben. Bezogen auf den Untertagebau ist die Hebelwirkung

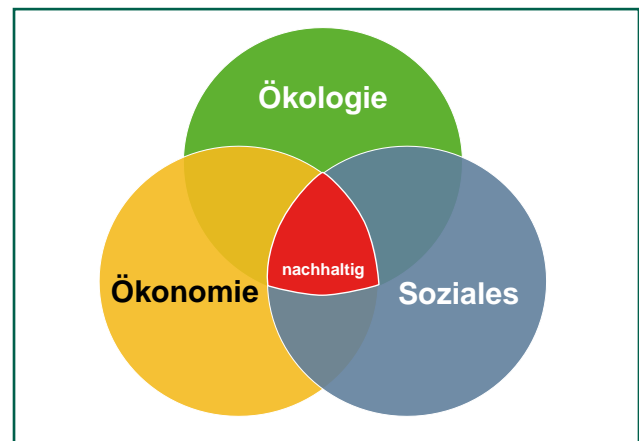


Abbildung 1-1 Gleichwertigkeit von Ökologie, Ökonomie und Sozialem in Anlehnung an die Agenda 21

zur Zielerreichung wohl bei den folgenden Nachhaltigkeitszielen am größten:

- 6 Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen
- 7 Bezahlbare und saubere Energie
- 8 Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum
- 9 Industrie, Innovation und Infrastruktur
- 11 Nachhaltige Städte und Gemeinden
- 12 Nachhaltige/r Konsum und Produktion
- 13 Maßnahmen zum Klimaschutz
- 14 Leben unter Wasser
- 15 Leben an Land



Abbildung 1-2 Die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN [8]

1.2 EU Vorgaben

Auf der Basis des übergeordneten internationalen Rahmens hat sich die EU zum Ziel gesetzt, der erste klimaneutrale Kontinent zu werden. Gemäß den Zielen aus dem 2019 veröffentlichten EU Green Deal [9] sollen ab 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden und das Wirtschaftswachstum von der Ressourcennutzung abgekoppelt sein.

Den notwendigen Wandel in Wirtschaft und Gesellschaft will die EU mit dem 2023 veröffentlichten Industriepan [9] fördern und über entsprechende rechtliche und verbesserte Rahmenbedingungen erleichtern.

Die EU-Taxonomie ist eine im EU-Aktionsplan „Sustainable Finance“ festgelegte Maßnahme, die 2020 in der Taxonomie-Verordnung [10] kodifiziert wurde. Ziel des Aktionsplans ist es, Kapitalflüsse in ökologisch nachhaltige Aktivitäten zu lenken. Wirtschaftstätigkeiten werden gemäß der Taxonomie-Verordnung dann als nachhaltig betrachtet, wenn die folgenden sechs Umweltziele eingehalten sind:

- 1) Klimaschutz
- 2) Anpassung an den Klimawandel
- 3) Nachhaltiger Einsatz und Gebrauch von Wasser und/oder Meeresressourcen
- 4) Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
- 5) Vorbeugung oder Kontrolle von Umweltverschmutzungen
- 6) Schutz und Wiederherstellung von Biodiversität und Ökosystemen

Seit Ende 2021 sind größere Wirtschaftsunternehmen angehalten, jährlich einen Nachhaltigkeitsbericht über ihre Geschäftstätigkeit zu veröffentlichen, aus welchem der Grad der Umsetzung der Umweltziele ersichtlich ist.

1.3 Umsetzung in Deutschland

Deutschland stellt sich hinter die UN- und EU-Zielvorgaben und will die Klimaneutralität sogar bereits bis 2045 erreichen. Seit 2016 orientiert sich die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie an den SDG. Diese wurde 2021 nochmals aktualisiert [11]. Darin werden für Deutschland die folgenden sechs Transformationsbereiche festgelegt:

- Menschliches Wohlbefinden und Fähigkeiten, soziale Gerechtigkeit
- Energiewende und Klimaschutz
- Kreislaufwirtschaft

- Nachhaltiges Bauen und Verkehrswende
- Nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme
- Schadstofffreie Umwelt

Die Umsetzung geschieht über entsprechende rechtliche Vorgaben. So normiert das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) beispielsweise die klimapolitischen Zielvorgaben und enthält u. a. die Vorgabe, dass Träger öffentlicher Aufgaben bei ihren Planungen und Entscheidungen den Zweck des KSG sowie die Einhaltung der europäischen Zielvorgaben gewährleisten müssen.

Eingebettet in die politischen Rahmenbedingungen muss und wird auch der Untertagebau seinen entsprechenden Beitrag zum Einhalten der Nachhaltigkeitsziele leisten.

Die vorliegenden DAUB-Empfehlungen zeigen Möglichkeiten auf, wie dieser Beitrag in Deutschland erreicht werden kann.

2 Status Quo und aktuelle Herausforderungen

2.1 Generelle Situation

Unabhängig von den Forderungen nach einer sozial und ökonomisch nachhaltigen Entwicklung unserer Gesellschaft bestehen weiterhin Bedürfnisse nach Wohnraum, Arbeit, Mobilität, Versorgung, Entsorgung, Austausch von Leistungen und Gütern etc. Diese Bedürfnisse sollen in Zukunft unter Berücksichtigung auch der ökologischen Nachhaltigkeitsziele gedeckt werden.

Der Untertagebau liefert insbesondere im Bereich des Infrastrukturbaus einen wesentlichen Beitrag zum sozialen Wohlbefinden und zu einer nachhaltigen Entwicklung. Künftig gilt es dabei auch im Infrastrukturbau die ökologischen Nachhaltigkeitsziele, insbesondere bezüglich des Klimaschutzes, des Schutzes der natürlich vorkommenden Ressourcen (Kreislaufwirtschaft) und des Erhalts und der Förderung der Biodiversität, sozial gerecht und ökonomisch vertretbar umzusetzen.

Bevor in den nächsten Abschnitten Möglichkeiten für einen nachhaltigeren Untertagebau aufgezeigt werden, erfolgt vorgelagert zur eigentlichen Empfehlung für Untertagebauten eine Beschreibung des derzeitigen Ausgangszustandes.

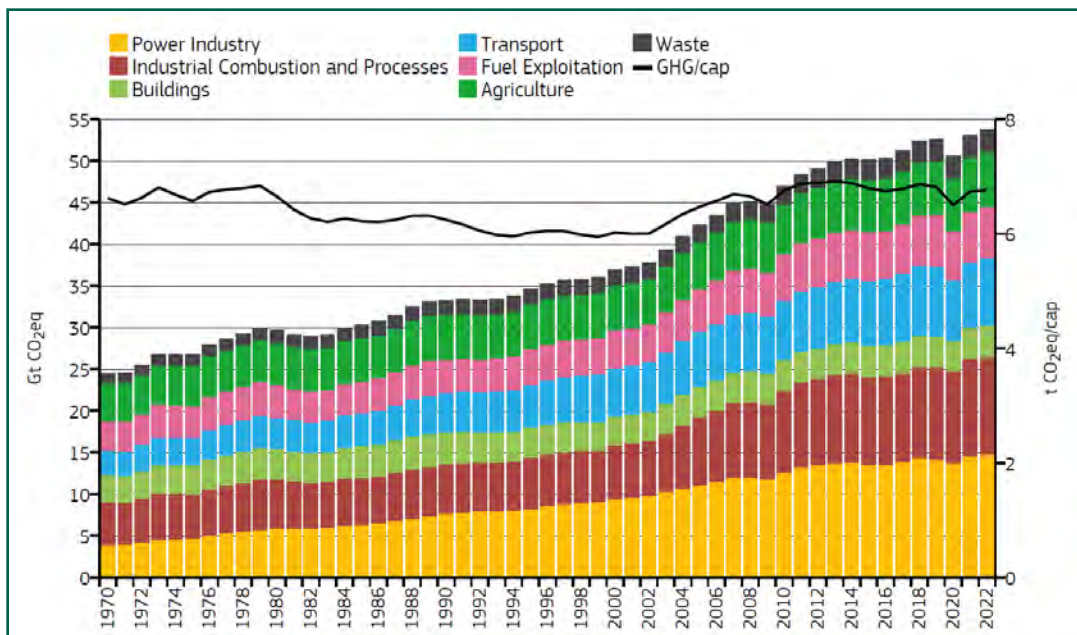


Abbildung 2-1
Entwicklung
des weltweiten
CO₂-Ausstoßes
[12]

2.2 Atmosphäre und Klimaschutz

Im Jahr 2022 wurden weltweit 53.800 Mio. t CO₂-Äq. Treibhausgase emittiert (**Abbildung 2-1**). Der Anteil Deutschlands am globalen Treibhausgasausstoß betrug im Jahr 2021 760 Mio. t CO₂-Äq. [13], was 1,4 % entspricht.

Rund 46 % des Treibhausgasausstoßes verbleiben in der Atmosphäre. Der Rest wird über Ökosysteme an Land oder von den Ozeanen aufgenommen [4]. Bezüglich des atmosphärischen Anteils gilt die wissenschaftliche Erkenntnis, dass sich der stetig steigende Treibhausgasanteil in der Atmosphäre direkt mit dem messbaren Temperaturanstieg korrelieren lässt [14].

Um diese Entwicklung zu stoppen, hat die EU beschlossen, bis 2050 klimaneutral zu werden, d. h. nur

noch so viel Treibhausgase auszustoßen, wie durch eine geänderte Landnutzung und weitere (technische) Maßnahmen kompensiert werden können (vgl. **Kapitel 1.2**).

Eingebettet in die EU-Zielsetzungen hat Deutschland mit seinem Klimaschutzgesetz die Entscheidung getroffen, bereits bis 2045 klimaneutral werden zu wollen (**Abbildung 2-2**).

Bislang sind für den Bau von Untertagebauwerken nur wenige bzw. keine belastbaren Zahlen zur Einordnung der Relevanz an den gesamten Treibhausgasemissionen veröffentlicht. Nachfolgend wird versucht, die Relevanz von Untertagebauten auf Basis vorliegender Zahlen transparent und wertfrei einzuordnen.

Die für die Herstellung von Bauwerken relevanten Emissionen werden entsprechend des KSG nicht dem

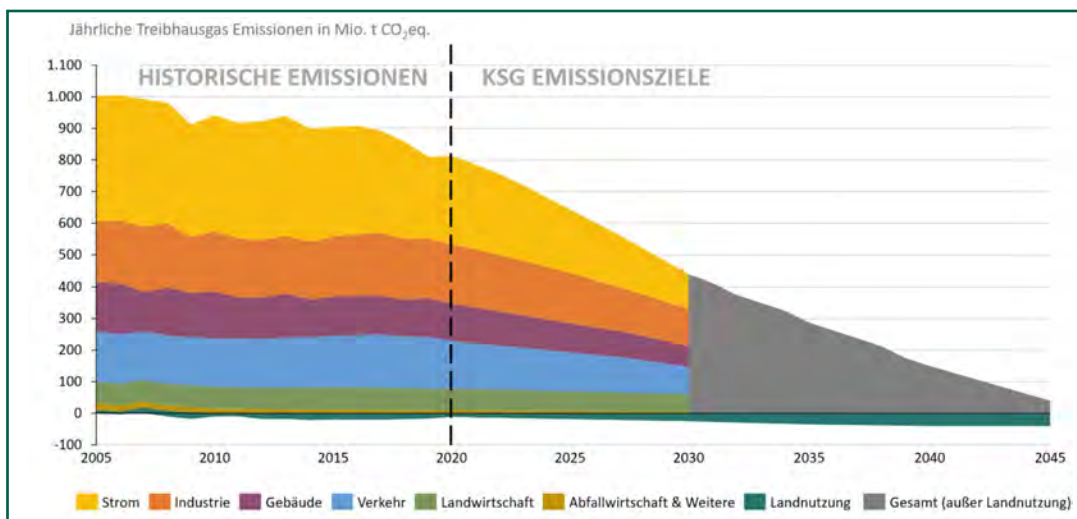


Abbildung 2-2
Emissionsziele
zur Treibhaus-
gasreduktion
gemäß dem
deutschen Klima-
schutzgesetz [15]

Sektor „Gebäude“, sondern dem Sektor „Industrie“ zugeordnet. Letzterer umfasst die Verbrennung von Brennstoffen im verarbeitenden Gewerbe und in der Bauwirtschaft, Industrieprozesse und Produktverwendung sowie CO₂-Transport und -Lagerung [16]. Der Sektor „Gebäude“ umfasst dagegen lediglich Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen zur Wärmeerzeugung für den Betrieb von Bauwerken [16].

Im Jahr 2014 betrugen nach einer Veröffentlichung des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt-, und Raumforschung die direkten Emissionen der Bauwirtschaft (aus Bauprozessen) und die direkten und vorgelagerten Emissionen ihrer Zulieferer (Baustoffindustrie und weitere) im Inland ca. 65 Mio. t CO₂-Äq. Materialzulieferungen aus dem Ausland brachten weitere 35 Mio. t CO₂-Äq. mit sich [17].

Ausgehend von den Emissionswerten 2014 [18] mit ca. 891 Mio. t CO₂-Äq. betrug im Vergleichsjahr der Anteil für die Errichtung bzw. Modernisierung von Bauwerken ca. 11 %. Unter der Annahme unveränderter Verhältnisse resultiert für das Betrachtungsjahr 2021 aus der deutschen Gesamtemission von 760 Mio. t CO₂-Äq. eine Emissionsmenge von 84 Mio. t CO₂-Äq. für die deutsche Bauindustrie (siehe **Abbildung 2-3**).

Eine weitere Aufschlüsselung hinsichtlich einzelner Fachdisziplinen liegt bislang nicht vor. Nachfolgend wird deshalb versucht, ausgehend von den Umsatzzahlen für den Untertagebau, eine Abschätzung der Relevanz an den gesamten THG-Emissionen abzuleiten.

Laut Statistischem Bundesamt betrug im Jahr 2021 der Gesamtumsatz im Bauhauptgewerbe ca. 147,6 Mrd. EUR [19] [20]. Der Bereich Brücken- und Tunnelbau setzte dabei rund 2,2 Mrd. EUR um, was einem Anteil von 1,5 % entspricht [20]. Unter der Annahme, dass die beiden Bereiche in etwa ein gleiches Umsatzvolumen abbilden, liegt der Anteil des Untertagebaus bei ca. 0,75 % am Gesamtumsatz des Bauhauptgewerbes.

Aufgrund der aufwendigeren Bauweise gegenüber obertägigen Bauten wird an dieser Stelle ein Anteil von 1,0 % der Untertagebauwerken an den THG-Emissionen der Bauwirtschaft angesetzt.

Ausgehend von dieser Kenngröße und unter Ansatz einer gleichmäßigen CO₂-Emission über alle Sparten würde der Untertagebau ca. 0,8 Mio. CO₂-Äq. bzw. ca. 0,1 % zum Gesamtausstoß beitragen (**Abbildung 2-3**).

Als Verifizierung der Herleitung des Anteils für Untertagebauten an den Gesamtemissionen möge die nachfolgende Vergleichsbetrachtung dienen:

Verschiedene Treibhausgasbilanzierungen von deutschen Tunnelbauten zeigen je nach Größe und Bauart des Tunnels mittlere Treibhausgasemissionen von rund 10.000 t bis 30.000 t pro erstellten Tunnelkilometer auf (**Abbildung 2-4**).

Gemäß der STUVA Tunnelbaustatistik [21] wurden im Mittel über die letzten 20 Jahre (2003 bis 2023) rund 23 km Tunnelröhren pro Jahr erstellt. Legt man einen vorsichtig geschätzten Emissionswert von 30.000 t CO₂-Äq./km Tunnelröhre zugrunde, ergibt sich aus dieser Betrachtung ein jährlicher THG-Ausstoß für den Bau deutscher Tunnel von 690.000 t CO₂-Äq., welcher von der Größenordnung her relativ gut mit der vorher hergeleiteten Zahl von 800.000 t CO₂-Äq. pro Jahr übereinstimmt.

Auf Basis der vorherigen Bestimmung der Kenngrößen zeigt sich, dass der Einfluss des Untertagebaus am gesamten THG-Haushalt sehr begrenzt ist (**Abbildung 2-3**).

Ungeachtet dessen muss und wird der Untertagebau die Herausforderung zur Reduzierung annehmen und seinen Anteil an Treibhausgasen gemäß der nationalen Klimazielsetzung so weit wie möglich eliminieren.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass der Haupttreiber der THG-Emissionen im Untertagebau der im Beton enthaltene Zement ist (vgl. Teil 2, Kap. 5). Dazu kommen Emissionen durch weitere Materialien (z. B.

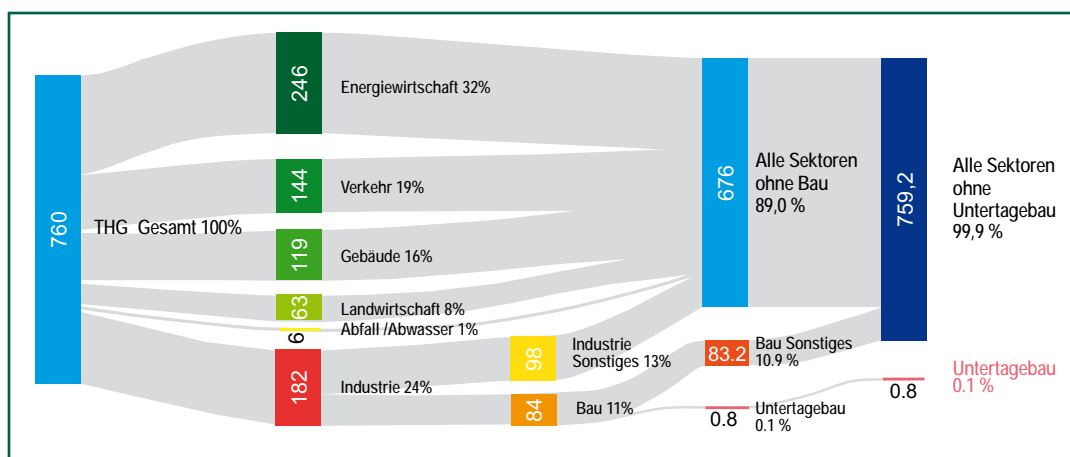


Abbildung 2-3
Anteil THG-Emissionen Untertagebau an Gesamtemissionen in Deutschland für das Jahr 2021 in Mio. t CO₂-Äq. bzw. %

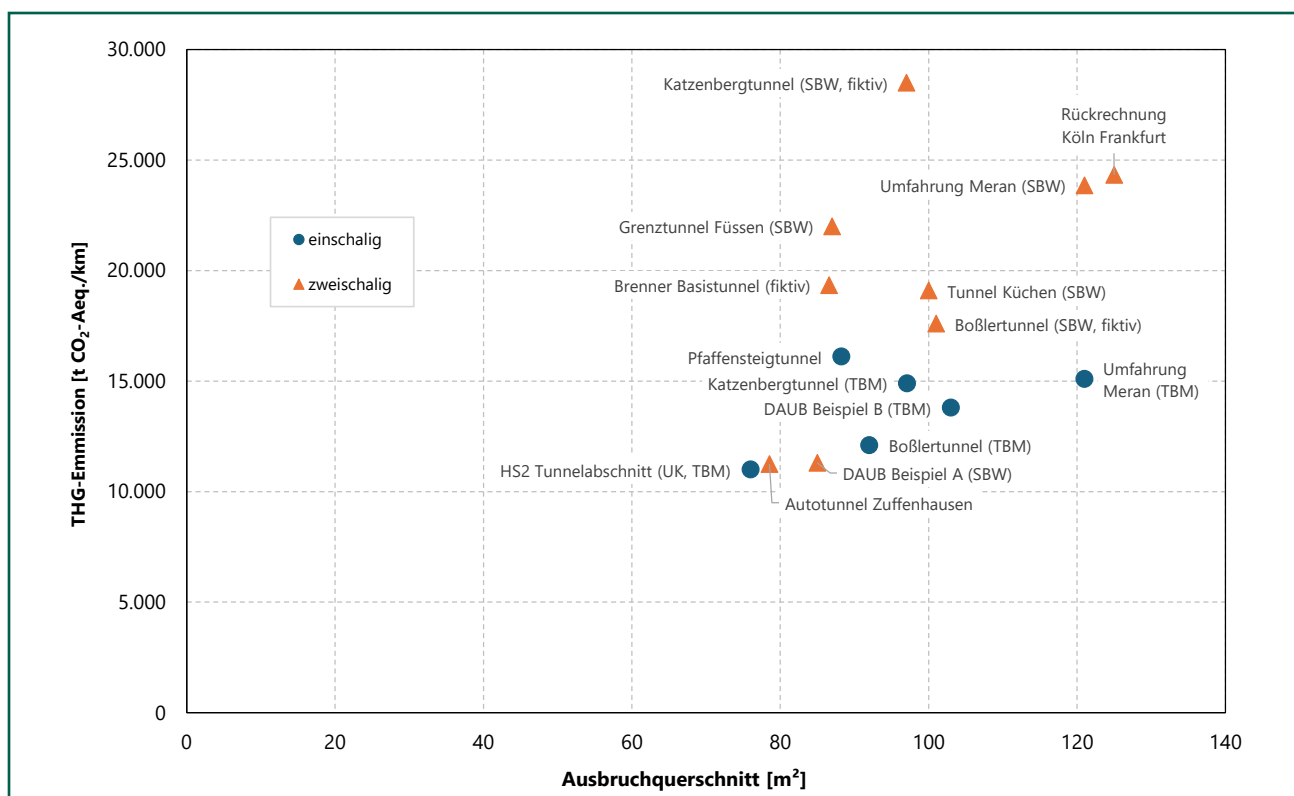


Abbildung 2-4 Anteil THG-Emissionen Untertagebau an Gesamtemissionen in Deutschland für das Jahr 2021 in Mio. t CO₂-Äq. bzw. % ; Hinweis: die Datenpunkte der einzelnen Projekte sind nicht nach einer einheitlichen Methode ermittelt worden

Stahl, Sprengstoffe). Ein weiterer Anteil an CO₂-Emissionen fällt aus dem Ausbruch des Tunnelprofils an, insbesondere in Abhängigkeit der Vortriebsmethode und der dazu eingesetzten Energiequellen sowie der notwendigen Transportdistanzen und Transportmittel zur Verwendung bzw. Deponierung des Ausbruchmaterials.

Aktuell werden sowohl in der Baustoff- als auch in der Baugeräteindustrie erhebliche Anstrengungen im Hinblick auf die Erfüllung der Klimaziele unternommen. So hat die deutsche Zementindustrie ein Szenario entwickelt, wie sie bis 2050 klimaneutral sein kann [22].

Da aus chemischen Gründen der CO₂-Ausstoß insbesondere bei der Produktion von Zement nicht vollkommen auf null reduziert werden kann, muss der verbleibende Restausstoß durch geeignete technische Maßnahmen kompensiert werden. Dazu stehen die Techniken zur Wiederverwendung (Carbon Capture and Utilisation, CCU) zur Verfügung und zur Speicherung des CO₂ (Carbon Capture and Storage, CCS). Der lange Zeit vorhandene politische Widerstand gegen die Anwendung dieser Technologien, insbesondere von CCS, scheint mittlerweile gefallen zu sein [23]. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, dass die Klimaneutralität beim Bau von Untertagebauten erreicht werden kann.

Dabei gilt es zu berücksichtigen, dass in der Betriebsphase die Untertagebauten einen positiven Bei-

trag zur Absenkung des Treibhausgasausstoßes in den Sektoren Verkehr und Stromerzeugung leisten können.

Viele Untertagebauten benötigen kaum Energie für den Betrieb. Einzig bei untertägigen Bahnhöfen und bei Straßentunneln sowie unterirdischen Produktionsanlagen bedarf es Energie für die Beleuchtung und die Lüftung. Diese Anlagen werden elektrisch betrieben, so dass die Treibhausgasbilanz von der Art der Stromproduktion abhängt.

Trotz des geringen Anteils von 0,1 % (Stand 2021) an den deutschen Treibhausgasemissionen ist auch der Untertagebau angehalten, die Klimaneutralität gemäß der Vorgaben des KSG zu erreichen.

Dazu bedarf es innovativer Entwicklungen bei der Herstellung von Baumaterialien und in den baubetrieblichen Prozessen sowie einer Strategie zur Nutzung und Speicherung des aus chemischen Gründen unvermeidlichen Restausstoßes an Treibhausgasen.

Um die Klimaschutzziele beim Herstellungsprozess des Untertagebauwerks zu erreichen, muss der Klimaschutz spätestens in der Vergabe berücksichtigt werden. Als wesentliches, politisch motiviertes Steuerungsinstrument steht hier die monetäre Wertung der

Klimafolgekosten mittels eines CO₂-Schattenpreises zur Verfügung.

Dabei werden die gesamten CO₂-Emissionen der angebotenen Leistung mit einem vom Auftraggeber einheitlich definierten und transparent gemachten CO₂-Preis bewertet. Die so ermittelten Klimafolgekosten bilden einen sogenannten CO₂-Schattenpreis. Für die Wertung werden Angebotspreis und Schattenpreis der Klimafolgen addiert und bilden gemeinsam die Wertungssumme. Es ist zu betonen, dass der CO₂-Schattenpreis nur für die Zwecke der Angebotswertung fiktiv auf den Angebotspreis aufgeschlagen wird. Der Bieter mit der niedrigsten Wertungssumme erhält den Zuschlag.

Wettbewerb entsteht dadurch, dass Bieter die Möglichkeit erhalten, das in der Ökobilanz kalkulierte Treibhauspotenzial zu reduzieren, beispielsweise durch den Einsatz CO₂-optimierter Materialien, Konstruktionsweisen, Logistikprozesse oder Baumaschinen. Hierzu erhalten die Bieter die Möglichkeit, in ihrem Angebot das von ihnen beeinflussbare Treibhauspotenzial ihrer Leistung abweichend von den Werten in der Ökobilanz des Auftraggebers in CO₂ auszuweisen. Hierdurch können sie die CO₂-Menge ihrer Leistung verringern, den CO₂-Schattenpreis reduzieren und durch ihren Beitrag zum Klimaschutz einen Wertungsvorteil erreichen. Die Berücksichtigung des CO₂-Schattenpreises in der Angebotswertung ist in Deutschland vergaberechtlich zulässig. Grundsätzlich muss der Zuschlag auf das wirtschaftlichste Angebot erteilt werden.

Den "richtigen" CO₂-Preis gibt es allerdings nicht, die Spanne derzeit genutzter Modelle bewegt sich zwischen 30 [33] und 809 Euro [34] pro Tonne. Wenn der gewählte Preis hoch genug ist, sind auch zusätzliche Kosten für die bessere Erreichung der Klimaziele in der Wertungssumme kompensierbar. Diese zusätzlichen Kosten fallen dann mit der Zuschlagserteilung auch real an, stellen aber aus Sicht der öffentlichen Hand eine nachhaltige Investition dar.

Die Berücksichtigung eines CO₂-Schattenpreises für die Angebotswertung ist ein international etabliertes Steuerungsinstrument. Das Schattenpreismodell ist Standard in Norwegen und in den Niederlanden. In Österreich wertet die ASFINAG die Ökobilanz von Asphalt und Stahl [35]. Die Herausforderung besteht in der fachkundigen Prüfung der mit dem Angebot ausgewiesenen CO₂-Schattenpreise.

2.3 Natürliche Ressourcen

Während der Anteil des Untertagebaus in der CO₂-Bilanz Deutschlands in der Gesamtbetrachtung gering ist, ergeben sich beim Thema des Schutzes der natürlichen Ressourcen und der Einführung der Kreislaufwirtschaft andere Größenordnungen.

Da jegliches Ausbruchmaterial, das die Baustelle verlässt, aufgrund gesetzlicher Vorgaben derzeit als Abfall deklariert werden muss, nimmt das Bauwesen bezüglich der Abfallthematik eine Schlüsselrolle ein und steuert gemäß der Auswertungen des statistischen Bundesamts [24] im Jahr 2022 in Deutschland 54 % (= 216 Mio. t) zur Gesamttonnage des Bruttoabfalls (= 399 Mio. t) bei (**Abbildung 2-5**).

So betrug 2020 der Anteil der im Untertagebau in hohem Maße anfallenden Kategorie „Boden, Steine und Baggergut“ etwa 122 Mio. t. Der Untertagebau verursacht ca. 3 % dieser Menge. In der Kategorie „Boden, Steine und Baggergut“ werden bereits heute bis zu 85 % des Materials aufbereitet oder wiederverwendet [24]. Trotzdem zählt die Gesamtmenge rechtlich gesehen zu den Abfällen.

Die Abfallvermeidung und das Wiedereinbringen der Bauabfälle in die Kreislaufwirtschaft sind, trotz der heute schon relativ hohen Wiederverwertungsquote beim Ausbruchmaterial, wichtige Gebote für die gesamte Bauwirtschaft und den Untertagebau im Speziellen. Der DAUB hat deshalb im Jahr 2024 die Empfehlungen zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial veröffentlicht [3]. Durch geeignete Maßnahmen soll die Wiederverwertung zur Baustoffgewinnung erhöht werden, um z. B. natürlich vorkommende Kies, Sand- und Tonvorkommen und die zugehörigen Ökosysteme zu schonen.

Gemäß aktueller gesetzlicher Grundlagen wird Tunnelausbruchmaterial – sofern es nicht auf der Baustelle verwertet wird – als Abfall angesehen.

Mit seinen Empfehlungen zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial (2024) zeigt der DAUB Lösungsansätze auf, wie die Verwertungsquote von Tunnelausbruchmaterial gesteigert und damit die Kreislaufwirtschaft gefördert werden kann.

2.4 Biodiversität

Die Vereinten Nationen bezeichnen die Vielfalt aller lebenden Organismen, Lebensräume und Ökosysteme auf dem Land, im Süßwasser, in den Ozeanen sowie in der Luft als Biodiversität (UN1992 - CBD) [25]. Der Begriff Biodiversität beinhaltet dabei:

- die Vielfalt unterschiedlicher Arten, auch innerhalb einer Art (taxonomische Diversität)
- die genetische Vielfalt innerhalb einzelner Arten sowie die Diversität aller Organismen eines Lebensraums (genetische Diversität)
- die Vielfalt an Biotopen und Ökosystemen sowie an Ökosystemfunktionen wie Bestäubung und Samenverbreitung (ökologische und funktionale Diversität)

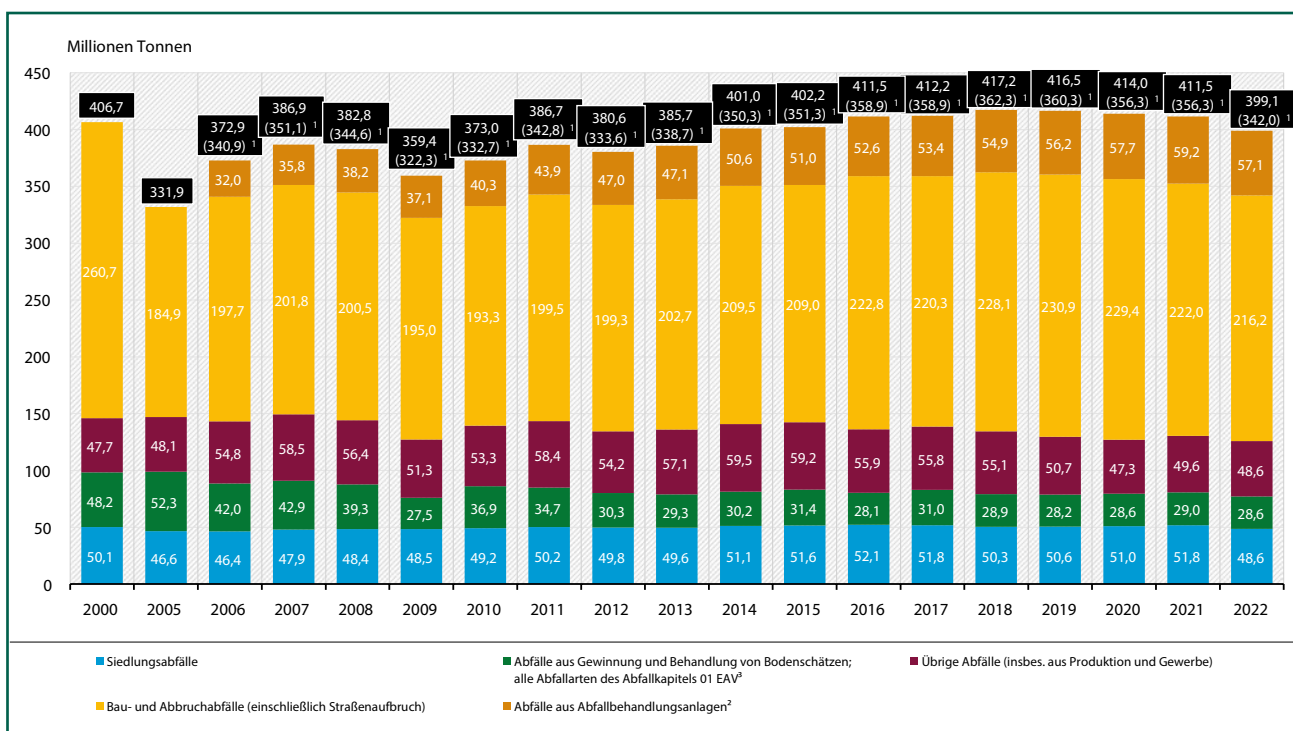


Abbildung 2-5 Abfallaufkommen in Deutschland 2000 – 2022 [24]

- die Vielfalt an Verhaltensweisen von Tieren (kulturelle Vielfalt).

Im Verlauf der letzten Jahre wurde das öffentliche Bewusstsein gestärkt, dass alle Tiere und Pflanzen eine wichtige Funktion im Ökosystem Erde haben. Ohne sie könnte die Menschheit auf der Erde letztlich nicht existieren. Die Biodiversität liefert Nahrung, stellt Wirkstoffe für Arzneien bereit, dient der Erholung und spielt eine wichtige Rolle in der Klimaregulation. Artenreiche Wälder und Wiesen können mehr Kohlenstoff aufnehmen und so der Atmosphäre das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid entziehen. Unterschiedliche Arten besetzen außerdem unterschiedliche Nischen im Ökosystem. Fehlen Arten, werden Ökokreisläufe gestört. Wenn zum Beispiel Insektenarten aussterben, wirkt sich das sowohl auf Vögel aus, die sich von diesen Insekten ernähren, als auch auf die Bestäubung von Pflanzen und damit auf die Ernte der Menschen. Der Rückgang der Biodiversität ist letztendlich somit auch eine Bedrohung für unsere Art.

Derzeit nimmt die biologische Vielfalt innerhalb und zwischen Ökosystemen schneller ab als zu jedem anderen Zeitpunkt in der Geschichte der Menschheit. Dieser dramatische Rückgang wird aktuell vielerorts noch nicht als kurzfristig wichtiges Problem bewertet, für die mittelfristigen Folgen wird die Wichtigkeit des Problems jedoch erkannt [26].

Die Abnahme der Biodiversität betrifft auch Deutschland. Ein Indikator dafür ist, dass rund ein

Drittel aller Tier- und Pflanzenarten in Deutschland als gefährdet gilt (Abbildung 2-6).

Die weltweiten Bedrohungen für die Tier- und Pflanzenarten sind vielfältig und meist menschengemacht. Lebensraumverluste durch sich immer weiter ausdehnende Landwirtschaft, Bergbau/Tagebau, Städte, Verkehrswege oder Übernutzung der natürlichen Ressourcen wie Überfischung und Wilderei, aber auch die Erderwärmung, Umweltverschmutzung sowie eingeschleppte, invasive Arten gefährden die ursprüngliche Artenvielfalt. Die einzelnen Mechanismen verstärken sich dabei noch gegenseitig.

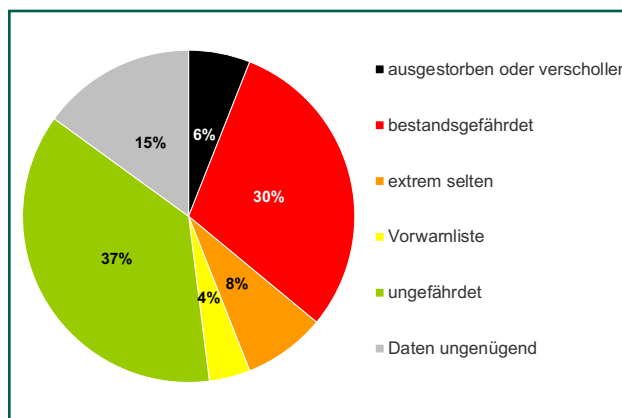


Abbildung 2-6 Gefährdungssituation von Tieren, Pflanzen und Pilzen in Deutschland, die in den Roten Listen ab 2009 bewertet wurden [27]

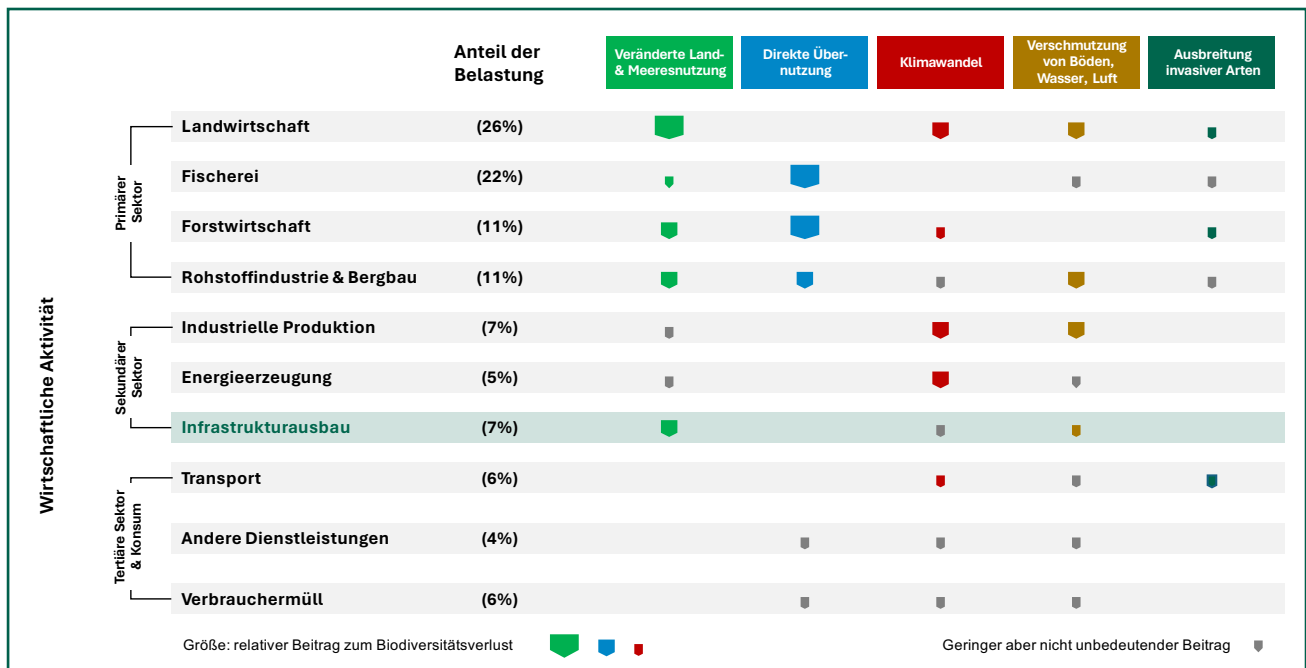


Abbildung 2-7 Wirtschaftliche Aktivitäten und ihr Beitrag zu den Belastungen für die Biodiversität (basierend auf [29])

In Deutschland freilebende Tier- und Pflanzenarten werden vor allem durch folgende Ursachen bedroht (vgl. [28]):

- Zerstörung, Zerschneidung und Flächenverluste natürlicher Lebensräume
- Übernutzung
- Klimaveränderung
- Verschmutzung

- Verdrängung einheimischer Arten durch invasive Arten

Der Infrastrukturbau ist gemäß dem Bericht „Wirtschaften im Einklang mit der Natur – Handlungswege zur Sicherung der Biodiversität“ [29] für ca. 7 % der Beeinträchtigung der Biodiversität verantwortlich (**Abbildung 2-7**), welche vor allem durch die Ursache „Zerstörung, Zerschneidung und Flächenverluste“ begründet sind.

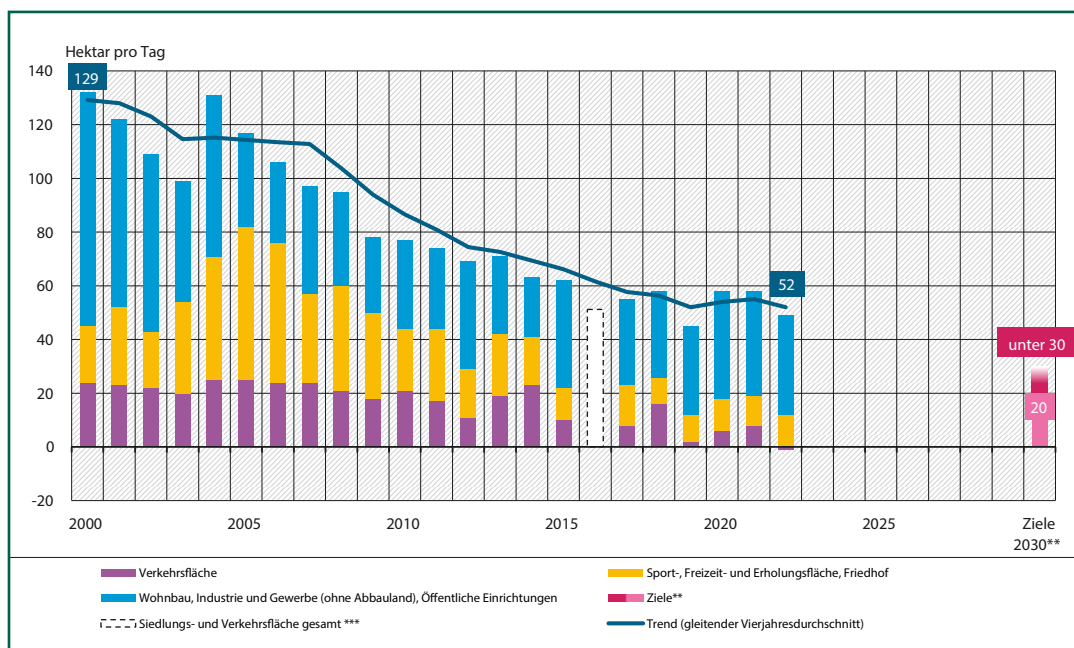


Abbildung 2-8 Flächenverbrauch in Deutschland [31]

Der Flächenverlust ist in Deutschland zwar abnehmend, betrug aber im Jahr 2021 immer noch 55 Hektar pro Tag, was dem Verbrauch von ca. 78 Fußballfeldern pro Tag entspricht (**Abbildung 2-8**). Mit dem Verlust dieser Flächen einher geht die Verdrängung der Tier- und Pflanzenwelt auf diesen Flächen, d. h. eine Beeinträchtigung der Biodiversität. Die Verkehrsflächen sind aktuell im geringsten Ausmaß an den Flächenverlusten beteiligt.

Die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie sieht vor, den täglichen Flächenverlust bis 2030 auf 30 Hektar pro Tag zu reduzieren, um der Ressourcenstrategie

der Europäischen Union und dem Klimaschutzplan der Bundesregierung folgend bis 2050 den Übergang zur Flächenkreislaufwirtschaft (Netto-Null-Ziel) zu schaffen [30]. Weitere Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität werden in **Kapitel 4.5.3** diskutiert.

Die untertägige Bauweise weist den Vorteil auf, dass sie einen äußerst geringen Flächenbedarf aufweist und dass sie die Ökosysteme unterfährt und nicht zerschneidet (**Abbildung 2-9**). Werden zudem übertägige Verkehrsflächen nach untertage verlegt, besteht die Chance, zerstörte Flächen wieder zu rekultivieren und Zerschneidungseffekte zu eliminieren,

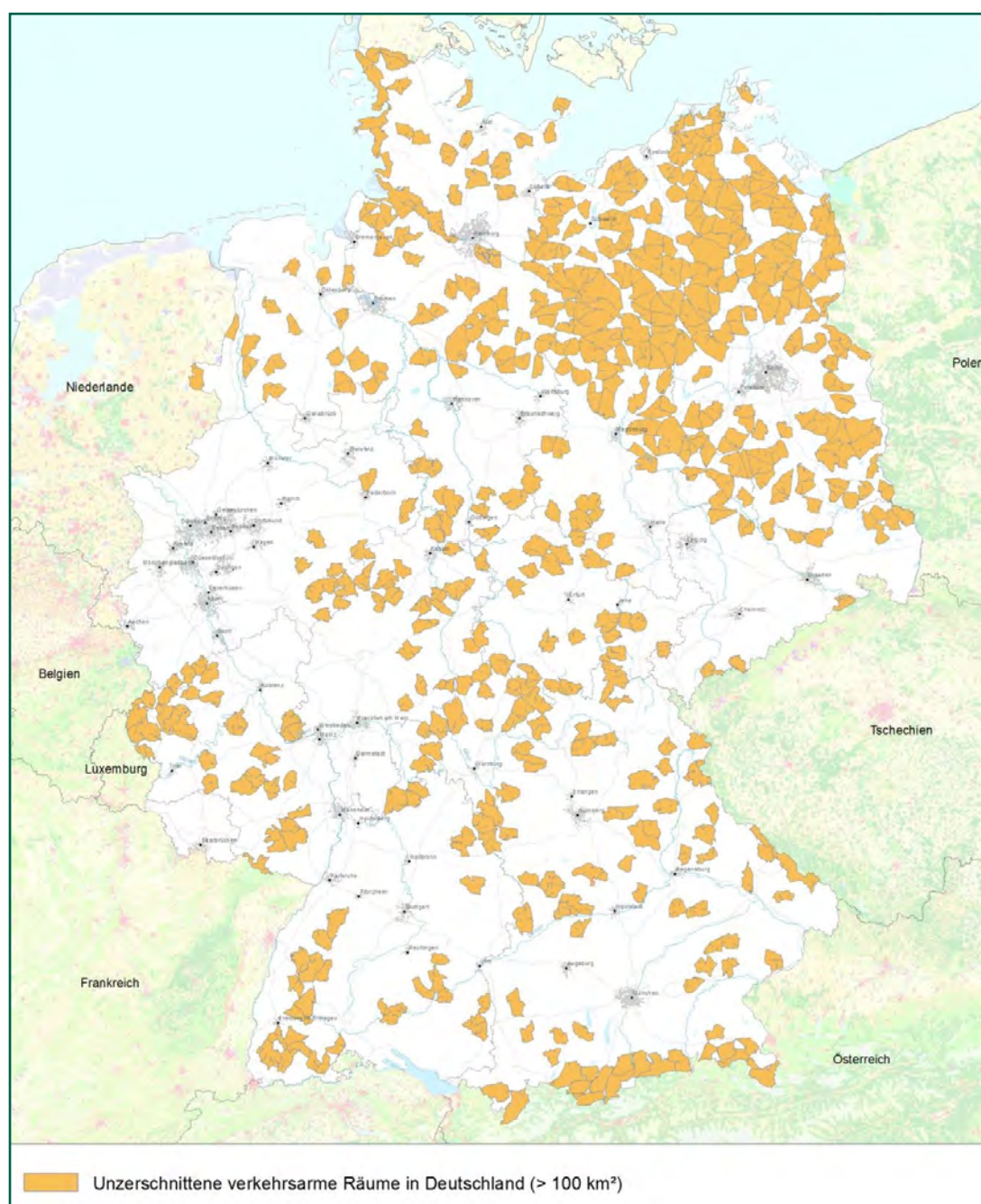


Abbildung 2-9
Unzerschnittene verkehrsarme Räume in Deutschland [31]

womit ein positiver Effekt bezüglich der Biodiversität, aber auch der sozialen Nachhaltigkeit bewirkt wird.

Zusätzlich werden mit dem anfallenden Ausbruchmaterial oft Renaturierungen von Abbaugeländen und Geländemodellierungen vorgenommen, was zu wenig intensiv genutzten Flächen führt, welche einen positiven Beitrag zum Erhalt und zur Verbesserung der Biodiversität leisten.

Untertagebauten erfüllen per se viele der zuvor aufgeführten Nachhaltigkeitsziele, da z. B. durch Verlagerungen von Infrastrukturbauten in den Untergrund Flächen für andere Nutzungen geschaffen und Beeinträchtigungen von Mensch und Natur vermieden werden.

Mit geeigneten Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen auf Deponieflächen des Ausbruchmaterials können nachweisbare Beiträge zum Erhalt und zur Förderung der Artenvielfalt geschaffen werden.

3 Beiträge der Untertagebauten zur Nachhaltigkeit

3.1 Ökologie

3.1.1 Ökologische Aspekte – innerstädtisch

Vor dem Hintergrund einer paritätischen Betrachtung aller drei Säulen (Ökologie, Ökonomie, Soziales) und mit Blick auf die Reduktion von potenziell schädigenden Einflüssen verkehrlicher Infrastruktur, ist der Beitrag von Untertagebauwerken zur Steigerung der Nachhaltigkeit in Innenstädten erheblich. Erweitert man den Blick und betrachtet projektbezogen mehr als nur die Bilanzierung von THG, so treten substantielle weitere Effekte zu Tage, die in seriösen Bilanzierungen der Nachhaltigkeit einer Maßnahme zu berücksichtigen sind.

Durch die Verlegung von Verkehrswegen unter die Oberfläche können beispielsweise bislang versiegelte Flächen zur Renaturierung und Versickerung genutzt werden. Durch einen geordneteren Verkehrsfluss werden Staus und damit Reisezeiten verkürzt, was neben den THG auch sonstige Emissionen wie Feinstäube, Lärm oder Stickoxide reduziert. Durch viele nachhaltige Maßnahmen, wie z. B. den Bau von Regenwasserrigolen in der Straßenmitte, den Einbau von zusätzlichen Baumrigolen oder die Bepflanzung von Teilflächen mit Mini-Parks oder Tiny-Forrests, können urbane Regionen zu einer sogenannten Schwammstadt ausgebildet werden.

Dabei ist der Platz in engen Innenstadtstraßen begrenzt bzw. durch die vorhandene Bebauung und Infrastruktur festgelegt und geprägt. Wenn auf der

Straße mehr Infrastruktur angesiedelt werden soll (z. B. Radwege und Schwammstadt), muss etwas anderes entfallen oder in Hochlage oder Tieflage (z. B. als unterirdische Stadtbahn) umgelegt werden. Der Entfall des Individualverkehrs ist nicht völlig möglich, da zur Daseinsvorsorge Rettungsverkehre, Personen- und Güterverkehr, Abfallentsorgung etc. auf mindestens einer Fahrspur erhalten bleiben müssen. Generell aber gilt, dass die Verlegung des Verkehrs nach untertage viele Vorteile für die betroffenen Kommunen bringt und zur Steigerung der Lebensqualität und der Nachhaltigkeit beiträgt.

Ausgewählte Kriterien und Indikatoren im Detail

Reduzierung von Luftschadstoffen

Der motorisierte Individualverkehr ist für einen großen Anteil der Luftschadstoffe jenseits reiner CO₂-Bilanzierungen verantwortlich. Durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe werden zusätzlich Stickoxide freigesetzt, aus denen sich wiederum bodennahes Ozon bildet. Neben diesen gasförmigen Luftschadstoffen sind zudem Feinstäube anzutreffen. Diese rühren nicht nur aus den Abgasen von Fahrzeugen her, sondern entstehen auch durch Bremsen- und Reifenabrieb. Aus diesem Grund werden sich in Zukunft verkehrsbedingte Feinstaubemissionen durch elektrisch oder mit grünen Kraftstoffen angetriebene Fahrzeuge zwar reduzieren, jedoch weiterhin anfallen. Dies gilt insbesondere im Falle von Überlastungen innerstädtischer Straßen, beispielsweise im Zuge des Berufsverkehrs, der schon heute in vielen Ballungszentren zu erheblichen staubedingten zusätzlichen Reisezeiten führt. Als Indikatoren für die Luftqualität können die Ozon-, NO_x-, CO_x- und Feinstaub-Konzentrationen herangezogen werden, die typischerweise an mehreren Messstellen in Großstädten registriert werden.

Verkehrstunnel können einen großen Beitrag leisten, dass der Verkehr sowohl innerorts als auch außerorts wesentlich flüssiger fließt. Sie helfen, nicht nur Staus zu vermeiden, sondern auch besonders emissionsträchtige Beschleunigungs- und Bremsvorgänge signifikant zu verringern. Dies kann etwa durch eine Verlegung von Straßen in den unterirdischen Raum geschehen oder durch eine Verlagerung des Verkehrsträgers zugunsten von unterirdischen ÖPNV-Systemen.

Beispielhaft wurde durch die Realisierung des Projektes „Boston Big Dig“ die Kohlenmonoxid-Belastung im Stadtzentrum von Boston nach Fertigstellung des Tunnels und Umlegung des Verkehrs um 12 % reduziert [36]. Direkt nach der Freigabe im Jahr 2003 sorgte zudem die neugeschaffene verkehrliche Situation für eine Reduktion der täglichen Verweildauer auf der Straße von im Schnitt ca. 60 %, trotz einer Zunahme des DTV um mehr als 23 % [37].

Erhöhung des Freiflächenanteils

Ein erheblicher Teil der städtischen Flächen wird maßgeblich durch Verkehrswege in Anspruch genommen oder beeinflusst. So sind viele Oberflächen durch Straßen oder Bahntrassen versiegelt oder Gebiete werden durch diese Verkehrswege zerschnitten, was die verfügbaren Freiflächen erheblich einschränkt.

Als Indikator zur Bewertung des Freiflächenanteils kann entweder der prozentuale Freiflächenanteil innerhalb eines Betrachtungsgebiets oder die absolute Größe einer zusammenhängenden Freifläche herangezogen werden. Beide können aus Flächennutzungsplänen abgeleitet werden.

Durch klug geplante Verkehrstunnel entstehen neue Freiflächen an der Oberfläche. Diese sollten nicht wieder durch andere Verkehrsflächen versiegelt, sondern möglichst mit grünen und blauen Infrastrukturen (also zusammenhängenden Grün- bzw. Wasserflächen) versehen werden. Auf diese Weise tragen sie zum Wohlbefinden der Menschen bei, fördern die urbane Biodiversität, verbessern das Stadtklima und stehen als Retentionsflächen bei Starkregen zur Verfügung. Beispielhafte Projekte in Düsseldorf, Hamburg etc. führen zu neuen Freiflächen, die ökologisch genutzt werden.

Eines der prominentesten Beispiele für die Schaffung von Freiflächen ist die Verlagerung des Verkehrs der M-30 in Madrid. Durch die Verlegung des Verkehrs in einen Tunnel entstand ein 6 Kilometer langer Park entlang des Manzanares Flusses, der verschiedene Freizeit- und Erholungsmöglichkeiten bietet. Das Projekt wurde in den Jahren 2006 bis 2012 realisiert, war eines der anspruchsvollsten Begrünungsprojekte in

Europa und erstreckt sich heute über eine Fläche von insgesamt etwa 120 Hektar. Der Park umfasst Grünflächen, Spielplätze, Sportanlagen, Wege für Fußgänger und Radfahrer sowie kulturelle Einrichtungen (**Abbildung 3-1**).

Ähnliche Effekte wurden auch bei dem Projekt „Boston Big Dig“ erreicht. Hier hat sich durch die Schaffung neuer Grünflächen die Biodiversität verbessert. Die ca. 11 Hektar freigewordene innerstädtische Fläche erstreckt sich auf 2,4 km Länge über mehrere Stadtteile und bleibt dauerhaft unbebaut („Rose Fitzgerald Kennedy Greenway“). Auf der Fläche wurden 5.000 Bäume und über 30.000 Büsche gepflanzt und sie bietet weiterhin Gärten, Rasenflächen und Baum-Alleen, sowie kulturelle und soziale Angebote und verschiedene Freizeitaktivitäten. Das Areal wird von der gemeinnützigen Greenway Conservancy betreut und ist ein Vorzeigebispiel für urbane Revitalisierung und nachhaltige Stadtentwicklung, Wasserwirtschaft und Mikroklima [38].

Wassermanagement

Durch die Verlagerung von oberirdischem Verkehr in Tunnellage wird es ermöglicht, Regenwasserrigolen in der Straßenmitte anzuordnen, um das Wasser von großen Regenereignissen und Starkregen in diesen Rigolen zurückzuhalten und zeitlich verzögert in einen Vorfluter, z. B. einen renaturierten Bachlauf, abzugeben. Das Regenwasser steht in den begrüneten Rigolen, versickert und verdunstet teilweise und verbessert dadurch das Mikroklima und reduziert die Aufheizung der Innenstädte im Sommer. Gleichzeitig sind die begrüneten Regenwasserrigolen auch Lebens-



Abbildung 3-1 Stadtbild von Madrid vor und nach der Tieflegung der Autobahn M-30 im Bereich der Segovia Brücke (Quelle: AETOS)

raum für Kleinstlebewesen, Insekten, Amphibien und Vögel und leisten damit einen Beitrag zur Biodiversität in der bebauten Innenstadt. Letztlich wird die Innenstadt durch diese grün-blaue Infrastruktur lebenswerter und gesünder für Anwohner und Gäste. Ein Beispiel für diese nachhaltige Lösung auf Hauptstraßen im Innenstadtbereich gibt es in Bochum (**Abbildung 3-2**).

3.1.2 Ökologische Aspekte – außerorts

Analog zu den positiven Effekten im innerstädtischen Raum lassen sich auch im nicht-urbanen Umfeld klare Vorteile unterirdischer Infrastrukturen identifizieren. Insbesondere bei der Umsetzung nationaler und internationaler Verkehrskorridore sowie im Zuge der Energiewende – etwa beim Bau von Stromtrassen oder Energieanlagen – kommen unterirdische Bauweisen zunehmend zum Einsatz.

Für eine nachhaltige und zukunftsfähige Infrastruktur des Handels-, Güter- und Personenfernverkehrs ist die leistungsfähige Schienenverbindung zwischen Metropolen und Ballungsräumen ein zentraler Bestandteil. Im Rahmen der Energiewende werden zudem neue Stromtrassen sowie Anlagen für Pumpspeicher- und Wasserkraftwerke errichtet. In all diesen Anwendungsfeldern ermöglichen unterirdische Bauweisen eine landschaftsschonende Trassenführung, insbesondere beim Unterqueren natürlicher Hindernisse wie Gebirgzüge und Hügellandschaften.

Beispiele hierfür sind die bereits in Betrieb befindlichen Gotthard- und Lötschberg-Basistunnel in der Schweiz, der im Bau befindliche Brennerbasistunnel zwischen Österreich und Italien sowie der geplante Erzgebirge-Basistunnel zwischen Deutschland und Tschechien.

Ein kritischer Aspekt unterirdischer Verkehrswege ist die Emissionskonzentration an den Tunnelportalen, die sich lokal auf die Umgebung auswirken kann.

Deshalb ist der Lage der Portale und der Entwicklung geeigneter Lüftungskonzepte im Planungsprozess besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Die gezielte Verlagerung dieser Infrastrukturbauten unter die Erde reduziert nicht nur Eingriffe in das Landschaftsbild, sondern auch Emissionen aus dem Betrieb oberirdischer Anlagen. So können zusammenhängende Ökosysteme und Schutzgebiete bewahrt oder neu geschaffen werden. Hochgeschwindigkeitsstrecken, die sensible Räume unterirdisch durchqueren, tragen zudem zur Reduktion des innerdeutschen Flugverkehrs bei – ein Beitrag zur ökologischen Transformation des Mobilitätssektors. Gleichzeitig stärkt dies die gesellschaftliche Akzeptanz für den Bau solcher zukunftsweisender Infrastrukturprojekte.

Ausgewählte Kriterien und Indikatoren im Detail

Flächenmanagement und urbaner Emissionsschutz

Ortsumfahrungen mit Tunneln sind ein Beispiel für eine besonders nachhaltige Straßeninfrastrukturmaßnahme mit positivem Effekt im Sinne des Emissionsschutzes für die Bürger. Die zur Querung der Ortschaften benötigten Straßen lassen sich als Umfahrung außerhalb der Ortschaften verlegen. Somit werden den Anwohnern die Zentren ihrer Dörfer und Städte fast verkehrsfrei wieder zurückgegeben, was neben der Reduktion von Feinstäuben und Stickoxiden im urbanen Umfeld auch die Lärmemission in erheblichem Ausmaß reduziert. Ungeachtet der topographischen Gegebenheiten kann es dabei zweckmäßig sein, die Umgehung in Tunnellage anzuordnen, um Freiflächen nicht zu zerschneiden [39].

Gleiches gilt, wenn weitere Wirtschaftsräume an das vorhandene Straßenverkehrsnetz angeschlossen werden sollen. Sind hierbei Gewässer zu queren, kann dies landschaftsschonend und ohne Beeinträchtigung der Schifffahrt in Tunnellage erfolgen. Beispiele



Abbildung 3-2 Begrünte Regenwasserrigole in der Hattinger Straße in Bochum nach Tieflegung der Straßenbahn; links vor und rechts nach Umsetzung (Quelle: Stadt Bochum, Pressestelle)

finden sich u. a. an der Elbe und der Weser in Norddeutschland.

Gestaltung und Realisierung der Energiewende

Eine zentrale Herausforderung der Energiewende liegt im Aufbau einer geeigneten Infrastruktur zur Speicherung und Verteilung erneuerbarer Energien. Hierfür sind unterirdische Kavernen, Tunnelanlagen für Pumpspeicherwerke sowie unterirdische Verteilnetze erforderlich.

Insbesondere für die Nutzung der Wasserkraft sind unterirdische Anlagen unverzichtbar – sowohl zur Energieerzeugung als auch zur Speicherung. Sie werden bewusst unterirdisch errichtet, um das Landschaftsbild zu erhalten. Selbst während der Bauphase erfolgt der Zugang meist über Tunnel, wodurch Eingriffe in die Oberfläche weitgehend minimiert werden.

Auch der Stromtransport über weite Distanzen – etwa von großflächigen Wind- und Solaranlagen zu den Verbrauchszentren – stellt hohe Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Bürgerakzeptanz. Medientunnel bieten hierfür eine nachhaltige Lösung: Sie ermöglichen eine landschaftsschonende Verlegung von Stromleitungen und werden insbesondere im Umfeld von Offshore-Windparks bereits in großem Umfang von Netzbetreibern realisiert. Darüber hinaus eignen sich diese Tunnelsysteme auch für die Integration von Gas-, Wasserstoff- und CO₂-Leitungen – ein weiterer Schritt in Richtung sektorübergreifender Energieinfrastruktur.

Tunnel und sonstige untertägige Anlagen tragen im urbanen wie auch überregionalem Bereich zur Verbesserung der Ökologie bei. Sie helfen Emissionen zu reduzieren, Habitate vor schädlichen Einflüssen zu schützen, erzeugen Verbesserungen beim Mikroklima, schaffen Freiflächen im urbanen Raum und sind als essenzielle Bauwerke der Infrastruktur im Zuge der Energiewende unverzichtbar.

3.2 Soziales

3.2.1 Soziale Aspekte – innerstädtisch

An der Oberfläche gibt es durch Untertagebauten viele deutlich spürbare Effekte für das gesellschaftliche und wirtschaftliche Leben in der Stadt: Verkehrsströme verlagern sich, nachhaltige Fußgänger- und Radverkehre entwickeln sich neu und besser und freiwerdende Verkehrsflächen können beispielsweise in Form von Grünanlagen an die Bevölkerung zurückgegeben werden. Fußgängerzonen haben einen positiven Einfluss auf Einzelhandel, Gastronomie, Unterhaltung usw. Wo Konfliktbereiche mit Straßenbahn, Individualverkehr, Fuß- und Radverkehr durch die Tunnelverkehre entfallen, reduzieren sich Verkehrsunfälle. Feuerwehr

und Rettungsfahrzeuge können zudem schneller und konfliktärmer ihr Ziel erreichen.

Dem Grunde nach ist dieses Prinzip bereits seit über 100 Jahren im urbanen Raum bekannt: Seit nunmehr 160 Jahren gehören U-Bahnen und unterirdische Stadtbahnen zur großstädtischen Verkehrsinfrastruktur und auch zum großstädtischen Leben. London Underground ist seit 1863 und die Berliner U-Bahn seit 1902 in Betrieb. In Deutschland gibt es insgesamt in 20 Großstädten U-Bahnen und unterirdische Stadtbahnsysteme. Im Jahr 2024 sind 663 U-Bahnhöfe und über 1.000 km U-Bahntunnel in Betrieb. Sie sind die Hauptschlagadern des ÖPNV bzw. sogar meistens des gesamten innerstädtischen Verkehrs. Die verkehrlichen Vorzüge der U- und Stadtbahnen sind evident: Die Leistungsfähigkeit und Kapazität einer U-Bahn sind höher als die einer Straßenbahn oder Buslinie. Die Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h einer U-Bahn und 70 km/h einer Straßenbahn in unterirdischen Strecken sind deutlich höher als die einer Straßenbahn oder eines Buses mit einer zulässigen Geschwindigkeit in der Stadt von 50 km/h und einer tatsächlichen Durchschnittsgeschwindigkeit von 25 km/h im Verkehrsfluss. Hierdurch verkürzen sich die Fahrzeiten deutlich.

Die Auswirkungen des schnellen und unabhängigen unterirdischen Verkehrsmittels erstrecken sich auf alle Bereiche des städtischen Lebens, insbesondere auch auf die sozialen Aspekte. Die erhöhte Mobilität und die Verkürzung von Wegen haben positive Auswirkungen auf alle Funktionen und Bereiche des Lebens: Wohnen, Arbeiten, Lernen, Einkaufen, Einzelhandel, Kultur, Unterhaltung, Erholung, Gesundheit und Soziales. Jeder Einzelne kann die Vorzüge auf dem Weg zur Arbeit, Schule, Universität, Geschäft, Bücherei, Kino, Theater, Krankenhaus, Kindertagesstätten, Altenheim etc. täglich nutzen und erleben.

Ausgewählte Kriterien und Indikatoren im Detail

Reduzierung von Reisezeiten, Verbesserung der Erreichbarkeit

Mobilität ist eine wesentliche Voraussetzung für die moderne Gesellschaft und eine prosperierende Wirtschaft. Damit verbunden ist ein steigendes Interesse der Gesellschaft, Reisezeiten zu reduzieren und damit ein zunehmender Bedarf an gutfunktionierender Infrastruktur.

Als Indikator zur Bewertung von Erreichbarkeit kann die Größe des Zielgebietes, das innerhalb einer bestimmten Zeitdauer (z. B. 10 Minuten) erreichbar ist, herangezogen werden. Derartige Erreichbarkeitskarten lassen sich auf der Basis von ÖPNV-Fahrplandaten ermitteln.

Verkehrstunnel können einen wesentlichen Beitrag leisten, die Erreichbarkeit von urbanen Gebieten zu verbessern bzw. die Reisezeiten zu verkürzen.

Es werden im Untergrund zusätzliche Verkehrswege geschaffen, die weitgehend unabhängig von Störeinflüssen (v. a. von anderen Verkehrsträgern und vom Wetter) sind und damit eine besonders hohe Beförderungskapazität aufweisen, wie man aus **Tabelle 1** gut erkennen kann. Durch die unterirdische Infrastruktur werden die Pendelzeiten erheblich verkürzt, was die Lebensqualität der Pendler verbessert und dazu führt, dass neue Wohn- und Geschäftsflächen entwickelt werden können, wie sich aktuell gut am Beispiel Cross-rail in London erkennen lässt.

Die Nachfrage nach innerstädtischer Mobilität steigt weiter: Bis zum Jahr 2050 soll laut einer Prognose aus dem Jahr 2018 die weltweite Nachfrage nach innerstädtischer Mobilität auf 48,4 Billionen Personenkilometer steigen; 2010 waren es noch 25,8 Billionen Personenkilometer [40].

Größere Metropolen wie London, Paris oder Berlin benötigen leistungsfähige untertägige Verkehrsinfrastrukturen. Weltweit haben 251 Metropolen ein gut funktionierendes U-Bahn- oder Stadtbahn-System (Stand 2025).

Tabelle 1 Mittelwerte realer Fahrgastzahlen bei verschiedenen öffentlichen Verkehrsmitteln in Deutschland (nach Erhebungen des VDV [41])

	Verkehrsmittel	Mittlere reale Fahrgastzahlen [Fahrgäste/Tag] ¹⁾
Bahn-Linienverkehr	S-Bahn	20.000 – 120.000
	U-Bahn	100.000 – 200.000
	Stadtbahn	20.000 – 100.000
	Straßenbahn	10.000 – 30.000
	Regionalbahn	2.000 – 5.000
Bus-Linienverkehr	Stadtbus in Verdichtung	2.000 – 15.000
	Regionalbus in Fläche	1.000 – 3.000
Bedarfsverkehr	Bedarfsbus (Richtungsband)	500 – 1.000
	Anruf-Sammel-taxi (Gebiet) ²⁾	40 – 100
	Bürgerbus (Gebiet) ²⁾	20 – 50

1) Es handelt sich nicht um Leistungsfähigkeiten, sondern um reale Werte pro Tag in beiden Richtungen für die Bedienungsgebiete bzw. Linien; in Einzelfällen sind somit Über- oder Unterschreitungen der Zahlen möglich

2) Einsatz meist nur zu bestimmten Tageszeiten

Erhöhung der Verkehrssicherheit

In den letzten Jahren hat sich die Sicherheit von Fahrzeugen immer weiter erhöht, sodass kontinuierlich weniger getötete und verletzte Fahrzeuginsassen zu verzeichnen sind. Jedoch kommt es immer noch vergleichsweise häufig zu tragischen Unfällen, bei denen Fußgänger oder Radfahrer durch Fahrzeuge geschädigt werden. Eine Ursache ist in der nicht ausreichenden Abtrennung der vulnerablen Verkehrsteilnehmer vom motorisierten Hauptverkehr zu sehen.

Als Indikator zur Bewertung der Verkehrssicherheit kann die Anzahl von Toten und Verletzten innerhalb einer gewissen Zeitspanne entlang der betrachteten Trasse herangezogen werden, die in polizeilichen Unfallstatistiken erfasst werden.

Verkehrstunnel vermeiden per se den Konflikt und schaffen zusätzlichen Freiraum an der Oberfläche, wenn Gleiskörper oder auch mehrspurige Straßen in den Untergrund verlagert werden. Diese Freiflächen können zum Beispiel dazu verwendet werden, eigenständige Radwege anzulegen und Sichtbeziehungen im Verkehrsraum zu verbessern, um so einen weiteren Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu leisten. Zudem lässt sich rein statistisch belegen, dass die Verunfallungshäufigkeit auf freien Strecken im Vergleich zu Tunneln spürbar größer ist [72] [73].

Erhöhung der Lebensqualität im Umfeld der Maßnahmen

Durch das Beräumen von verkehrlich genutzten Flächen können innerstädtisch Ruhezonen und verkehrsfreie Bereiche geschaffen werden, welche die Lebensqualität der Be- bzw. Anwohner substanziell erhöhen. Neben den schon vorgenannten ökologischen Effekten (beispielsweise Reduktion von Emissionen) werden derartige bauliche Maßnahmen auch im sozialen Gefüge der Innenstädten wirksam. Die bereits unter **Kapitel 3.1.1** unter „Erhöhung des Freiflächenanteils“ aufgeführten Beispiele führen auch unmittelbar zu einer Erhöhung der Lebensqualität im Umfeld der Maßnahmen.

3.2.2 Soziale Aspekte – außerorts

Durch die Verlagerung von Infrastrukturbauteilen unter die Erde werden Eingriffe in das Landschaftsbild vermieden und Naturschutzgebiete und Ökosysteme erhalten bzw. neu geschaffen. Diese Gebiete können zur Naherholung durch die Erschließung mit dem öffentlichen Personenverkehr ohne Probleme verkehrsgünstig erreicht werden und tragen so wesentlich zur Verbesserung der Lebensqualität der Bewohner der angrenzenden Städte und zur Förderung der Biodiversität bei.

Verkehrstunnel ermöglichen die Verlegung von Verkehrsströmen in den Untergrund und sorgen damit für eine substanzielle Verbesserung der Lebensqualität im urbanen Raum: Es werden neue Freiflächen geschaffen, die Erreichbarkeit und Mobilität wird in der Regel verbessert und Reisezeiten der Anwohner verringert. Dies erhöht das persönliche Wohlbefinden und die Akzeptanz spezifischer städtebaulicher Maßnahmen.

3.3 Ökonomie

3.3.1 Allgemeines

Während bei der Identifikation von sozialen und ökologischen Aspekten eine Unterscheidung zwischen urbanen Räumen und dem Umland sinnvoll ist, wirken sich ökonomische Aspekte entweder volkswirtschaftlich oder betriebswirtschaftlich aus. Daher wird im Folgenden nicht zwischen den Kategorien *innerstädtisch* und *außerorts* unterschieden, sondern es wird nach *volkswirtschaftlichem Nutzen, Lebensdauer und Langlebigkeit, Wartung und Instandhaltung* und *Verfügbarkeit* differenziert. Hierbei wird an dieser Stelle keine quantifizierte Aussage getroffen, sondern ein genereller Hinweis auf zu berücksichtigende Effekte formuliert. Diese sind projektspezifisch im Zuge einer Bewertung zu betrachten und auszuleuchten.

3.3.2 Volkswirtschaftlicher Nutzen

Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur können auf viele verschiedene Arten volkswirtschaftlichen Nutzen generieren, der zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt. Durch eine Verkürzung von Reise- und Transportwegen, beispielsweise durch die Unterquerung von Flussläufen oder Gebirgszügen, werden Lieferzeiten ressourcenschonend verkürzt. Hierdurch lassen sich Wirtschaftsstandorte fördern und ganze Regionen an größere Wirtschaftsregionen anschließen. Stellvertretend sei hier die Region Pirmasens benannt, welche durch die Inbetriebnahme der Schnellfahrstrecke Köln-Frankfurt eine Renaissance erfuhr. Die direkte und schnelle Verbindung nach Frankfurt ermöglicht vielen Arbeitnehmern aus der Region die Teilnahme am Arbeitsmarkt der Main-Metropole und schafft lokal substanziell erhöhte Einnahmen aus Einkommens- und Gewerbesteuern. Innerstädtisch sorgt die Verlagerung des Individualverkehrs auf den unterirdischen ÖPNV, neben den schon benannten ökologischen und sozialen Effekten, für eine Reduktion von Stauzeiten und somit für eine Verringerung der Verweildauer im Verkehr. Daraus resultieren Einsparungen im Kraftstoffverbrauch und eine höhere zeitliche Verfügbarkeit für die Verkehrsteilnehmer. In der Regel können unterirdische Schienenbahnen bei

Schneefällen, Sturm oder Starkregen weiterverkehren, wenn der Verkehr an der Oberfläche aufgrund der Witterungseinflüsse schon zum Erliegen gekommen ist. Hierdurch leisten diese Verkehrssysteme durch ihre hohe Verfügbarkeit einen wertvollen Beitrag zur Versorgungssicherheit im Nahverkehr.

3.3.3 Lebensdauer und Langlebigkeit

Mit den bestehenden Untertagebauten wurden wesentliche Grundpfeiler für eine florierende und resiliente Volkswirtschaft geschaffen: Sie stellen die Wasser- und Energieversorgung sicher, sie entlasten die Innenstädte vom Verkehr dank U-/S-Bahn-Systemen und unterirdischen Straßen, sie gewährleisten sichere Verkehrsverbindungen über lange Distanzen und in der Fläche und sie ermöglichen unterirdische Entsorgungssysteme wie z. B. Abwassersysteme.

Unterirdische Infrastrukturen werden in Deutschland auf eine hohe technische Lebensdauer von derzeit in der Regel 100 Jahren ausgelegt. Bauwerke im Bestand aller Verkehrsträger zeigen schon heute zum Teil deutlich höhere Lebenserwartungen als zunächst angenommen bzw. in Aussicht gestellt (**Abbildung 3-3**).

Vergleichbare Zahlen lassen sich auch bei anderen Verkehrsträgern – z. B. im Bereich von U-Bahn-Netzen der großen Metropolen – finden. Beispielsweise befanden sich bereits kurz nach Beginn des 20. Jahrhunderts rund 80 % des heute genutzten Netzes der Berliner U-Bahn im Betrieb. Damit weisen die Bauwerke eine substanzielle Überschreitung der avisierten Lebensdauer gemäß gültigen Vorschriften auf.

Erneuerungs- und Ertüchtigungskampagnen sorgen dafür, dass sie auch nach der avisierten Lebensdauer den aktuellen verkehrlichen, normativen und regulatorischen Anforderungen genügen und ihren Dienst während weiterer Jahrzehnte effizient erfüllen können.

Imposante Beispiele für die lange Lebensdauer von Untertageverkehrsbauwerken sind die ersten langen Eisenbahntunnel durch die Alpen (Mont Cenis Tunnel, 1871; Gotthard Eisenbahntunnel, 1882; Simplon, 1906), welche während weit über hundert Jahren wesentliche Verkehrslasten getragen haben bzw. heute noch tragen.

Es finden sich noch ältere Tunnelbauten, welche bis heute in Betrieb sind, wie das 1708 eröffnete Urner Loch (Straßentunnel, Schweiz), der Hauenstein-Scheiteltunnel (1858, Bahntunnel, Schweiz) oder der Tunnel ferroviaire du Lioran (1868, Frankreich).

3.3.4 Wartungs- und Instandhaltungsaufwand

Tunnel werden in Deutschland zu den Ingenieurbauwerken im Sinne der DIN 1076 gezählt und gemäß den Regeln der jeweiligen Verkehrsträger geplant, gebaut und unterhalten.

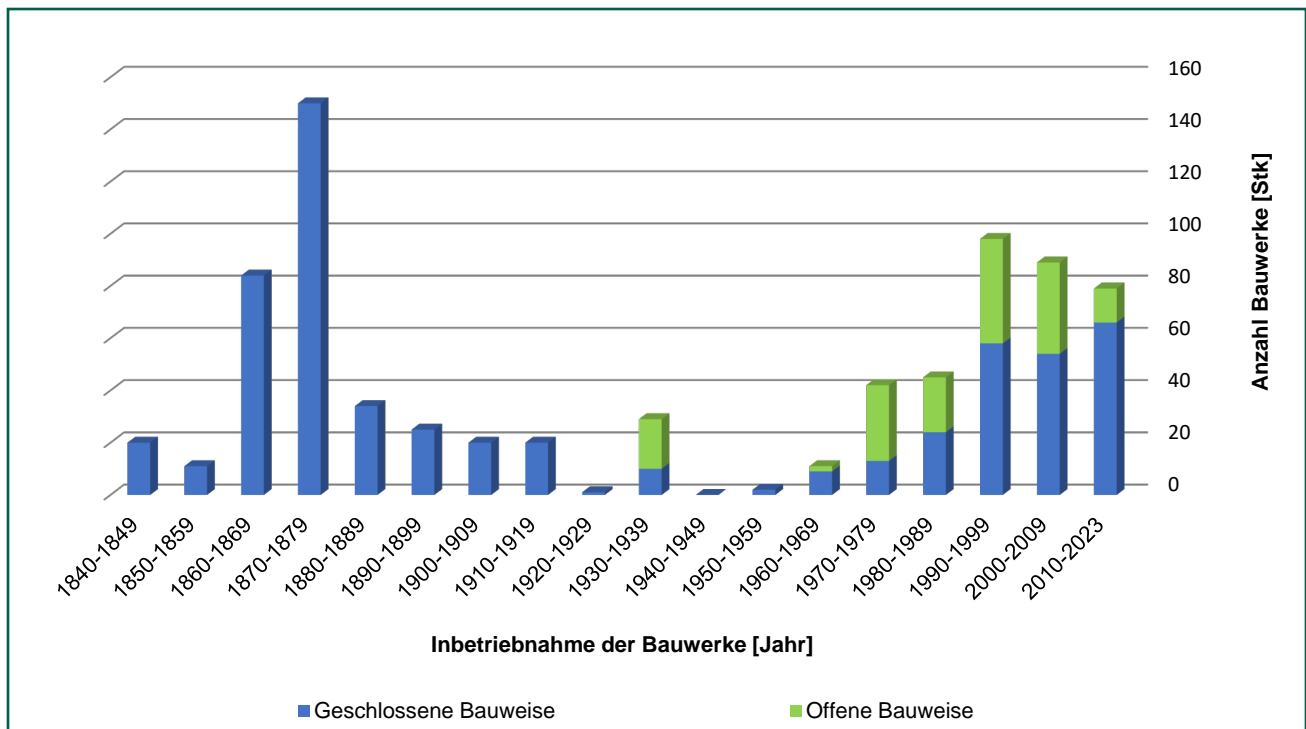


Abbildung 3-3 Altersstruktur der Eisenbahntunnel der DB, Stand Dez. 2022 [42]

Wie auch alle anderen Bauwerkstypen unterliegen untertägige Bauten über ihre Lebensdauer hinweg Effekten der Degradation: Einflüsse aus dem Umfeld des Bauwerks üben schädigende Wirkungen auf Bauteile der Tunnel und Brücken aus, beispielsweise in Form von Chloriden aus Tausalzen. Diese dringen in die Betonstruktur ein und schädigen mitunter die Bewehrung erheblich. Im Vergleich zu Brücken zeigen Tunnel aber signifikante Unterschiede im Betrieb, die sich direkt auf die Lebenszykluskosten der Bauwerke auswirken:

- Brücken werden durch die veränderlichen Verkehrsströme und hier vor allem durch die Zunahme des Schwerlastverkehrs in Mitleidenschaft gezogen. Auch eine Elektrifizierung des Individualverkehrs wird künftig aufgrund der steigenden Gewichte der Fahrzeuge voraussichtlich zu einer weiteren Anhebung des Risikoprofils beitragen. Tunnel hingegen sind hiervon völlig unbeeinflusst, da der Verkehr bei ihnen nicht direkt auf die Tragstruktur einwirkt. Aus diesem Grund können auch heute beispielsweise ICE durch die teilweise über 100 Jahre alten Tunnelbauwerke der alten Rheintrasse fahren. Ein Bauwerksverlust – wie derzeit bei der Rahmedetalbrücke auf der A 45 bei Lüdenscheid zu beobachten –, ist daher für Tunnel kein relevantes Szenario.

- Tunnel müssen hingegen im Sinne des Nutzerschutzes mit betriebstechnischen Einrichtungen ausgestattet werden, die im Ereignisfall eine Selbstrettung der Nutzer gewährleisten und die Fremdrettung unterstützen. Diese Einrichtungen müssen ebenfalls gewartet und ggfs. ausgetauscht werden, wenn die Komponenten des Systems das Ende ihrer Lebensdauer erreichen.

Der Wartungsaufwand bei Tunnelanlagen ist demnach in erster Linie unabhängig von der Intensität der verkehrlichen Nutzung und hinsichtlich der Aufwände und der so entstehenden Kosten weitestgehend kalkulierbar. Dies unterscheidet Tunnel wesentlich von Brückenbauwerken, bei denen durch Alterung und wachsende Verkehrsbelastung in der Regel eine progressive Schadensentwicklung zu verzeichnen ist.

Nicht nur in Deutschland, sondern auch weltweit finden sich Untertagebauten mit Nutzungsdauern von mehr als 100 Jahren und Beispiele, wie diese durch Ertüchtigungskampagnen verlängert werden können. Untertagebauten haben positive ökonomische Effekte und zugleich einen geringen Wartungsaufwand. Untertagebauten gehören daher im Sinne der langfristigen Nutzung zu den nachhaltigsten Ingenieurbauwerken.

4 Wege zum nachhaltigen Untertagebau

4.1 Voraussetzungen und Rahmenbedingungen

Das Erreichen von Nachhaltigkeitszielen ist kein Selbstläufer. So bestand bei Entscheidungen, die in der Vergangenheit getroffen wurden, oft die Überzeugung, zukunftsichernde Abwägungen zugrunde gelegt zu haben. Bei genauerem Hinsehen erkennt man jedoch ebenso oft, dass nur ein kleiner Ausschnitt der heute anerkannten Nachhaltigkeitsziele einbezogen wurde. Daher ist vor allem ein Umdenken erforderlich. Das schließt ein, dass eine Bereitschaft zur Verhaltensänderung bestehen oder zumindest geweckt werden muss.

Damit geht eine Bewusstseinsweiterung einher, sozusagen ein Blicken „über den Tellerrand“, heute gerne auch als „Aufgabe des Silodenkens“ bezeichnet. Es geht nicht mehr nur um die eigenen unmittelbaren Belange, sondern um das Erkennen und Bewerten aller damit verbundener Auswirkungen, damit ein ausgewogener Abwägungsprozess orientiert an der drei Säulen der Nachhaltigkeit in Gang gesetzt wird. Hierfür sind ganzheitliche Bewertungssysteme erforderlich, zu denen in Kapitel 5 näher ausgeführt wird.

Für eine umfassende Abbildung all dieser Aspekte stellt die fortschreitende Digitalisierung wertvolle Hilfsmittel und Methoden bereit. Digitale Planungsmethoden wie z. B. BIM stellen bereits in frühen Planungsphasen auf Grundlage einer parametrisierten Planung verlässliche Mengengerüste für verschiedene Planungsvarianten zur Verfügung. Damit können unter weitgehendem Verzicht auf subjektive Einschätzungen richtungsweisende und an den Nachhaltigkeitszielen orientierte Entscheidungen getroffen werden. Über eine solche Methodik ist wegen der Möglichkeit der umfassenden Berücksichtigung aller relevanten Aspekte auch viel leichter ein Konsens zu erreichen, weil dem Verfahren bereits der Wille zu einem Kompromiss innewohnt.

Bricht man diese Vorgehensweise weiter herunter, erkennt man, dass hiervon auch Genehmigungsverfahren, Freigabeprozesse und Zulassungsverfahren für innovative Werkstoffe etc. betroffen sind. Flächendeckend ist ein Umdenken erforderlich, denn es sind stets vielfältige Kriterien in die Entscheidungsprozesse einzuführen. Damit besteht aber auch die Chance, ultimative Einzelverbote und Beschränkungen zugunsten übergeordneter Ziele einzuordnen. Dabei sei ausdrücklich eine Gewichtung der Ziele abhängig von der Fragestellung und dem Sachverhalt zugelassen.

Ebenso ist eine Überprüfung der uns umgebenden Regelwerke im Hinblick auf die politischen Vorgaben

zur Erreichung der Nachhaltigkeitsziele erforderlich. Beispielsweise werden mit dem Bundesverkehrswegeplan [43] Ziele verfolgt, die offensichtlich in relevantem Konflikt zu anderen Nachhaltigkeitszielen stehen. Hierzu gehören: Leistungsfähige Verkehrsinfrastruktur für mehr Mobilität von Personen, Sicherstellung der Güterversorgung und Erhöhung der Verkehrssicherheit. Die weiteren Ziele Reduktion von Emissionen (über Staureduktion), Begrenzung des Flächenverbrauchs und Verbesserung der Lebensqualität werden ebenfalls benannt. Der Lösungsansatz ist der Ausbau und die Erhöhung der Leistungsfähigkeit bestehender Verkehrswege, in Teilen auch Neubau.

Ein solcher Konflikt ist zunächst normal. Verbesserungsfähig ist allerdings, dass eine größere Transparenz der Bewertungssystematik hergestellt wird, die zur Auswahl und Priorisierung der Maßnahmen verwendet wird. Bislang wird stattdessen erklärt, dass die Ziele „bewusst nicht quantifiziert“ werden.

Ein weiteres Beispiel für ein zur Zielerreichung eher hinderliches Regelwerk findet man im „Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel“ [44]. Die Bewertung erfolgt hier ausschließlich anhand einer reinen Wirtschaftlichkeitsanalyse. Das Dokument aus dem Jahre 1998 befindet sich zurzeit in Überarbeitung, eine Erweiterung der Bewertungskriterien ist erforderlich.

4.2 Genese eines Projektes

4.2.1 Bedarf, Projektziele

Der Bedarf für eine Infrastrukturmaßnahme zeigt sich regelmäßig anhand von Indizien wie Verspätungen im Bahnverkehr, Staus im Straßenverkehr, Unfallhäufigkeit, technisch bedingte Störungen oder Ausfälle, Bedarf nach einer sicheren Versorgung mit Energie und Wasser, aber auch Bürgerbeschwerden, Bürgerinitiativen und Begehren, die über politische Prozesse offenbar werden. Hierbei handelt es sich also um einen reaktiven Mechanismus, der einen entsprechenden zeitlichen Versatz bis zu einer Projektrealisierung zur Folge hat. Ein weiterer Indikator sind regelmäßige Aktualisierungen einer Verkehrsprognose für die jeweiligen Verkehrsträger Schiene, Straße und Wasser in Verbindung mit Kennzahlen für die Leistungsfähigkeit der Bestandsinfrastruktur.

Anhand des Bedarfs lassen sich erste Projektziele definieren. Diese orientieren sich naturgemäß zunächst an den vorgenannten Indikatoren. Im Weiteren wird dann bislang eine Betrachtung der Auswirkungen vorgenommen und ein Ausgleich durch ergänzende Maßnahmen angestrebt, um eine Genehmigungsfähigkeit zu erreichen. In Zukunft wird eine deutlich stärkere Ausrichtung an den übergeordneten Nachhaltigkeitszielen erforderlich, um eine umfassende

derer Aufgabenstellung zu entwickeln, deren Lösungsansätze auch den erweiterten Anforderungen gerecht werden können.

4.2.2 Aufgaben und Verantwortung des Bauherrn

Der Bauherr trägt in Abstimmung mit dem Baulastträger gerade zu Beginn eines Projektes eine besondere Verantwortung dafür, dass bei der Entwicklung des Projekts die Nachhaltigkeitsziele im Fokus stehen. Es sind dem Thema Nachhaltigkeit in der Projektplanung und -umsetzung der notwendigen Raum, Zeit und finanzielle Mittel zur Verfügung zu stellen. Um Entscheidungsprozesse im Hinblick auf eine Genehmigungsfähigkeit abzusichern, ist von Anfang an die Planung an diesen Zielen transparent und ausgewogen auszurichten.

Eine wirksame Herangehensweise liegt in der Errichtung einer geeigneten Projektorganisation. Klare Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten sowie die Ausstattung der Projektbeteiligten mit entsprechenden Kompetenzen und Entscheidungsbefugnissen gehören zu Grundlagen eines erfolgreichen Projektmanagements.

Die Projektorganisation sollte breit aufgestellt sein und ausreichende Kompetenzen zur Beurteilung der Auswirkungen von Planungsentscheidungen besitzen. Die Entscheidungsprozesse sind zu dokumentieren. Die Projektorganisation muss geeignet sein, Aufgabenstellungen für die Projektbeteiligten zu formulieren und Risiken und Konflikte zu identifizieren, die sich bei der Verfolgung der nicht selten widerstrebenden Ziele ergeben. Transparente Methoden zu einer möglichst objektiven Projektbewertung sind der Schlüssel für eine breite Akzeptanz der gewählten Lösungen.

Es ist Aufgabe des Bauherrn, eine frühzeitige Einbeziehung der betroffenen Bürger und Interessensvertreter sowie eine transparente Kommunikation der Abwägungsprozesse zu organisieren. Es kann zweckmäßig sein, hierfür professionelle Unterstützung hinzuzuziehen sowie Fachberater und Experten frühzeitig einzubinden. Eine offene Kommunikation trägt zur Absenkung von Widerständen bei, die häufig auf ein allgemeines Misstrauen zurückzuführen sind, welches auf unvollständigen Informationen beruht.

Aber auch Planer, Unternehmer und die gesamte Bauindustrie sind aufgefordert, weiterhin nach innovativen Lösungen zur verbesserten Nachhaltigkeit der Untertagebauten zu suchen und diese in die Projekte einzubringen.

4.3 Projektstrukturierung

Nachdem der Bedarf für eine Infrastrukturmaßnahme erkannt ist, liegt es im allgemeinen (volkswirtschaftlichen) Interesse, unter Beachtung der Einordnung, respektive Priorisierung der Maßnahme, unmittelbar

mit der Projektentwicklung zu beginnen und diese zügig voranzutreiben. Dies schont Ressourcen bei allen Beteiligten.

Hierzu gehört eine möglichst frühzeitige und verbindliche Projektstrukturierung bis hin zu geplanten Vergabeeinheiten. Zunächst sind die Projektziele zu definieren, zu denen künftig eben auch die übergeordneten Nachhaltigkeitsziele gehören. Alle Einzelziele müssen konsistent und aufeinander aufbauend auf das Erreichen der Nachhaltigkeitsziele ausgerichtet sein. Daraus sind Projektaufgaben herauszuarbeiten und gegeneinander abzugrenzen. Aufgabenpakete sind zu beschreiben und zuzuweisen, damit deren Abarbeitung zeitnah beginnen kann.

Oft gibt es im Projektumfeld weitere bestehende oder zukünftige Anforderungen, die mitberücksichtigt werden könnten. Eine Kombination erhöht die Nachhaltigkeit und somit den Nutzen für die Allgemeinheit. Ein regelmäßiger Austausch mit anderen Infrastrukturträgern ist daher empfohlen.

Im Zuge der Projektstrukturierung sollten auch Maßnahmenkataloge entwickelt werden, die eine bestmögliche Zielerreichung versprechen. Dafür sind eine Quantifizierung und nachvollziehbare Bewertung der erreichten Nachhaltigkeit von zentraler Bedeutung. Einige zentrale Fragestellungen des Untertagebaus bis hin zur Nachnutzung werden vor diesem Hintergrund in den nachfolgenden Abschnitten näher beleuchtet.

Auch an dieser Stelle werden seitens des DAUB innovative Vergabekonzepte ausdrücklich empfohlen, die auf partnerschaftlichen Vertragsmodellen beruhen. Eine frühzeitige Einbindung der Kompetenzen der potenziellen späteren Partner bei der baulichen Umsetzung birgt ein bisher in Deutschland kaum genutztes Potential für eine zielorientierte Projektabwicklung. Die Zusammenarbeit sollte so organisiert werden, dass auf Augenhöhe eine partizipative Zusammenarbeit initiiert und gefördert und die Interessen aller Beteiligten gleichgerichtet werden.

Eine Variante besteht darin, Aufgabenstellungen – wo immer möglich – in Verbindung mit Anreizsystemen zu übertragen. Die Kriterien dafür können unmittelbar an dem Zielerreichungsgrad der Nachhaltigkeitsziele orientiert werden. Dies kann sowohl für Planungsaufgaben, im Rahmen von Vergabeverfahren, als auch bei der baulichen Umsetzung Berücksichtigung finden.

4.4 Planung und Projektabwicklung

4.4.1 Integraler Planungsprozess

Das Untertagebauwerk wird von Anbeginn der Bearbeitung in seinem gesamten Lebenszyklus betrachtet, da die Bauphase im Vergleich zu der Betriebszeit kurz

ist. Dieser Lebenszyklus umfasst die Materialgewinnung und -produktion, die Errichtung, den Betrieb und Rückbau oder Umnutzung des Bauwerks sowie das Recycling und die Abfallentsorgung. Auch innerhalb einzelner Projektphasen rücken die Fachplaner enger zusammen, da sie die gegenseitigen Wechselwirkungen ihrer unterschiedlichen Planungen (und Interessen) im Sinne des optimalen Gesamtergebnisses abstimmen müssen. Die nachhaltige Planung und Bauvorbereitung werden damit zu einem integralen Planungsprozess. Folgende Merkmale sind Teil der integralen Planung:

- Frühzeitige Zusammenführung und Integration der verschiedenen Planungsdisziplinen
- Gesamtkonzept über alle baulichen und technischen Bauwerke
- Gesamtkonzept des Untertagebauwerks unter Beachtung des gesamten Lebenszyklus: Errichtung, Betrieb, Umnutzung, Sanierung, Abbruch
- Gesamtkonzept unter gleichrangiger Beachtung der Aspekte Ökonomie (Investitionen, laufende Kosten etc.), Soziales (Nutzerbehaglichkeit etc.) sowie Ökologie (Ressourcenschonung, Cradle to Cradle etc.)
- Offene und zielgerichtete Kommunikation sowie interdisziplinäres Denken der Planungsbeteiligten
- Rückkopplungsprozesse (Iteration) in der Planung ermöglichen

Der zentrale Ansatz integraler Planung besteht in der frühzeitigen Zusammenführung aller Fachdisziplinen sowie in einer klar strukturierten und kontinuierlichen Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten. Auf diese Weise wird eine effizientere und nachhaltigere Projektentwicklung gefördert. Besonders entscheidend ist dabei das frühzeitige Handeln im Sinne der Nachhaltigkeit: Gerade in den frühen Planungsphasen (Variantenuntersuchungen im Rahmen der Vorplanung) lassen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand bedeutende Weichen in Richtung nachhaltiger Lösungen stellen.

Die nachhaltige Planung von Infrastruktur sollte Variantenstudien zu Bauweise, Nutzung und Lebenszyklus beinhalten, die auf gemeinsamen Basiswerten beruht sowie mit nachvollziehbaren und belastbaren Ergebnissen endet. Um den Einfluss der Basiswerte beurteilen zu können, sollten diesbezüglich Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden. Für die Variantenstudien können verschiedene Ausführungsoptionen bilanziert und ihre Einflüsse auf die Umwelt in Bezug auf die Nachhaltigkeit beschrieben werden. Dies kann sowohl bei der Wahl eines gesamten Bauverfahrens als auch bei der Abwägung von Materialien in Detailentscheidung nützlich sein. Die Gesamtsumme der

Treibhausgasbilanz ist hierbei weniger aussagekräftig als die jeweiligen projektinternen Vergleiche. Nützlich ist die Bilanz insbesondere, um zu bewerten, welche Materialien oder Prozesse den größten Einfluss auf die Gesamtbilanz haben und welche Potentiale sich damit zur Verringerung der Gesamtemissionen ergeben.

4.4.2 Integrierte Projektabwicklung

Die integrierte Projektabwicklung bewirkt, dass sich der Planungsprozess zeitlich nach vorne verschiebt. Entscheidungen werden früher getroffen als im klassischen Planungsprozess, mögliche Risiken frühzeitig erkannt und behoben sowie die Kommunikation unter den Beteiligten verbessert. Durch die frühere Entscheidung über Materialien, Querschnitte und Bauweisen kann auch früher Einfluss auf die Umweltbilanz des Bauwerks genommen werden. Da die Leistungsphasen sich dadurch verschieben, kann auch eine Anpassung der Vergütungsgrenzen notwendig werden.

4.4.3 Querschnittsoptimierung

Eine Reduktion von Treibhausgasemissionen kann indirekt auch dadurch erreicht werden, dass in einem frühen Planungsstadium die Nutzung des Tunnelquerschnitts optimiert wird. Hierbei muss in Bezug auf das Potenzial einer Querschnittsoptimierung zwischen konventionellen und maschinellen Vortrieben unterschieden werden. Generell sollte der Querschnitt ausgehend von den langfristig erkennbaren Nutzungsanforderungen gewählt und gestaltet werden. Das bedeutet beispielsweise, den Querschnitt eines Eisenbahn-Tunnels so anzupassen, dass es nicht zu übermäßigen Energieverlusten bei der Durchfahrt kommt. Ein anderes Beispiel wäre die Dimensionierung eines Auffangkanals, der für zukünftige, möglicherweise verstärkt auftretende Starkregenereignisse ausgelegt ist, um damit die Infrastruktur widerstandsfähiger zu gestalten.

Können beispielsweise im Straßentunnel zusätzlich Kabelkanäle für die Verlegung von Versorgungsleitungen untergebracht werden, müssen nicht zwei separate Tunnel gebaut werden. Durch den kreisförmigen Querschnitt von Tunneln im maschinellen Vortrieb bleibt nach dem Bau einer Straßenebene unterhalb der Straße ein Raum, welcher idealerweise genutzt werden kann. Beispielsweise kann der untere Bereich bei großen Querschnitten als Fluchtweg oder als Auffangbecken für Starkregenereignisse genutzt werden. Ein Beispielprojekt mit einer solchen Umsetzung findet sich im **Anhang B**.

Bei der Gestaltung des Querschnitts eines konventionellen Vortriebs gibt es mehr Flexibilität als im maschinellen Vortrieb. Der Querschnitt kann hier individueller auf die Einwirkungen abgestimmt werden, um so eine Optimierung der Beanspruchung zu erreichen.

Zum Beispiel kann eine stärker ausgerundete Sohle eine geringere Dicke der Spritzbetonschicht und Innenschale benötigen als eine flache Sohle [68]. Dem steht ein größeres Ausbruchvolumen entgegen. Bei der Planung eines Querschnittes können verschiedene Sohlgestaltungen verglichen und hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet werden.

4.4.4 Verwendung von Recycling-Material

Für den Planungsprozess müssen bei der Verwendung recycelter Materialien zusätzliche Anforderungen erfüllt werden. Beispielsweise muss nachgewiesen werden, dass der verwendete Baustoff wie ein Primärbaustoff geeignet ist. Die Einhaltung bau- und umwelttechnischer Regelungen wird durch unabhängige Zertifizierungsstellen geprüft. Dies muss im Planungsprozess beachtet werden. Ebenso müssen die Eigenschaften von Primär- und Sekundärbaustoffen verglichen und die Auswirkungen in die Planung einbezogen werden.

4.4.5 Dauerhaftigkeit

In der Entscheidung über zu verwendende Materialien sollte der Fokus außer auf den Umwelteinwirkungen auch auf der Leistungsfähigkeit und der Dauerhaftigkeit des Materials liegen. Hat das Material beispielsweise eine deutlich höhere Nutzungsdauer, muss es erst später erneuert oder gewartet werden und hat damit auf die Zeit gesehen eine geringere Umwelteinwirkung. Ein leistungsfähigeres Material kann ggf. mit einem geringeren Querschnitt bzw. einer geringeren Dicke verwendet werden und kann so zu einer geringeren Umwelteinwirkung beitragen.

Haist [48] definiert die Nachhaltigkeit der Materialwahl daher als Verhältnis von Leistungsfähigkeit,

Nutzungsdauer und Umwelteinwirkungen (**Abbildung 4-1**). Dieser Ansatz sollte insbesondere bei der Wahl von Baustoffen und Definition von Bauteilen beachtet werden.

Dieser Ansatz zur Betrachtung der Nachhaltigkeit von Bauteilen wurde für Beton entwickelt, kann aber auch auf andere Baustoffe übertragen werden. Die Umwelteinwirkungen werden jeweils auf das Bauteil umgerechnet.

4.4.6 Abwärme, Energiegewinnung

Die Planung einer Energiegewinnung parallel zur eigentlichen Nutzung des Tunnels muss ebenfalls frühzeitig ermittelt werden. Insbesondere bei Kabeltunneln kann durch die Abwärme eine Energiegewinnung sinnvoll sein. Hier sollte auch der Raum für zukünftige technische Entwicklungen geöffnet werden, so dass neue und innovative Lösungen zustande kommen. Bei maschinellen Tunnel kann über die geothermische Aktivierung der Tübbing (siehe **Abbildung 4-2**) Energie gewonnen werden und damit zum Beispiel ein nahe liegendes Wohngebiet versorgt werden. Auch konventionelle Tunnel können geothermisch aktiviert werden.

4.4.7 Vertragliche Festlegungen

In der Planung gibt es die Möglichkeit, in Kooperation mit dem Bauherrn Nachhaltigkeitsziele für den Auftragnehmer vertraglich festzulegen. Hier können beispielsweise Anforderungen an recycelte Materialien oder maximale Transportentfernungen für regelmäßige oder größere Transporte festgeschrieben werden. Mindestens sollten Nachhaltigkeitsthemen in die Ausschreibung und den Vergabeprozess integriert werden. So kann beispielsweise eine weniger nach-

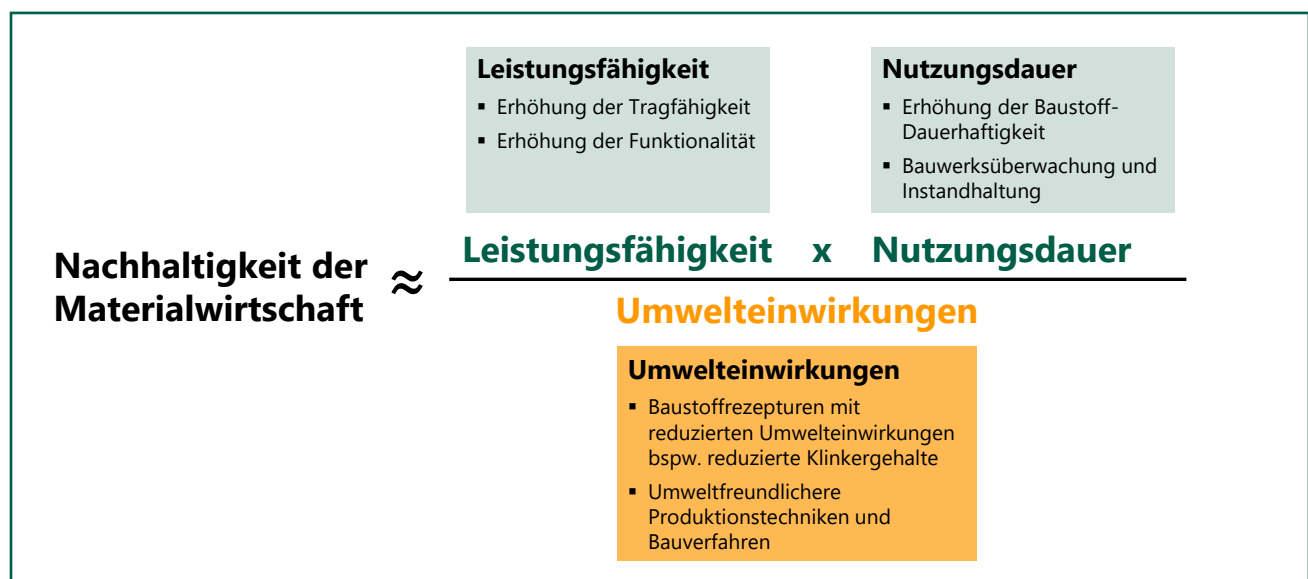


Abbildung 4-1 Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene nach [48]

haltige Ausführung monetarisiert in die Bewertung einfließen.

Je konkreter entsprechende Ziele und genaue Umsetzungsmöglichkeiten in der Entwurfsplanung geregelt, in der Ausschreibung erläutert und in den geeigneten LV-Positionen eingearbeitet werden, desto nachhaltiger kann die Umsetzung des Bauvorhabens gestaltet werden.

Die Realisierung einer nachhaltigen unterirdischen Infrastruktur erfordert eine von Anfang an und über alle Phasen hinweg auf die Verfolgung der Nachhaltigkeitsziele ausgerichtete Planung und Projektabwicklung.

4.5 Maßnahmen

4.5.1 Maßnahmen zum Klimaschutz

4.5.1.1 Vorbemerkungen

Im Infrastruktursektor werden aufgrund komplexer Boden-Bauwerks-Interaktionen und hoher Anforderungen an die Langlebigkeit der Konstruktionen große Materialmengen verbraucht, deren Produktion mit ausgeprägten CO₂-Emissionen und Ressourcenverbräuchen einhergeht. Dies gilt insbesondere für den Tunnelbau. Tunnelbauwerke unterscheiden sich sowohl in ihrer Art (Straßen-, Bahn-, Unterwassertunnel etc.), den daraus abgeleiteten Dauerhaftigkeitsexpositionen als auch im Baugrund, in denen sie errichtet werden. Daraus ergeben sich zum einen stark unterschiedliche Anforderungen an das Tunneltragsystem sowie an die verwendeten Betone und zum anderen variieren hierdurch auch die zu rezyklierenden Tunnelausbruchmassen stark in ihren Eigenschaften. Hin-

zu kommen geologische Schwankungen, die bei der Weiterverwendung der Materialien zur Betonherstellung derzeit nur durch eine Mengenbegrenzung und durch eine Steigerung des Zementgehalts praktisch beherrscht werden können.

4.5.1.2 Neuartige Materialien

Bei der Entwicklung von CO₂- und ressourcenverbrauchsoptimierten Betonen werden aktuell verschiedene Wege beschritten, die alle das Ziel haben, den Anteil an Ausgangsstoffen mit geringen spezifischen Emissionen zu steigern, ohne dabei die erforderlichen Betoneigenschaften zu gefährden [47]. Entsprechend wurden in den vergangenen Jahren neue Zemente mit stark reduzierten Klinkergehalten vorgestellt [48], [49] die bislang jedoch noch nicht oder nur zum Teil ihren Weg in den Tunnelbau gefunden haben. Dies ist zum einen auf die unzureichende Verarbeitbarkeit und Robustheit sowie zum anderen auf die verlangsamte Erhärtungsgeschwindigkeit derartiger Betone zurückzuführen. Dieses Verhalten kann jedoch durch Zugabe bauchemischer Additive wie Fließmittel und Beschleuniger (u. a. auf Basis nachwachsender Rohstoffe) ausgesteuert werden. Insbesondere die kontrollierte Verflüssigung chemisch sehr heterogener Bindemittelgemische (wie z. B. Kompositzemente aus einer Vielzahl von Komponenten) stellt dabei immer noch eine Herausforderung dar und wird aktuell in verschiedenen Forschungsprojekten adressiert. Die Festigkeitsentwicklung der Betone ist dabei von großer ökonomischer Bedeutung, denn sie beeinflusst maßgeblich den Produktionstakt z. B. bei der Tübbing-Herstellung. Abhilfe könnten hier schnell abbindende, CO₂-arme Zemente auf Basis von Calcium-Sulfo-Aluminat-Klinker (CSA) sein.

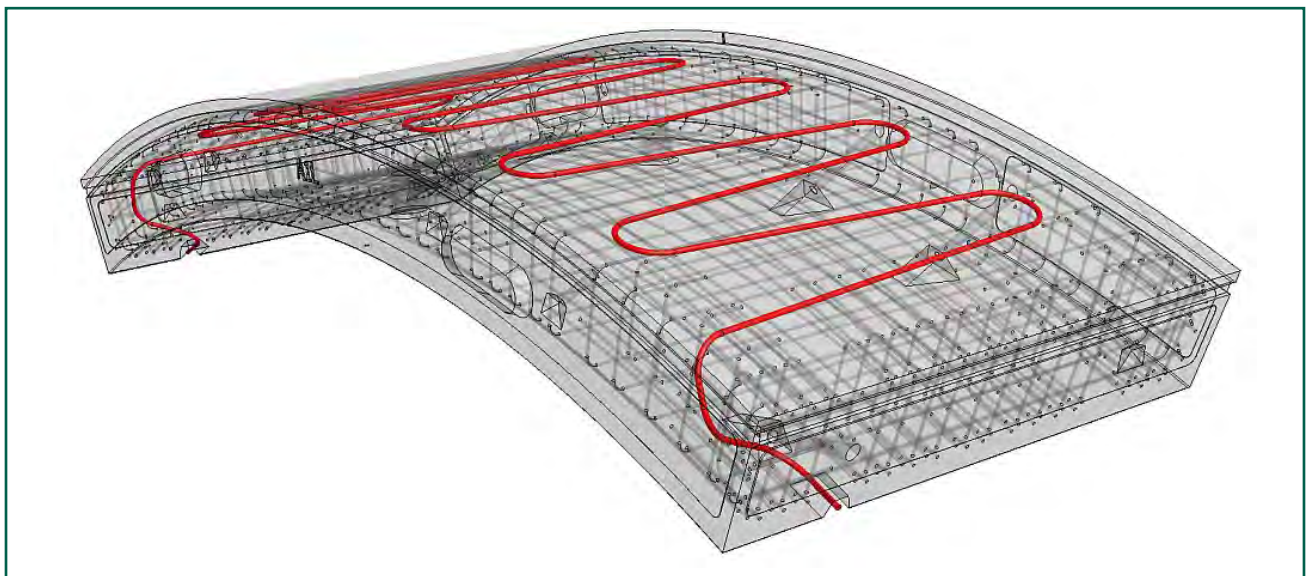


Abbildung 4-2 Systemskizze Energietübbing

Bis zur Marktreife der klinkerarmen Zemente, die aktuell noch einer bauaufsichtlichen Zulassung bedürfen, können aktuell bereits durch die Verwendung ausgewählter Bindemittel mit einem reduzierten Klinkeranteil und darauf abgestimmter Zusatzmittelsysteme CO₂-Emissionen eingespart werden. Üblicherweise kommen bei der Herstellung von Spritzbetonen Portlandzemente der Klasse CEM I mit einer schnellen Festigkeitsentwicklung der Festigkeitsklasse 52,5 R zum Einsatz. Diese Zemente enthalten einen Klinkeranteil von 95 bis 100 %. Durch die Substitution des Portlandzementklinkers durch geeignete Zusatzstoffe (beispielsweise Kalksteinmehl, Hüttensand, Flugasche etc.) können zementbezogene CO₂-Emissionen vermieden werden. Aus der Praxis liegen bereits Erfahrungen mit dem Einsatz von CEM III/A Zementen als Ersatz zum klassischen CEM I Zement im Spritzbeton vor. Durch den Einsatz eines CEM III/A Zements kann der Klinkeranteil um bis zu 50 % reduziert und die zementbezogenen CO₂-Emissionen um über 45 % im Vergleich zu einem CEM I Zement reduziert werden [50].

Für die Herstellung von Tunnelinnenschalen werden oftmals auf Grund der Taktbauweise und dem Ziel eines frühen Ausschalens schnell erhärtende Zemente der Klasse CEM II/A verwendet. Bei der Planung der Rezepturen wird jedoch der günstige Einfluss der Hydratationswärmeentwicklung und der damit einhergehenden schnelleren Festigkeitsentwicklung im Bauteil im Vergleich zu unter Laborbedingungen geprüften Betonen auf der sicheren Seite liegend unberücksichtigt gelassen. Infolge erweiterter Erstprüfungen mit wärmebehandelten Probekörpern lassen sich in der Projektvorbereitung auch Innenschalenrezepturen unter Verwendung von CEM III/A Zementen entwickeln, die den Anforderungen einer Taktbauweise (Herstellung eines Innenschalenblocks pro Tag) genügen. Der Klinkeranteil in einem CEM III/A Zement liegt mit 35 bis 64 % deutlich unter dem Klinkeranteil in einem CEM II/A Zement mit 80 bis 94 %, womit auch an dieser Stelle das Potential besteht, mit bereits am Markt verfügbaren Ausgangsstoffen zementbezogene CO₂-Emissionen zu reduzieren.

Durch die Verwendung von CEM III/A Zementen für die Herstellung von Tunnelinnenschalen wird die Entwicklung der Hydratationswärme im Bauteil günstig beeinflusst. Gerade bei dünnen Innenschalen sind damit auch Frischbetontemperaturen >25 °C aus technischer Sicht vertretbar, womit energieintensive Maßnahmen zum Kühlen des Frischbetons reduziert werden können.

Zementfreie Baustoffe auf Geopolymerbasis

Als Geopolymere werden anorganische Bindemittel bezeichnet, die keinen Zement enthalten und deren Struktur sich auf Alumosilikate zurückführen lässt. Be-

tone und Mörtel auf Geopolymerbasis bestehen aus Hüttensandmehl, Flugasche, Gesteinskörnung, verschiedenen Aktivatoren und Fließmittel. Im Vergleich zu traditionellen Betonen benötigen diese Systeme alkalische Aktivatoren, um die Materialeigenschaften eines Betons zu erreichen. Gegenüber den herkömmlichen zementbasierten Systemen weisen die Geopolymerbetone und -mörtel, durch den Einsatz von Nebenprodukten aus der Zementherstellung, eine vergleichsweise niedrigere CO₂-Bilanz auf. Erfahrungsgemäß zeichnet sich der zementfreie Beton durch eine hohe Frühfestigkeit, ähnliche Druckfestigkeitswerte und eine erhöhte Biegezugfestigkeit aus [51].

Des Weiteren konnte ein verringertes Schwindpotential und eine geringere Rissanfälligkeit beobachtet werden. Darüber hinaus weisen Geopolymerbetone einen erhöhte Säure- und Sulfatwiderstand auf, sowie eine gesteigerte Resistenz gegenüber besonders hohen Temperaturen im Brandfall [52].

Nachteilig wirkt sich aus, dass Geopolymerbeton alkalischer sein kann als herkömmlicher Beton, was den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinflussen kann. Es ist wichtig, geeignete Schutzmaßnahmen für die Bewehrung zu ergreifen. Die Haftung zwischen Geopolymerbeton und der Bewehrung kann variieren, was die strukturelle Integrität beeinflussen könnte. Dies ist zu beachten. Geopolymerbeton verhält sich beim Verarbeiten anders als herkömmlicher Beton. Polymerbeton kann thixotrop sein, was bedeutet, dass er beim Rühren oder Schütteln flüssiger wird, was das Ausschalen von Bauteilen erschweren kann.

Zementfreie Ringspaltmasse

Beim maschinellen Tunnelvortrieb entsteht verfahrensbedingt ein Spalt zwischen anstehendem Gebirge und der Tübbingröhre. Zur Kraftübertragung und zur Verminderung von Oberflächensetzungen muss dieser Ringspalt mit einem Ringspaltverfüllmaterial vollständig verfüllt werden. Diese werden allgemein als Ringspaltmörtel bezeichnet, wobei man grundsätzlich zwischen sogenannten 1K- und 2K-Ringspaltmörteln unterscheidet. Die 1K-Ringspaltmörtel sind betontechnologisch zusammengesetzt und enthalten Zement, Zusatzstoffe, Gesteinskörnungen und Wasser. Betonzusatzmittel steuern die speziellen Verarbeitungseigenschaften. 2K-Ringspaltverfüllmaterial bestehen aus Zement, Bentonit und Wasser. Hier stellen Stabilisatoren die Verarbeitungseigenschaften sicher.

In Deutschland wurde ein Ringspaltmörtel, bei dem der Zement durch ein alternatives Bindemittel auf Geopolymerbasis ersetzt wurde, erstmalig beim Neubau des Abwasserkanals Emscher eingesetzt. Beim Großprojekt Stuttgart 21 wurde erneut ein solches System genutzt, was u. a. die große Herausfor-

derung des maschinellen Vortriebes im anhydrithaltigen, quellfähigen Gestein meisterte. Für den Einsatz in den anhydrithaltigen Böden musste die Abgabe von Überschusswasser aus dem Ringspaltmörtel an das Nebengestein unterbunden werden, was durch die Eigenschaften des Geopolymers, das Zugabewasser vollständig in die Struktur des Baustoffes aufzunehmen, ermöglicht wurde.

Das Bindemittel einer solchen Ringspaltmasse besteht aus Hüttensand und Flugasche. Gesteinskörnungen werden als Stützkorn verwendet. An der Lisene, über die die Ringspaltmasse in den Ringraum eingebracht wird, wird ein Aktivator zugegeben, der die Reaktion der Bindemittel auslöst. Enthaltene Phosphate wirken dem Quellvorgang entgegen.

Zementfreier Spritzbeton

Im Rahmen der Projektbearbeitung des Forschungsprojekts KOINOR wurde ein spritzbares Brandschutzcoating für bestehende Tunnelbauwerke auf Basis eines alkalisch aktivierten Binders (Geopolymer) entwickelt. Das entwickelte Coating kann sowohl als Spritzmörtel- als auch als Spritzbetonsystem für die Instandsetzung sowie die bauliche Verbesserung eingesetzt und im Nass- sowie Trockenspritzverfahren appliziert werden. Entscheidende Vorteile von zementfreien Systemen sind

- a) die thermischen Eigenschaften, mit denen die aktuellen Anforderungen der Richtlinien an den Brandschutz von Tunnelbauwerken erfüllt werden und ohne Zugabe von PP-Fasern (mono-/multifilamentare Mikrofasern) Abplatzungen im Brandfall vermieden werden,
- b) die sehr hohe Sulfatbeständigkeit und der hohe Chlorideindringwiderstand des erhärteten Betons sowie
- c) die Reduzierung der CO₂-Bilanz im Rahmen der Ertüchtigung des gesamten Tunnelbauwerks.

In den durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die entwickelten spritzbaren Geopolymersysteme verfahrenstechnisch sehr gut funktionieren und im Hinblick auf die erwarteten Vorteile eine hohe Performance aufweisen. Dadurch ergibt sich erstmals die Möglichkeit, bestehende Tunnelanlagen mithilfe einer zementfreien Beschichtung ohne weitreichende Eingriffe in das erforderliche Lichtraumprofil zu beschichten [53].

Mit dem Folgeprojekt KOINOR-Pro sollen ab Q3/2024 weitere Anpassungen an dem entwickelten System erfolgen, um perspektivisch eine weitreichende Einsatzfähigkeit zu schaffen. Zu diesem Zweck rückt auch die Genehmigungsfähigkeit des zementfreien Spritzbetons als Instandsetzungssystem in den Fokus des Forschungsvorhabens. Im Rahmen einer gutach-

terlichen Begleitung soll das grundsätzliche Layout eines Stufenplans zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) entwickelt und dadurch die spätere Praxisanwendung beschleunigt werden. Technisch wird unter anderem an der Materialzusammenstellung weiter geforscht. In den jüngsten Tastversuchen konnte durch Modifikation der Rezepturen hinsichtlich des verwendeten Aktivators der Schmelzpunkt des Materials bereits herauf- und durch Zugabe neuartiger Zuschläge die Permeabilität herabgesetzt werden. Bei den eingesetzten Zuschlagsstoffen handelt es sich um Recyclingprodukte, welche nachweislich über eine bessere CO₂-Bilanz verfügen. Daraus ergibt sich die Perspektive, durch die notwendige Reduktion der Permeabilität auch die ohnehin – gemessen an zementbasierten Vergleichsprodukten – bereits günstige CO₂-Bilanz des entwickelten Produkts noch weiter zu verbessern.

Zementfreier Konstruktionsbeton

Zementfreie Systeme können auch als Ortbeton oder für Betonfertigteile eingesetzt werden. Solche Systeme wurden bereits durch das Institut für Bautechnik (DIBt) in Deutschland zugelassen und sind damit für die Verwendung im täglichen Baugeschäft zulässig. Durch seinen hohen Säure- und Sulfatwiderstand eignet sich zementfreier Beton bestens für den Bau von Rohr- und Schachtfertigteilen als auch für den Bau von landwirtschaftlichen und siedlungswasserwirtschaftlichen Bauwerken mit Anforderungen an Säure- und Sulfatbeständigkeit.

4.5.1.3 Verbesserte Bauweisen

Sensordaten-basierte und KI-unterstützte Methoden für die automatisierte Betonherstellung

Die Produktion des Werkstoffs Beton bzw. von Bauteilen aus Beton ist heute noch ausschließlich empirisch geprägt. Trotz enormer Wiederholraten (allein in Deutschland werden täglich weit über 10.000 Chargen Beton produziert) haben Industrie-4.0-Methoden bislang noch keinen Einzug in diesen Bereich gehalten. Diese sind aber eine zentrale Voraussetzung, um die CO₂-Reduktionsziele im Bauwesen zielsicher zu erreichen. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass bislang keine geeigneten Sensormethoden und Bewertungsalgorithmen vorliegen, um die Produktionsprozesse inline zu erfassen und auszusteuern. Erste wegweisende Ansätze auf diesem Gebiet wurden in diversen Entwicklungsprojekten gemacht. Beispielsweise ist es mittels digitaler Bildauswertung möglich, die Korngrößenverteilung und weitere Eigenschaften von Gesteinskörnung für die Betonherstellung online zu erfassen und diese Echtzeit-Daten als Regelgröße für die Betonaussteuerung heranzuziehen [54]. Diese Techniken werden aktuell in Entwicklungsprojekten

auf Tunnelausbruchmaterial übertragen und sollen mittelfristig in ersten Ausführungsprojekten eingesetzt werden. Diese aktuellen Entwicklungen schaffen die Voraussetzung für den skalierbaren Einsatz von Ausbruchmaterial für die Betonherstellung im Tunnelbau.

Basierend auf KI-Ansätzen hat die STUVA ein Messsystem zur Bestimmung des Bindemittelanteils in mineralischen Baustoffen entwickelt [55]. Die Kombination dieser genannten Techniken ermöglicht es, den gesamten Vorgang der Ausgangsstoffbereitstellung und Betonproduktion sensorisch in Echtzeit zu erfassen und so Aussteuerungsalgorithmen für ressourcenverbrauchsminimierte Betone zu entwickeln und im Projektmaßstab zur Anwendung zu bringen.

Bewehrung und robotische Fertigung

In internationalen Projekten des Tunnelbaus wird seit Jahren eine konventionelle Stabstahlbewehrung durch alternative Faserbewehrung aus Stahl oder teilweise auch in Kombination mit Kunststoff ersetzt. Der gezielte Einsatz von Fasern erlaubt bei entsprechenden Randbedingungen eine Reduzierung der notwendigen Stahlmenge im Konstruktionsbeton. Dies scheitert bisher in Deutschland an der gültigen Vorschriftenlage. Erstmals wurden im Rahmen der neuen DAUB-Empfehlung für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen [56] für die Bemessung von Tübbing mit Faserbeton die Regelungen gezielt erweitert und auf die speziellen Randbedingungen des Tunnelbaus hin angepasst. Die Kombination von faserbewehrten Tübbing mit innovativem Beton ermöglicht signifikante CO₂-Einsparungen.

Unabhängig davon ist es in ersten Projekten gelungen, die Fertigung von konventionell bewehrten Tübbing zu teilautomatisieren und damit den Produktionsprozess zu optimieren [57]. Automatisierte Prozessschritte mittels Industrieroboter erlauben eine Minimierung des Stahls. Voraussetzung sind hohe Genauigkeiten in der Positionierung des Bewehrungskorbes. Eine gezielte Einsparung von Stahl wird auch durch standardisierte Schweißprozesse möglich. Die Kombination von automatisierten Prozessen und innovativen Design schafft die Voraussetzung für relevante CO₂-Einsparungen.

Darüber hinaus eröffnet die Digitalisierung im Tunnelbau zahlreiche Möglichkeiten der Optimierung und des Einsatzes innovativer KI-Methoden zur Produktionssteuerung (Bohrwagen, automatisierter Tübbingausbau etc.).

4.5.1.4 Effiziente Bauprozesse und Logistik

Tunnelbauprojekte erstrecken sich oftmals aufgrund ihres Umfangs und ihrer Komplexität über Zeiträume von mehreren Jahren. Damit bieten sich auch bei der

Baustelleneinrichtung Möglichkeiten, durch die entsprechenden Installationen nachhaltige und ressourcenschonende Bauprozesse zu etablieren.

Dies beginnt beispielsweise bei der allgemeinen Baustelleneinrichtung durch das Aufstellen von Photovoltaikelementen auf den installierten Containeranlagen, eine Steuerung der Baustellenbeleuchtung mittels Bewegungsmeldern oder die Verwendung stromsparender LED-Scheinwerfer. Durch die geschickte Aufstellung von Reifenwaschanlagen, Bedüsungssystemen zur Staubreduktion oder Förderbändern für den Materialtransport werden nicht nur die gestiegenen Anforderungen an die Reduktion von Immissionen umgesetzt, sondern auch die Aufwände für Straßenreinigung oder die Menge der Lkw-Fahrten reduziert.

Gerade im Bereich des maschinellen Tunnelbaus wird, bisher meist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten, ein besonderer Fokus auf die energieeffiziente Auslegung und Konzeption von TBM, Separation und Fördersystemen sowie Logistik gelegt. Dies kann beispielsweise durch die Verwendung von intelligenten Rührwerkssteuerungen bei einer Bentonitaufbereitung/-bereithaltung oder sensorgesteuerten Bedüsungssystemen verstärkt werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Wiederverwendung der anfallenden Berg- und Baustellenwässer. So wurde beispielsweise bei einem Projekt die Wasseraufbereitungsanlage so dimensioniert und eingerichtet, dass die gereinigten Bauwässer über einen Vorratsbehälter wieder zur Brauchwasserentnahme bereitgestellt wurden, anstatt in die Vorflut geleitet zu werden. Damit konnte der Bezug von Frischwasser über die Laufzeit dieses Tunnelbauprojektes um über 30 % reduziert werden.

4.5.2 Umgang mit Ressourcen

4.5.2.1 Vorbemerkung

In den letzten Jahren hat das Thema Ressourceneffizienz auch im Bauwesen zunehmend an Bedeutung gewonnen. Tunnelprojekte spielen dabei eine besondere Rolle, da große Mengen Ausbruchmaterial zeitlich und örtlich konzentriert anfallen und jegliches Ausbruchmaterial, das die Baustelle verlässt, aufgrund gesetzlicher Vorgaben derzeit als Abfall deklariert werden muss. Dieses sinnvoll zu verwerten, also in eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft im Sinne des globalen Nachhaltigkeitsziels 12 „Nachhaltiger Konsum und nachhaltige Produktion“ einzugliedern, ist eine der großen aktuellen Herausforderungen für die Tunnelbaubranche (**Abbildung 4-3**).

Vor dem Hintergrund der besonderen Relevanz des Themas hat der DAUB im Jahr 2024 eine „Empfehlung zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial“ [3] veröffentlicht. Deshalb werden im Rahmen der

vorliegenden Empfehlungen lediglich einige wesentliche Eckpunkte dargestellt.

4.5.2.2 Rechtliche Grundlagen

Eine wesentliche rechtliche Grundlage in Deutschland ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), das die EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG, AbfRRL) in deutsches Recht umsetzt. Nach § 1 soll die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und der Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen dienen. Hierbei ist gemäß § 7 und § 8 eine Rangfolge von Maßnahmen zu beachten, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Die technische Möglichkeit, die wirtschaftliche Zumutbarkeit und die sozialen Folgen der Maßnahme sind zu beachten.

Seit dem 1. August 2023 ist die sogenannte Mantelverordnung (Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung des Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung) eingeführt. Den Kern der Mantelverordnung bilden die Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung (EBV) und die Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV).

Diese Verordnungen konkretisieren bundeseinheitlich und rechtsverbindlich Anforderungen an die Verwertung von mineralischen Abfällen und Ersatzbaustoffen. Mineralische Ersatzbaustoffe im Anwendungsbereich der Verordnung sind u. a. Recycling-Baustoffe aus Bau- und Abbruchmaßnahmen oder Bodenmaterial; hierzu zählt auch Tunnelausbruchmaterial. Sie lösen die bisherigen zum Teil un-

terschiedlichen technischen Regeln und Erlasse auf Länderebene ab. Die in der Praxis zur Beurteilung der Verwertbarkeit von mineralischen Bauabfällen häufig herangezogenen „LAGA-Zuordnungswerte“ verlieren weitgehend an Bedeutung. Die Deponieverordnung (DepV) ergänzt die Vorgaben der Ersatzbaustoffverordnung, wenn das Material aufgrund zu hoher Schadstoffbelastungen nicht verwertet werden kann und (zum Beispiel auf einer Deponie) beseitigt werden muss.

Die EBV regelt insbesondere, unter welchen Voraussetzungen mineralische Ersatzbaustoffe in technische Bauwerke eingebaut werden dürfen. So gibt diese Verordnung zum einen vor, wie Ersatzbaustoffe herzustellen und zu klassifizieren sind. Zum anderen enthält sie sogenannte Einbautabellen, aus denen hervorgeht, in welchen Einbauweisen eines technischen Bauwerks (z. B. Damm oder Wall) der jeweils klassifizierte mineralische Ersatzbaustoff eingebaut werden darf. Zur Einstufung des Tunnelausbruchmaterials im Sinne des KrWG und der Mantelverordnung ist dieses sortenrein und repräsentativ zu beproben.

4.5.2.3 Planung

In den gegenwärtig üblichen Planungsphasen für unterirdische Bauwerke bis zur Planfeststellung wird der Verwertung von Ausbruchmaterial zumeist nur ein untergeordneter Grad an Aufmerksamkeit gewidmet. So wird zur Findung der Vorzugslösung zwar grundsätzlich zwischen „Einschnitt oder Tunnel“ abgewogen, die Kriterien erfassen die tatsächlichen Folgen jedoch nur bedingt. Häufig werden erst im Rahmen der Ausschreibungsplanung vertiefte Betrachtungen zur Materialbewirtschaftung angestellt. Dabei ist es am einfachsten, wenn bereits in der Planungsphase angestrebt wird, im Sinne eines optimalen Massenausgleichs den Höhenverlauf der Trasse unter Berücksichtigung der Topografie so zu wählen, dass die Ausbruchsmengen so gering wie möglich gehalten werden und möglichst innerhalb des Bauloses wiederverwendet werden können.

Auch wenn zum Zeitpunkt der Erstellung des geotechnischen Berichts die Vortriebs- und Verfahrenstechnik üblicherweise noch nicht feststehen und projektspezifische Kenntnisse zur Baustelleneinrichtung oder Lagerung von Material fehlen, sind mögliche Veränderungen der Eigenschaften zu beschreiben. Ebenso ist zu bedenken, dass für die Bewertung der Verwertbarkeit durch industrielle Zweige (z. B. tonhaltiges Material für die Ziegelherstellung) mitunter zusätzliche Untersuchungen erforderlich werden, wie eine Bestimmung der Mineralphasen mittels Röntgendiffraktometrie (XRD-Analyse). Darüber hinaus ist es erforderlich, je nach erwarteten Boden- bzw. Ausbruchmaterialeigenschaften die Auswirkungen er-

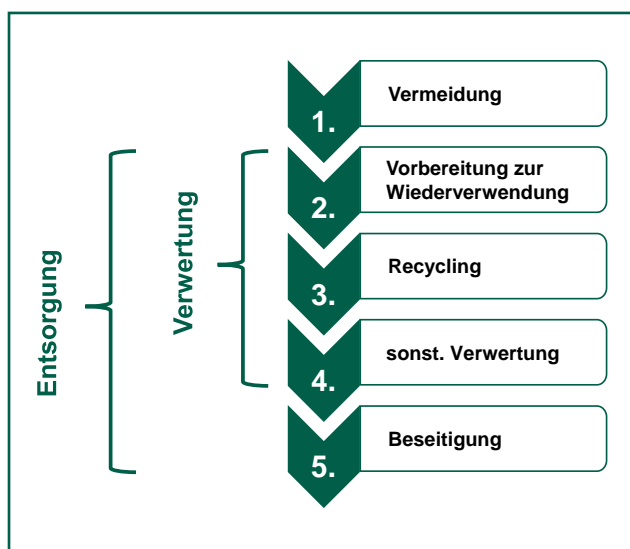


Abbildung 4-3 Abfallhierarchie [3]

schöpfend zu beschreiben und spätestens im Rahmen der Ausschreibung festzulegen, die aus geogenen, anthropogenen und vortriebsbedingten Verunreinigungen zu resultieren vermögen (z. B. Anreicherung mit chemischen oder tonigen Bestandteilen zur Konditionierung der Stütz- und Schmierflüssigkeiten, v. a. Bentonit, beim maschinellen Vortrieb mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust).

4.5.2.4 Ausführung

Nicht nur in der Planung, sondern auch bzw. vor allem bei der Ausführung werden in Zukunft neue Herausforderungen sowohl auf den Auftragnehmer als auch auf den Auftraggeber zukommen. Als maßgeblich sind mindestens die folgenden Punkte anzusehen:

- Flächenbedarf
- Transportwege
- Liefersicherheit
- Veränderliche Materialeigenschaften

Flächenbedarf

Insbesondere wenn eine externe Verwertung außerhalb des Tunnelbauprojekts erfolgen soll, ist es in der Regel erforderlich, dass ausgedehnte Zwischenlager geschaffen werden. Schließlich sind Tunnelbauprojekte dadurch gekennzeichnet, dass große Mengen an Ausbruchmaterial zeitlich und räumlich konzentriert anfallen. Selbst wenn ein Industriebetrieb identifiziert worden ist, der einen großen Anteil des Ausbruchmaterials für die Herstellung seiner Produkte einsetzen kann, muss der Materialstrom von der Tunnelbaustelle zum einen gepuffert und zum anderen die Eigenschaften des Materials qualitätsgesichert werden. Dafür werden zusätzliche Zwischenlager-, Beprobungs-, Umschlags- und Materialaufbereitungsflächen benötigt.

Transportwege

Inwieweit Tunnelausbruchmaterial tatsächlich verwertet werden kann, wird maßgeblich durch den Standort der Tunnelbaustelle und die im Umkreis befindlichen potenziellen Verwertungsstellen bestimmt. Schließlich wird die Wirtschaftlichkeit bei der Verwendung von Rohstoffen mit geringem spezifischem Wert [EUR/t] – was auf Tunnelausbruchmaterial zweifelsohne zutrifft – maßgeblich durch die Transportkosten beeinflusst. So stellt auch die verkehrstechnische Anbindung (Straße, Schiene, Wasser) eine nicht zu unterschätzende Rolle in Bezug auf die am Markt erzielbaren Preise. Nach Auswertungen von Resch [45] können für unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten verschiedene Transportentfernungen angesetzt werden, innerhalb derer eine Verwertung zumeist wirtschaftlich möglich ist. In der Planungsphase ist

demnach eine projektspezifische Überprüfung von Verwertungsmöglichkeiten in einem Umkreis von 100 km sinnvoll. Bei Schiffs- oder Bahntransport können unter Umständen auch größere Transportentfernungen noch wirtschaftlich sein.

Liefersicherheit

Insbesondere bei einer externen Verwertung von Ausbruchmaterial spielt nicht nur der Preis eine wichtige Rolle, auch das Thema „Sicherheit der Lieferkette“ gewinnt an Relevanz. Es ist nicht nur von Bedeutung, dass Erzeuger (Angebot) und Verwerter (Nachfrage) sich über die zu liefernde Menge insgesamt einig werden, sondern gerade bei einer hochwertigen ökologischen Verwertung (d. h. Rohstoffsubstitution) muss i. d. R. eine bestimmte Menge zu einem bestimmten Zeitpunkt auch tatsächlich verfügbar sein.

Veränderliche Materialeigenschaften

Der ursprüngliche, ungestörte Boden oder Fels wird im Zuge der Vortriebsarbeiten mehr oder weniger stark verändert, sei es mechanisch (z. B. Verbreiung bzw. Zertrümmerung) oder chemisch (z. B. durch Verunreinigung mit Bentonit bzw. Sprengmittel und Spritzbetonrückprall). Bauvertraglich ist darauf hinzuwirken, dass ein verfahrenstypisches Höchstmaß an Veränderung und Verunreinigung nicht überschritten wird; hierfür sind einzuhaltende geotechnische Eigenschaften und chemische Parameter zu definieren. Zu beachten ist aber auch, dass keine überzogenen Forderungen gestellt werden, die nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand und damit nicht mehr wirtschaftlich erzielbar wären.

4.5.2.5 Klassifizierung der Verwendbarkeit

Alle am Bau Beteiligten sollten sich einig sein, dass für einen optimalen Wertstoffkreislauf eine adäquate Verwertung der anfallenden Materialien zu finden ist. Beispielsweise sollte „hochwertiges“ Betonabbruchmaterial als Zuschlag Verwendung finden, während für Frostschutzmaterial durchaus Tunnelausbruch zum Einsatz kommen kann.

Auch für den Tunnelbau muss sichergestellt werden, dass geeignetes Ausbruchmaterial, also zum Beispiel Kies oder Hartgesteinsbruch, das durchaus als Gesteinskörnung in Betonen Verwendung finden kann, auch tatsächlich als Rohstoffsubstitut eingesetzt wird. Selbst wenn nach KrWG grundsätzlich eine Schonung der natürlichen Ressourcen angestrebt wird, sind dabei technische Möglichkeiten und die wirtschaftliche Zumutbarkeit zu beachten, es muss also keine „Verwertung um jeden Preis“ erfolgen.

Diejenigen Ausbruchmaterialien, die projektintern verwertet werden können oder als „potenziell verwertbar für die Kreislaufwirtschaft“ (externe Verwertung) eingeschätzt werden, sind einer tiefergehen-

den Betrachtungen unter Einbeziehung der örtlichen Marktsituation zu unterziehen. Hierbei ist basierend auf dem Vorschlag aus [46] und der Abfallhierarchie gemäß KrWG eine Einteilung in verschiedene Gruppen zweckmäßig:

▪ **Gruppe 1:** Substitution von Rohstoffen

Die Gruppe 1 umfasst die Verwertung von Ausbruchmaterial innerhalb und außerhalb des Projekts bzw. in Industriezweigen, die sonst andere Rohstoffquellen beanspruchen würden. Wie in [45] dargestellt, gibt es für Tunnelausbruchmaterial aus Fest- und Lockergestein durchaus vielfältige Verwertungsmöglichkeiten:

- Gesteinskörnung für Beton,
- Gesteinskörnung für Tragschichten,
- Gesteinskörnung für Asphaltmischgut,
- Bahnschotter,
- Ziegelton, -lehm,
- Kalkstein als industrieller Rohstoff.

▪ **Gruppe 2:** Verwendung als Boden im Erd- und Verkehrswegebau

Die Gruppe 2 umfasst die Verwendung für erd- und verkehrswegebau technische Zwecke innerhalb und außerhalb des Projekts. Darunter fallen beispielsweise Gesteinskörnungen für Dammbauwerke, für Tragschichten ohne Bindemittel und Lärmschutzwälle. Für die Einstufung in diese Verwendbarkeitsgruppe ist es unerheblich, ob eine Verwendung ohne weitere Veränderung des Materials möglich ist oder ob Maßnahmen zur Aufbereitung erforderlich sind.

▪ **Gruppe 3:** Fakultative Verwendung als Boden im Erdbau

Stehen in einem Projekt große Mengen an Ausbruchmaterial zur Verfügung, welches nicht gemäß Gruppe 1 oder 2 verwertet werden kann, wird dieses häufig in Erd- oder Landschaftsbauwerke eingebaut oder zum Verfüllen von alten Kiesgruben oder Steinbrüchen verwendet, um das überschüssige Material nicht beseitigen zu müssen.

4.5.2.6 Aktuelle Entwicklungen

Positive Beispiele für aktiven Ressourcenschutz stellen Bodenbörsen dar. Die Idee solcher Bodenbörsen ist es, Ausbruchmaterial aus Tunnelvortrieben sowie Bodenaushub aus dem übertägigen Infrastrukturbau wie Kies, Sand, Ton und Naturstein wirtschaftlich zu vermarkten. Ziel ist es nicht nur, natürliche Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu schonen, sondern auch die Baukosten mitunter signifikant zu reduzieren. Schließlich entfallen nicht selten bis zu 15 % (teilweise

bis zu 25 %) der Baukosten auf die Entsorgung des Ausbruchmaterials. Bodenbörsen bieten verfügbares Material auf digitalen Plattformen unter Angabe dezidiert Merkmale an, die für eine Verwertung relevant sind, und unterstützt bei diversen Prozessschritten, vom Vermarktungscheck zur Einschätzung des Materialpotenzials über die Begleitung behördlicher Abstimmungen bis hin zur Logistikplanung über Schiene, Wasser oder Straße zum Abnehmer.

4.5.3 Förderung der Biodiversität

Die Ökosysteme der Flora und Fauna sind sehr anfällig für äußere Einflüsse wie beispielsweise Flächenversiegelung, Umweltverschmutzung oder Klimaveränderungen und dadurch stark gefährdet. Für den Bau aber auch für die Betriebsphase gilt es deshalb, die Auswirkungen unserer Infrastruktur auf die Pflanzen- und Tierwelt und ihre Lebensräume möglichst zu vermeiden oder auf das notwendige Maß zu beschränken. Unvermeidliche Auswirkungen unserer Bauwerke auf die Biodiversität müssen so weit wie möglich durch Ersatzmaßnahmen einen Ausgleich finden, so dass sowohl der Mensch als auch die Flora und Fauna von dem Projekt profitieren.

Insbesondere in urbanen Gebieten hat die Gewinnung von zusätzlichen Grünflächen wesentlichen Einfluss auf die Biodiversität. Das Wohl von Mensch und Natur wird entscheidend von Pflanzen bzw. deren Ökosystemleistungen beeinflusst, z. B. durch Schattenspende, Luftbefeuchtung oder die Bereitstellung ansprechender Umwelt für Freizeit und Erholung. Aus diesem Grund sind großzügig dimensionierte Verkehrsflächen zu reduzieren und zumindest teilweise zu entsiegeln [59]. So gehört es auch zur EU-Biodiversitätsstrategie für 2030, den Flächenverbrauch einzudämmen und Bodenökosysteme wiederherzustellen [60]. Eine Rückgewinnung von Grünflächen, wie dies beispielsweise in Stuttgart mit der Tieferlegung des Fern- und Nahverkehrsnetzes erfolgt ist, liefert dadurch einen positiven Effekt auf die urbane Biodiversität.

Insbesondere lineare Verkehrsinfrastrukturen (Straßen- oder Bahntrassen) haben durch die Zerschneidung von Habitaten und Lebensraumnetzen zahlreiche negative Auswirkungen auf die Biodiversität [62]. Es ist notwendig, bei der Neu- und Ausbauplanung von linearen Infrastrukturen bestehende Vernetzungsbeziehungen so zu erhalten, dass eine Besiedelung und Wiederbesiedelung von Lebensräumen durch Populationen in ausreichender Anzahl und ausreichend oft stattfinden können. Tunnelbauwerke bieten hierzu die Möglichkeit, solche schützenswerten Habitate zu unterqueren und dadurch eine Beeinflussung der Lebensräume auf ein Minimum zu reduzieren. Ein Zerschneiden von Landschaften wird dadurch ebenso vermieden wie Umgebungsstörungen, so dass sich Habitate ungestört erhalten lassen. Insbesondere

Tunnelbauwerke ab einer Länge von 1.000 m stellen eine Unterbrechung der Zerschneidung dar [63].

Nicht immer ist eine Beeinträchtigung von Flora und Fauna zu vermeiden. Kompensationsmaßnahmen bieten in solchen Fällen die Möglichkeit, einen Ausgleich oder Ersatz für unvermeidbare Eingriffe hinsichtlich der Biodiversität zu schaffen. Eine flexible Lösung stellt die Einrichtung sogenannter Ökokonten dar, die basierend auf dem Vorsorgeprinzip Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen schaffen. So lassen sich mit vorgezogenen Maßnahmen zukünftige Beeinträchtigungen zeitlich und räumlich entkoppelt kompensieren. Dabei werden an die Ausgleichsmaßnahmen konkrete Anforderungen hinsichtlich der Wirkungsbereiche gestellt, ohne deren Erfüllung eine Anerkennung nicht möglich ist [64]:

- Verbesserung der Biotopqualität,
- Schaffung höherwertiger Biotoptypen,
- Förderung spezifischer Arten,
- Wiederherstellung natürlicher Retentionsflächen,
- Wiederherstellung und Verbesserung von Bodenfunktionen,
- Verbesserung der Grundwassergüte.

Die aktuellen Herausforderungen bestehen in der vorausschauenden Bereitschaft zur Finanzierung solcher Maßnahmen im Hinblick auf in der Regel noch nicht genehmigte Bauprojekte, obwohl deren Genehmigungsfähigkeit nicht selten an dem Nachweis entsprechender Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen hängt.

Für eine ganzheitliche Betrachtung und auch die Bewertung aller Maßnahmen hinsichtlich einer nachhaltigen Wirkung bedarf es einer Vergleichbarkeit aller Nachhaltigkeitskriterien. Die Biodiversität darf hierbei nicht außen vor bleiben. Allerdings entzieht sich die biologische Vielfalt einer einfachen Beschreibung und Quantifizierung. Im Vergleich zu anderen Nachhaltigkeitskriterien, wie z. B. Lebenszykluskosten oder einer CO₂-Bilanz, lässt sich ihr Wert nur schwer bemessen [65]. Konsistente Systeme, die eine gleichrangige Bewertung ermöglichen, existieren bislang nicht, sollten jedoch zwingend eine Zielstellung für zukünftige Bewertungssysteme darstellen.

4.5.4 Verlängerung der Lebensdauer und Umnutzung

4.5.4.1 Vorbemerkung

Untertagebauten werden in Deutschland auf eine hohe technische Lebensdauer von derzeit in der Regel ca. 100 Jahre ausgelegt. Bauwerke im Bestand aller Verkehrsträger zeigen schon heute z. T. deut-

lich höhere Lebenserwartungen als zunächst angenommen bzw. in Aussicht gestellt (**Abbildung 3-3**). Erneuerungs- und Ertüchtigungskampagnen sorgen dafür, dass sie im Anschluss den aktuellen verkehrlichen, normativen und regulatorischen Anforderungen genügen und ihren Dienst wiederum während kommender Jahrzehnte effizient erfüllen können.

Während die unterirdischen Bauwerke selbst sehr hohe Lebensdauern besitzen, fehlt es den eingebauten Komponenten an genau dieser. In unterirdischen Tunneln und Stationen müssen die maschinentechnischen Anlagen wie Fahrtreppen alle 20 bis 30 Jahre erneuert werden. Zu diesen Anlagen gehören auch Lüftungen, Beleuchtungen, Oberbaumaterialien, Weichenanlagen oder weitere elektrotechnische Einbauten je nach Nutzung des Bauwerkes. Die Erneuerungen dieser Einbaukomponenten hat jedoch stets einen hohen Einfluss auf den Betrieb und die Kapazität der entsprechenden Bauwerke. Robuste Einbauten mit hohen Lebensdauern sind demnach zu bevorzugen, damit die Gesamtanlage ohne Einschränkungen genutzt werden kann.

4.5.4.2 Verlängerung der Lebensdauer

Unterirdische Bauwerke werden regelmäßig inspiziert. Dabei werden Mängel am Bauwerk festgehalten und definiert, inwieweit Maßnahmen nötig werden. Bei diesen Maßnahmen kann man grundsätzlich zwischen instandhalterischen Maßnahmen oder einer Erneuerung unterscheiden.

Im Zuge der Instandsetzung ist die Wiederherstellung des funktionsfähigen Sollzustands durch technische Maßnahmen gemeint. Ist dies nicht mehr möglich, sind Teil- bzw. Vollerneuerungen notwendig. Bei Vollerneuerungen wird das gesamte Bauwerk unter Berücksichtigung aller gültigen Vorschriften wieder hergestellt. Dabei sind im Verkehrssektor vor allem Anforderungen zur Querschnittsgestaltung und des Rettungskonzeptes von Belang, da z. B. die „alten“ Bahn-Tunnel zumeist einer Elektrifizierung bedürfen und den heutigen Sicherheitsvorschriften nicht entsprechen.

Hier muss immer projektspezifisch entschieden werden, in welcher Form eine Erneuerung möglich ist. Grundlage ist immer, welcher Verkehr nach der Erneuerung durchgeführt werden soll. Ob motorisierter Individualverkehr, Eisenbahnverkehr oder Fuß- bzw. Radwege, hier gelten stets unterschiedliche Anforderungen an den Querschnitt und die notwendigen Einbauten.

In Eisenbahntunneln muss zusätzlich betrachtet werden, ob es sich um eine reine Güterzugstrecke oder eine Mischverkehrsstrecke mit Personen- und Güterverkehr handelt. In der objektspezifischen Planung stellt sich dann oft die Aufgabe, die Profile der Bestandstunnel an die heutigen Anforderungen anzupassen (**Abbildung 4-4**). Dabei können bestehen-

de Profile unter Anwendung der Tunnel-in-Tunnel Methode (TiT) [66] aufgeweitet werden oder die Bestandstunnel werden für einen den heutigen Anforderungen genügenden eingleisigen Betrieb aufgeweitet und mit einer zweite Neubauröhre ergänzt.

Grundgedanke des TiT-Konzeptes ist es, dass der Bahnbetrieb eingleisig in Tunnelmitte aufrechterhalten wird (**Abbildung 4-5**, rechts) und zeitgleich die Bauarbeiten zur Erneuerung mit Hilfe eines sogenannten Tunnelaufweitungssystems (TAS, **Abbildung 4-5**, links) stattfinden können. Hierbei wird das TAS kontinuierlich im Arbeitsbereich des Vortriebs mitgeführt. Beispiele hierfür sind die Erneuerung des Petersbergtunnels (Wiederinbetriebnahme 2019) oder die erstmals 1862 in Betrieb genommenen Fachinger und der Cramberger Tunnel. Der Baubeginn dieser beiden Tunnel war im Januar 2023 und die Inbetriebnahme ist für 2027 geplant.

4.5.4.3 Umnutzungen

Es gibt jedoch auch Tunnelbauwerke, bei denen die ursprüngliche Nutzung entfallen ist. Über viele Jahre wurden diese Tunnel verfüllt. In den letzten Jahren ist man dazu übergegangen, sich über Umnutzungen Gedanken zu machen. Die Herausforderung kann hierbei darin liegen, dass sich aufgrund der Umnutzung andere Betreiber und damit Eigentumsverhältnisse einstellen. Diese vertraglichen Regelungen und Übergänge geraten hierzulande oft in das Zentrum der Diskussion und erschweren die Zielerreichung. Beispiele zur Umnutzung von Bestandstunneln befinden sich in **Anhang B**.

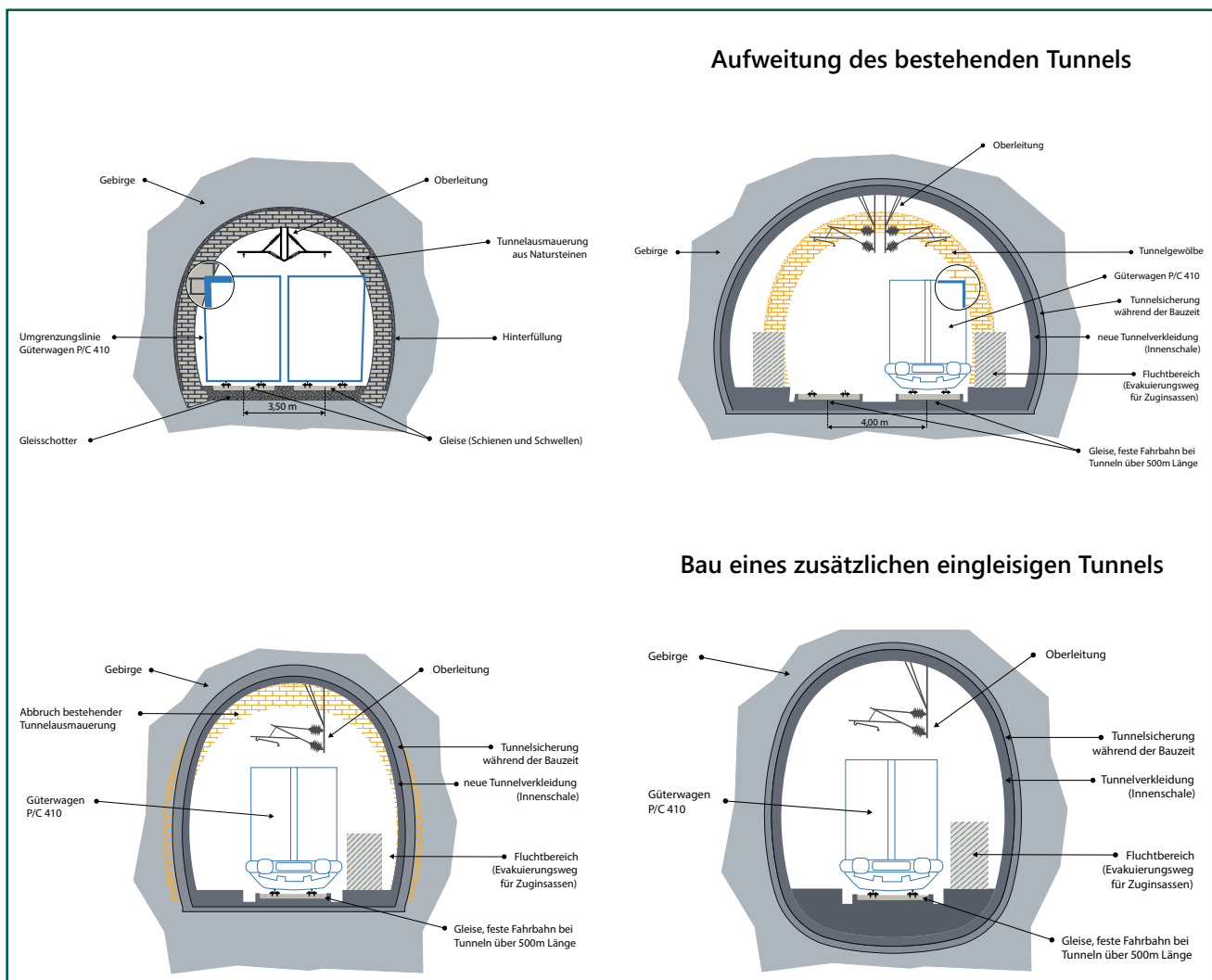


Abbildung 4-4 Varianten von Tunnelaufweitungen [67]



Abbildung 4-5 Erneuerung Fachinger Tunnel: Innenansicht Bestandstunnel mit Tunnelaufweitungssystem (links) und Ansicht Portal (rechts); (Quelle: Porr)

5 Projektbewertung

5.1 Generelle Anmerkungen

Zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Empfehlung sind bereits einige Bewertungsmodelle zur Nachhaltigkeitseinstufung national wie international verfügbar bzw. befinden sich in der Entwicklung oder Ausarbeitung. Zum Teil werden dabei bereits bestehende Ansätze verfeinert – beispielsweise auf Basis der sogenannten Standardisierten Bewertung [74] – oder aber es werden bestehende Methoden aus dem Hoch- oder Infrastrukturbau für den Tunnelbau adaptiert – beispielsweise in Form der Ansätze der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauens (DGNB) [75] oder dem international vor allem im skandinavischen Raum häufig verwendeten Bewertungsmodell BREEAM-Infra [76]. Zudem gibt es derzeit Planungen auf deutscher Bauherrenseite, eigene Methoden und Verfahren zur Nachhaltigkeitsbewertung zu entwickeln, um hierbei vor allem mit Blick auf die Priorisierung von für Deutschland wichtigen Aspekten die Kontrolle über die zur Anwendung gelangenden Methoden zu haben.

Alle diese benannten Bewertungsmodelle haben Vor- und Nachteile und/oder sind – wie beispielsweise die Standardisierte Bewertung (vgl. **Kapitel 5.4.4**) – vor allem für bestimmte Verkehrsträger entwickelt und umgesetzt worden. Derzeit ist allerdings keines dieser Verfahren in seiner Anwendung konkret für unterirdische Bauten konzipiert, was insofern negativ auswirkt, als dass die hohen Lebensdauern dieser Bauwerke und der daraus resultierende Nutzen für das bauliche, netzrelevante und soziokulturelle Umfeld nicht ausreichend berücksichtigt wird. Diese und andere Punkte sind in allen derzeit verfügbaren Bewertungsmodellen unterrepräsentiert, was bei ihrer Anwendung auf unterirdische Infrastruktur zwangsläufig zu Fehleinschätzungen führen muss.

Vor diesem Hintergrund und mit Blick auf die kommenden Entwicklungen hat der DAUB beschlossen, an dieser Stelle Empfehlungen zur Auswahl einer Bewertungsmethodik auszusprechen, nicht jedoch aber eine Methodik zu präferieren und damit andere quasi auszuschließen oder gar eine eigene Methodik zu entwickeln. Allein vor dem Hintergrund, dass die standardisierte Bewertung (vgl. **Kapitel 5.4.4**) für den ÖPNV-Bereich entworfen wurde und hier per Definition zumindest im Hinblick auf die ökonomischen

Aspekte einer baulichen Maßnahme zur Anwendung gelangen muss, können an dieser Stelle kaum weitergehenden Empfehlungen ausgesprochen werden. Die nachfolgenden Ausführungen sind daher als Hinweise zu verstehen, die dem jeweiligen Anwender helfen sollen, eine für sein Projekt und die damit verbundenen Herausforderungen optimale Wahl des Bewertungsverfahrens vor dem Hintergrund des derzeitigen Status Quo vornehmen zu können. Unter Umständen kann dies derzeit auch bedeuten, dass beispielsweise ökonomische Kriterien eines Projektes mit einer Methode wie der sogenannten Standardisierten Bewertung zu beleuchten sind, während andere Aspekte unter Zuhilfenahme von weiterführenden Bewertungsverfahren betrachtet werden. Die Ausführungen in diesem Kapitel liefern zudem die Grundlage für die im nachfolgenden Kapitel 6 dargestellten Analyse der noch zu schließenden Wissenslücken, um unterirdische Bauwerke angemessen und ganzheitlich betrachten zu können.

5.2 Theoretische Ansätze zur Projektbewertung

5.2.1 Allgemeines zur Nachhaltigkeitsbewertung von Projekten der unterirdischen Infrastruktur

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln dargestellt, herrscht international wissenschaftlicher Konsens darüber, dass Nachhaltigkeit im Allgemeinen über die drei Säulen Ökologie, Soziales und Ökonomie abzubilden ist. Im Bereich der Ökologie kommen vor allem Aspekte zum Tragen, die in den **Kapiteln 3 und 4** dieser Empfehlung dargestellt wurden. Im Hinblick auf die ökonomischen Kriterien werden alle im Lebenszyklus anfallenden Kosten betrachtet. Im Fokus stehen demnach die bauwerksbezogenen Lebenszykluskosten, deren Wirtschaftlichkeit und Wertstabi-

lität. Wie auch in den Empfehlungen des DAUB zur Ermittlung von Lebenszykluskosten [2] bei Untertagebauwerken gezeigt, können bei Untertagebauten die Baufolgekosten deren Errichtungskosten um ein Mehrfaches überschreiten, was ein erhebliches Unterscheidungsmerkmal gegenüber sonstigen Hoch- und Infrastrukturbauten darstellt. Angesichts von Lebensdauern von 150 Jahren und mehr, so wie vor allem im Schienennetz zu beobachten, entwickeln sich hier enorme Hebel bei der Nachhaltigkeitsbewertung, und dies bei weitem nicht ausschließlich auf ökonomische Aspekte bezogen.

Soziale Aspekte der Nachhaltigkeit lassen sich überwiegend als weiche Faktoren identifizieren und werden bislang nur bedingt quantifiziert. Hierbei treten neben der Funktionalität des Bauwerks vor allem auch Fragen der Ästhetik und Gestaltung sowie die Aspekte des Gesundheitsschutzes und der Behaglichkeit in den Vordergrund.

Objekte der unterirdischen Infrastruktur erzeugen dabei einerseits Werte im Hinblick auf die Lebensqualität der Nutzer im Umfeld der Bauwerke, beispielsweise durch Verlegung von lärm- und verschmutzungsintensiven Verkehrstrassen in den Untergrund (z. B. Tieferlegung Rheinuferstraße in Düsseldorf, **Abbildung 5-1**). Andererseits können ganze Regionen durch den Anschluss an das überregionale Verkehrsnetz strukturell gefördert und die dortigen Lebensbedingungen verbessert werden (z. B. DB-Schnellfahrstrecken Köln–Frankfurt, Wendlingen–Ulm, Berlin–München, **Abbildung 5-2**). Eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung muss diese Auswirkungen auf der Nutzenseite integrieren, obgleich sich eine „Verrechnung“ dieser Aspekte mit THG-Ausstößen schwierig gestaltet.

Um die Nachhaltigkeitsbewertung eines spezifischen Objekts strukturiert und reproduzierbar durchführen zu können, gelangen national wie international derzeit unterschiedliche Bewertungsverfahren zum

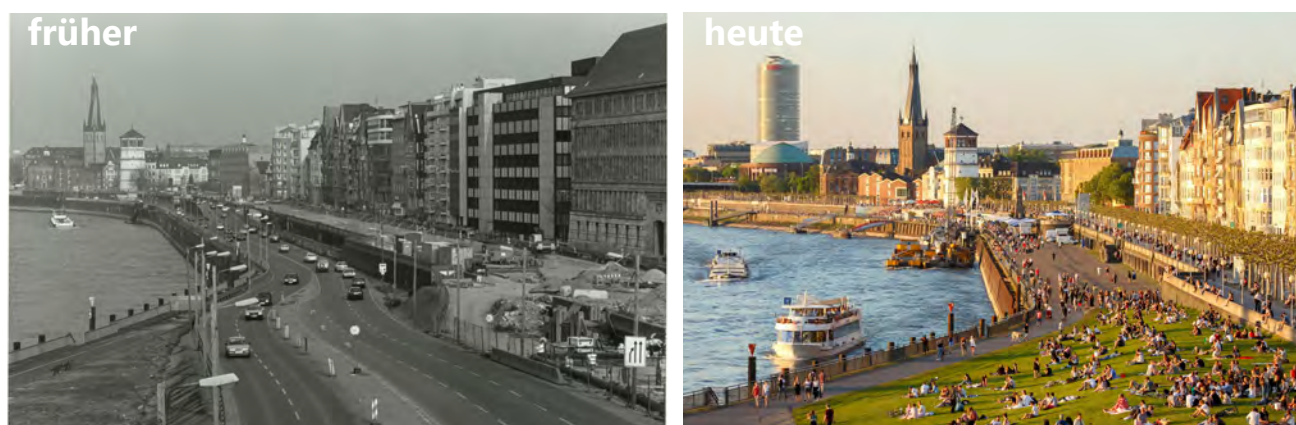


Abbildung 5-1 Düsseldorf Rheinuferstraße früher und heute (Quelle: Landeshauptstadt Düsseldorf/Stadtarchiv (links) und alamy (rechts))



Abbildung 5-2

Projekt VDE 8, ICE ersetzt Flugverkehr auf der Strecke Berlin–München (Quelle: Deutsche Bahn/Frank Barteld)

Einsatz. Die Grundstruktur derartiger Ansätze ist dabei stets gleich:

- Basierend auf einem definierten Bewertungsgegenstand werden Kriterien entwickelt, welche diesen Gegenstand charakterisieren und gleichzeitig die Schutzziele im Sinne der Nachhaltigkeit repräsentieren.
- Jedem Kriterium können dann verschiedenen Indikatoren zugeordnet werden, um das jeweilige Kriterium in seiner Ausprägung zu definieren und zu beschreiben. Beispielsweise lassen sich dem Kriterium "Lebenszykluskosten" Indikatoren wie "Investitionskosten" oder "Betriebskosten" zuordnen.
- Unter Berücksichtigung des Gewichts der Kriterien an der Gesamteinschätzung können dann diese Einzelbewertungen zu kriterienbezogenen Einschätzungen und im Anschluss zu einer Gesamteinschätzung aggregiert werden.

Es bedarf eines hinreichenden Expertenwissens, um die relevanten Kriterien zu identifizieren und mit Hilfe der betreffenden Indikatoren zu versehen. Zudem wird ein globaler Bewertungsmaßstab benötigt, um die jeweilige Ausprägung einzelner Kriterien einzustufen zu können. Dies gilt insbesondere bei der finalen Gesamtbewertung über die Nachhaltigkeit des jeweiligen Objekts. Gemeinhin bezeichnet man einen solchen Maßstab als „Zielsystem“. Eine zentrale Anforderung an ein solches Zielsystem lautet, dass dieses vollständig sein sollte, es also alle relevanten Kriterien und Indikatoren umfassen muss. Gleichzeitig dürfen Auswirkungen nicht doppelt erfasst werden, woraus

sich die Trennschärfe des Zielsystems als weitere Anforderung ableiten lässt.

Weltweit existieren etliche zertifizierte Bewertungsverfahren für Nachhaltigkeitsfragen, die jedoch allesamt mit Fokus auf den Hoch- bzw. den Infrastrukturbau entwickelt wurden. Eine unreflektierte Anwendung solcher proprietären Systeme auf den Untertagebau muss vor dem Hintergrund seiner Randbedingungen Probleme bzw. Fehlinterpretationen und unzureichende Bewertungsmaßstäbe erzeugen. Insbesondere die bereits erwähnten enormen Lebensdauern untertägiger Bauwerke stellen hierbei ein zentrales Unterscheidungsmerkmal dar. Zudem sind derartige Bewertungsverfahren mitunter sehr stark an ökonomischen Aspekten orientiert, da hierauf in der Vergangenheit vor allem der Fokus der Entwicklung lag.

Aus diesem Grund sind auch Bewertungen, die mit für den Hoch- bzw. Infrastrukturbau entwickelten Verfahren vorgenommen wurden, zumindest kritisch zu betrachten. Folgerichtig gibt es derzeit verschiedene Initiativen für die Entwicklung eines tunnelspezifischen Bewertungssystems, die jedoch zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Empfehlungen in vielen Fällen noch nicht vollständig ausentwickelt sind.

5.2.2 Bewertungsmatrix für untertägige Bauwerke

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt indiziert, liegt insbesondere bei untertägigen Bauwerken die Schwierigkeit darin, dass die Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten eine heterogene und multikriterielle Bewertungssituation darstellt. Scharf abgegrenzte Indikatoren – also solche die sich eindeutig quantifizieren lassen (beispielsweise Investitionskosten einer

Maßnahme) – sind mit unscharfen und nur qualitativ bewertbaren Indikatoren ins Verhältnis zu setzen (beispielsweise Steigerung der Lebensqualität der Nutzer bzw. des Umfelds), zumal letztere häufig die zentralen Vorteile untertägigen Bauens beschreiben. Hier muss auf Vollständigkeit bei der Bewertung der entsprechenden Kriterien geachtet werden. Aus diesen Prämissen ergeben sich strukturelle Anforderungen an den Aufbau eines spezifischen Bewertungssystems für Untertagebauten:

- Die Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten sollte idealtypisch flexibel genug sein, um sowohl quantifizierbare wie auch rein qualitativ zu beurteilende Indikatoren gleichermaßen einstufen zu können.
- Nicht monetarisierbare Indikatoren sollten nicht direkt mit monetarisierbaren verknüpft, sondern alleinständig zu einer partikulären Entscheidung aggregiert werden. Dies ermöglicht Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Entscheidungsfindung auch zu einem späteren Zeitpunkt der Betrachtung, beispielsweise im Rahmen eines späteren Audits der Nachhaltigkeitseinstufung.
- Die Darstellung der Bewertung benötigt eine übersichtliche und selbsterläuternde Gestalt, beispielsweise in Form eines dynamisierten Tabellenblatts, damit Einstufungen verschiedener Projekte vergleichbar, stringent und nach gleichen Vorgaben durchgeführt werden können.
- Vor dem Hintergrund der Gleichrangigkeit aller Nachhaltigkeitsthemen sowie der notwendigen Transparenz sollte möglichst eine gleichgewichtete Berücksichtigung der einzelnen Bewertungskriterien in Form einer Bewertungsmatrix angestrebt werden. Eine solche Bewertungsmatrix benötigt eine hinreichende Flexibilität, um auf variierende Randbedingungen eingehen und diese im Zuge der Wichtung berücksichtigen zu können. Beispielsweise sind im Bundesverkehrswegeplan eindeutige Priorisierungen einzelner Kriterien implementiert. Eine Nachhaltigkeitsmethodik, die auch auf die Bauwerke des Bundesfernstraßennetzes angewendet werden soll, muss daher im Stande sein, bei Partikulärbetrachtungen zu gleichen Ergebnissen wie der BVWP zu gelangen.
- Eine Bewertungsmatrix muss so aufgebaut sein, dass mit fortschreitender Planungstiefe auch die Nachhaltigkeitsbewertung fortgeschrieben werden kann, ohne dabei die bisherigen Ergebnisse zu verwerfen. So sollten auch nur Teilbereiche aufgegriffen und eingehender bewertet werden können, wobei Bereiche, die zu einem späteren Zeitpunkt eingehenden Planungen unterliegen (im Untertagebau in vielen Fällen die betriebstechnische Ausrüs-

tung), mit Vorliegen weiterführender Informationen nachgezogen integrierbar sein sollen.

Um diesen Anforderungen zu genügen, lassen sich verschiedene Lösungsansätze formulieren. Beispielsweise wäre die a-priori-Definition von Zielen mit entsprechenden Erfüllungsgraden denkbar oder eine strukturierte Kombination gängiger Bewertungsansätze. Im Folgenden Abschnitt werden daher die Grundlagen zu Bewertungsverfahren erläutert, die in diesem oder ähnlichen Zusammenhängen bereits heute eingesetzt werden.

5.3 Grundlagen zu Bewertungsverfahren

5.3.1 Allgemeines

Unter einer Bewertung ist der Vergleich zweier Zustände zu verstehen, die sich nur in dem zu untersuchenden Vorhaben bzw. der zu applizierenden Maßnahme unterscheiden (*ceteris paribus*-Bedingung). In der Regel bedeutet dies, dass sich für ein zu bewertendes Objekt ein „Mit“- und ein „Ohne“-Fall ergibt, wobei die Auswirkungen der jeweiligen Maßnahme auf das Gesamtergebnis vergleichend beurteilt wird. Grundlage für einen solchen Vergleich ist dabei zumeist das klassische Drei-Phasen-Modell der Bewertung:

- **Phase 1:** Das Zielsystem, in dem festgelegt wird, was mit den erwogenen Vorhaben/Maßnahmen erreicht werden soll
- **Phase 2:** Die Indikatoren, welche als Messgrößen zur Erreichung des jeweiligen Ziels verwendet werden
- **Phase 3:** Die Aggregation der einzelnen Indikatorenwerte über ein Bewertungsverfahren, beispielsweise ein Wertsyntheseverfahren

Bei Zielen (Phase 1) ist zwischen Leistungszielen und Wirkungszielen zu unterscheiden. Ein Leistungsziel ist z. B. ein festgelegter Festigkeitswert einer Innenschale, den es technisch zu erreichen gilt. Die darauf aufbauenden Wirkungsziele beschreiben die Effekte am Ende der Wirkungskette, also z. B. eingesparte CO₂-Emissionen durch den Wechsel von zementgebundenen auf zementfreie Systeme im Beton.

Um die Zielerreichung zu „messen“, werden Indikatoren definiert (Phase 2). Deren Werte können *ex post*, nach Realisierung eines Vorhabens, empirisch erhoben oder gemessen werden, und/oder alternativ *ex ante* auf Basis von Modellen oder Annahmen berechnet oder abgeschätzt werden. Die Berechnung der Indikatoren oder ihre empirische Erfassung werden als Wirkungsermittlung bezeichnet. Bei Ablauf der Bewertungsalgorithmen ist es wichtig zu unterscheiden zwischen:

- Quantitativen Indikatoren (z. B. direkte Kosten einer Maßnahme oder deren THG-Bilanz)
- Quantitativen Indikatoren, für die Wertansätze vorliegen (z. B. Reisestunden mit einem Stundensatz/Geldwert)
- Qualitativen Indikatoren, die nur verbal beschrieben werden können (z. B. Verschönerung des Landschaftsbildes durch untertägige Verbringung der Infrastruktur)
- Qualitativen Indikatoren, die in ein Punktesystem überführt werden können (analog zum Vorgehen bei qualitativen Risikoanalysen für Bauprojekte)

Wertsyntheseverfahren (Phase 3) versetzen den Anwender in die Lage, die einzelnen Indikatorenwerte zu einer Gesamtaussage zusammenzufassen. Das bekannteste Wertsyntheseverfahren ist die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA), die beispielsweise auch im Rahmen der Standardisierten Bewertung angewendet wird. Weitere bekannte und wichtige Wertsyntheseverfahren sind die Nutzwertanalyse (NWA) und die Multikriterielle Analyse. Eine detaillierte Beschreibung des der-Phasen-Modells kann [77] entnommen werden.

Nachhaltigkeitsbewertungen können auf verschiedene Arten durchgeführt werden, wobei sehr häufig eine Einschätzung nicht über den Vergleich zweier Zustände desselben Betrachtungsgegenstands erfolgt, sondern die Einstufung unter Berücksichtigung eines globalen Maßstabs formuliert wird. In diesem Fall bedarf es nicht nur eines Zielsystems auf Ebene der Bewertungskriterien, sondern auch einer globalen Einschätzung darüber, wie sich Nachhaltigkeit letztlich darstellt. Dies kann beispielsweise in Form einer aggregierten Bewertungszahl erfolgen, die dann unter Zuhilfenahme einer Bewertungsskala die Einstufung festlegt. Hierzu bedarf es einer nachvollziehbaren Genese einer solchen Bewertungsskala.

5.3.2 Die Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)

Eine Nutzen-Kosten-Analyse (NKA) stellt alle monetären Kosten eines Projektes den durch dieses Projekt anfallenden monetarisierbaren Projektfolgen (Nutzen) gegenüber. Auf diese Weise werden alle Wirkungen – so auch die externen Kosten und Nutzen – monetarisiert, also in Geldeinheiten ausgedrückt. Das bedingt die Festlegung von monetären Werten für die in quantitativer Form vorliegenden Teilwirkungen gemäß den einzelnen Indikatoren.

Die NKA ist die meistbenutzte Methode zur Bewertung der direkt monetär anfallenden und monetarisierbaren Effekte eines Projekts und wird häufig zur Bestimmung der wirtschaftlichen Effizienz eines Projekts eingesetzt. Durch die Verwendung von idealtypisch wissenschaftlich hergeleiteten Kostensätzen

erfordert die NKA keine Gewichtung zur Aggregation der verschiedenen Indikatoren.

Es ist dabei möglich, die Bewertung auf Basis einer statischen oder einer dynamischen Betrachtung vorzunehmen. Bei einer statischen NKA wird nur ein spezifisches Jahr im Lebenszyklus des Bauwerks betrachtet, während bei einer dynamischen NKA allen zeitlichen veränderlichen Kosten und Nutzen sowie die späteren Auswirkungen des Projekts Rechnung getragen. Später anfallende Effekte werden entsprechend diskontiert. Hierzu können vor allem Methoden der Lebenszykluskostenberechnung verwendet werden, so wie sie auch vom DAUB in seinen entsprechenden Empfehlungen formuliert sind [2].

Eine dynamische Nutzen-Kosten-Analyse erlaubt daher eine viel zuverlässigere Untersuchung der Auswirkungen eines Projektes als eine statische NKA, wobei die systemimmanenten Unschärfen, vor allem bedingt durch die mitunter großen Betrachtungszeiträume, zu berücksichtigen sind.

Vor- und Nachteile der NKA

Der wichtigste Vorteil der NKA ist die direkte Vergleichbarkeit unterschiedlicher Wirkungen durch die Monetarisierung der Bewertungsgrößen. Jeder Effekt drückt sich direkt in einer messbaren Einheit aus und kann dem Vergleichsobjekt gegenübergestellt werden. Dieser Vorteil stellt zugleich aber auch die größte Schwäche der NKA dar: nicht monetarisierbare bzw. quantifizierbare Größen lassen sich durch diesen Ansatz nicht in die Betrachtung integrieren. Eine alleinige Abstützung auf die Ergebnisse der NKA führt daher zu einer unvollständigen Projektbewertung, insbesondere bei Bauwerken der unterirdischen Infrastruktur mit großen Auswirkungen im sozio-kulturellen Bereich. Ein weiterer Nachteil liegt darin, dass durch den Zwang zur Monetarisierung auch solche Auswirkungen fiskalisch bewertet werden, für die keine Marktpreise existieren oder bei denen eine Monetarisierung zwar möglich aber ethisch problematisch ist. Ein Spezialfall dieser Problemstellung lässt sich in der Monetarisierung von Leben finden, beispielsweise in Form der Reduktion von Unfallopfern durch eine Maßnahme. Gleichwohl ist die NKA heute als wichtiger Teil einer Projektbewertung weitgehend unbestritten und wird vielfach extensiv angewendet, beispielsweise im Zuge der Standardisierten Bewertung.

5.3.3 Die Nutzwertanalyse (NWA)

Die Nutzwertanalyse (NWA) ist eine Entscheidungsmethode, die häufig eingesetzt wird, um verschiedene Handlungsalternativen systematisch zu bewerten und zu vergleichen. Sie ist dann besonders nützlich, wenn Entscheidungen nicht nur auf einer einzigen Kennzahl (wie Kosten oder Gewinn) basieren sollen, sondern mehrere qualitative und quantitative Krite-

rien berücksichtigt werden müssen, also auch solche Aspekte zu bewerten sind, die sich nicht monetarisieren bzw. quantifizieren lassen.

Wie auch schon bei der NKA werden hier zunächst die verschiedenen Alternativen oder Optionen, die bewertet werden sollen, identifiziert und beschrieben. Jede Alternative repräsentiert dabei eine mögliche Lösung oder Handlungsmöglichkeit und lässt sich durch eine Liste von Kriterien beschreiben. Anhand dieser werden die Alternativen dann bewertet. In der Regel wird hierzu jedem Kriterium ein Gewicht zugeordnet, das seine relative Bedeutung im Vergleich zu den anderen Kriterien widerspiegelt. Die Gewichtung kann durch Expertenmeinungen, Befragungen oder durch eine diskursive Methode festgelegt werden. Im Zuge der Bewertung lassen sich dann entweder quantifizierte Größen oder qualitativ erfassbare Aspekte beurteilen. Während die quantitative Bewertung dem Grund nach ähnlich zur Vorgehensweise bei der NKA abläuft, gelangen bei der Bewertung qualitativer Aspekte verschiedene Konzepte zum Einsatz.

Für jedes nicht quantifizierbare Kriterium wird hierzu eine Skala entwickelt, auf der die Alternativen bewertet werden können. Diese Skalen können nominal (kategorisch), ordinal (rangbasiert) oder kardinal (metrisch) sein. Kardinale Skalen ermöglichen dabei über eine Umrechnung eine detaillierte quantitative Bewertung, während ordinale und nominale Skalen als qualitative Bewertungen verbleiben. Um die Zielerreichung messen zu können, wird für jedes nicht quantifizierbare Kriterium eine Nutzenfunktion erstellt, die den Nutzen in Abhängigkeit von den Ausprägungen der Kriterien misst. Grundsätzlich wird dabei zwischen drei verschiedenen Arten der Nutzenfunktionen unterschieden:

- Bei **Linearen Nutzenfunktionen** wird angenommen, dass der Nutzen linear mit der Ausprägung des Kriteriums ansteigt.
- **Nichtlineare Nutzenfunktion** werden verwendet, wenn der Nutzen nicht linear mit der Ausprägung des Kriteriums ansteigt. Dies kann z. B. eine konvexe oder konkave Funktion sein, die unterschiedliche Grade der Präferenz für bestimmte Werte darstellt.
- **Diskrete Nutzenfunktion** sind beispielsweise auch aus den qualitativen Risikoanalysen bekannt, wobei hier qualitativen Kriterien diskrete Nutzenwerte über eine vordefinierte Skala zugeordnet werden können (z. B. von „schwach“ über „stark“ zu „sehr stark“).

Die Alternativen werden anschließend anhand der entwickelten Skalen und Nutzenfunktionen bewertet. Jede Alternative erhält für jedes Kriterium einen Nutzwert, der durch die entsprechende Nutzenfunktion berechnet wird. Die einzelnen Nutzwerte der Kriterien werden im Anschluss aggregiert, um einen Ge-

samtnutzwert für jede Alternative zu berechnen. Dies geschieht häufig durch eine gewichtete Summe der Nutzwerte. Nach der Aggregation und Bewertung der Alternativen kann eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um die Robustheit der Entscheidung zu überprüfen. Dabei wird analysiert, wie empfindlich die Ergebnisse gegenüber Änderungen in den Gewichtungen und Nutzenfunktionen sind. Die Alternative mit dem höchsten Gesamtnutzwert wird als die beste Wahl identifiziert. Diese Entscheidung kann dann durch qualitative Überlegungen oder zusätzliche Analysen weiter unterstützt werden.

Vor- und Nachteile der NWA

Die NWA bietet einen strukturierten und nachvollziehbaren Ansatz zur Bewertung und Auswahl von Alternativen. Ihr großer Vorteil liegt in der Möglichkeit, sowohl qualitative als auch quantitative Kriterien berücksichtigen zu können, was die Entscheidungsfindung umfassender und realistischer macht. Durch die explizite Darstellung der Bewertungskriterien und deren Gewichtung wird der Entscheidungsprozess dabei transparent und nachvollziehbar und kann bei hinreichender Dokumentation auch zu einem späteren Zeitpunkt noch nachvollzogen werden. Die Methode ist dabei flexibel und lässt sich an verschiedene Entscheidungssituationen und -kontexte anpassen. Zudem eignet sich die NWA gut für Gruppenentscheidungen, da sie Diskussion und Konsensbildung fördert und Bewertungen aggregiert und konsensual durchgeführt werden können.

Die Bewertung der Alternativen und die Gewichtung der Kriterien sind dabei jedoch oft subjektiv und können von den persönlichen Präferenzen der Entscheider beeinflusst werden. Zudem benötigt die Durchführung einer NWA einen hohen Zeitaufwand und ist für den Bewerter oft mit ressourcenintensiven Prozessabläufen verbunden. Dies gilt insbesondere dann, wenn viele Kriterien und Alternativen zu berücksichtigen sind, was die Handhabung erschwert und zudem auch einer Vielzahl von Kompetenzen bedarf, um vor allem qualitativ zu bewertenden Kriterien korrekt einzuschätzen. Da die Entwicklung von Bewertungsskalen und Nutzenfunktionen oft auf empirischen Prozessen und sogenanntem Expertenwissen fußt, kann es für Außenstehende zudem schwierig sein, die Bewertungen der verschiedenen Kriterien sinnvoll zu skalieren und zu vergleichen. Grundsätzlich gilt auch hier, dass die Qualität der Bewertung stark von der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Daten abhängt, welche ihre Grundlage bilden und die zur Bewertung der Alternativen herangezogen werden.

5.3.4 Multikriterielle Verfahren

Multikriterielle Entscheidungsverfahren (multi criteria decision making, MCDM) sind Methoden zur Unter-

stützung der Entscheidungsfindung, die mehrere, oft widersprüchliche Kriterien berücksichtigen. Diese Verfahren sind besonders nützlich in komplexen Entscheidungssituationen, in denen sowohl qualitative als auch quantitative Faktoren eine Rolle spielen. Multikriterielle Entscheidungssysteme lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen aufteilen: multiobjektive Verfahren und multiattributive Verfahren.

Multiobjektive Verfahren (multi objective decision making, MODM) beschäftigen sich vorrangig mit Problemen, deren Lösungsraum stetig ist. Das bedeutet, dass es sich hierbei um Probleme mit mehreren vorgegeben Zielen handelt, die unter Einhaltung von Restriktionen erreicht werden sollen. Aufgrund dessen werden diese Entscheidungen häufig mit Hilfe von linearer Programmierung gelöst.

Im Vergleich dazu ist der Lösungsraum bei multiattributiven Verfahren (multi attribute decision making, MADM) diskret, d. h. es wird auf Grundlage einer festgelegten Anzahl von Attributen ein Ziel angestrebt. Die Verfahren, die bei MADM-Problemen zum Einsatz kommen, sind zahlreich. Eine Möglichkeit der Klassifizierung richtet sich nach dem Grad der Information des Entscheiders. Die folgende **Abbildung 5-3** gibt einen Überblick über die verschiedenen Verfahren.

Auch die bereits erläuterte Nutzwertanalyse gehört im weiteren Sinne zu den MADM-Verfahren. Die unter **Kapitel 5.3.3** formulierten Grundsätze gelten demnach auch für die MADM-Verfahren. Die Verfahren setzen dabei allesamt voraus, dass der Entscheidungsträger genaue Vorstellungen über Nutzen

und Gewichtung von Kriterienausprägungen hat und wie diese in einem Entscheidungsverfahren zu interpretieren sind. Im Gegensatz zu den erwähnten MADM-Methoden beruhen die Outranking-Verfahren auf der Annahme, dass es dem Entscheidungsträger nicht möglich ist, seine Präferenzen hinsichtlich der Kriterien bereits zu Beginn festzulegen. Durch den Entscheidungsprozess wird eine Strukturierung der Entscheidungssituation generiert. Das Ergebnis ist, dass meist eine größere Auswahl an geeigneten Handlungsalternativen erzeugt wird, so dass nicht unbedingt nur eine optimale Alternative herausgearbeitet werden kann.

Vor- und Nachteile multikriterieller Verfahren

Die explizite Darstellung und Gewichtung der Kriterien machen den Entscheidungsprozess transparent und nachvollziehbar. Dies erleichtert die Kommunikation und Rechtfertigung der Entscheidung bzw. des Bewertungsergebnisses. MADM Verfahren eignen sich besonders gut für komplexe Entscheidungs- und Bewertungsprobleme, bei denen mehrere Faktoren berücksichtigt werden müssen. Die Methoden können an unterschiedliche Bewertungs- und Entscheidungskontexte sowie spezifische Anforderungen angepasst werden, wobei sich verschiedene MADM-Techniken je nach Bedarf verwenden lassen. Einige MADM-Methoden – wie beispielsweise der Analytical Hierarchy Process – können Unsicherheiten und Ungewissheiten in den Daten und Präferenzen der Bewertung berücksichtigen, was die Robustheit der Entscheidungsfindung erhöht. Grundsätzlich sind diese Verfahren

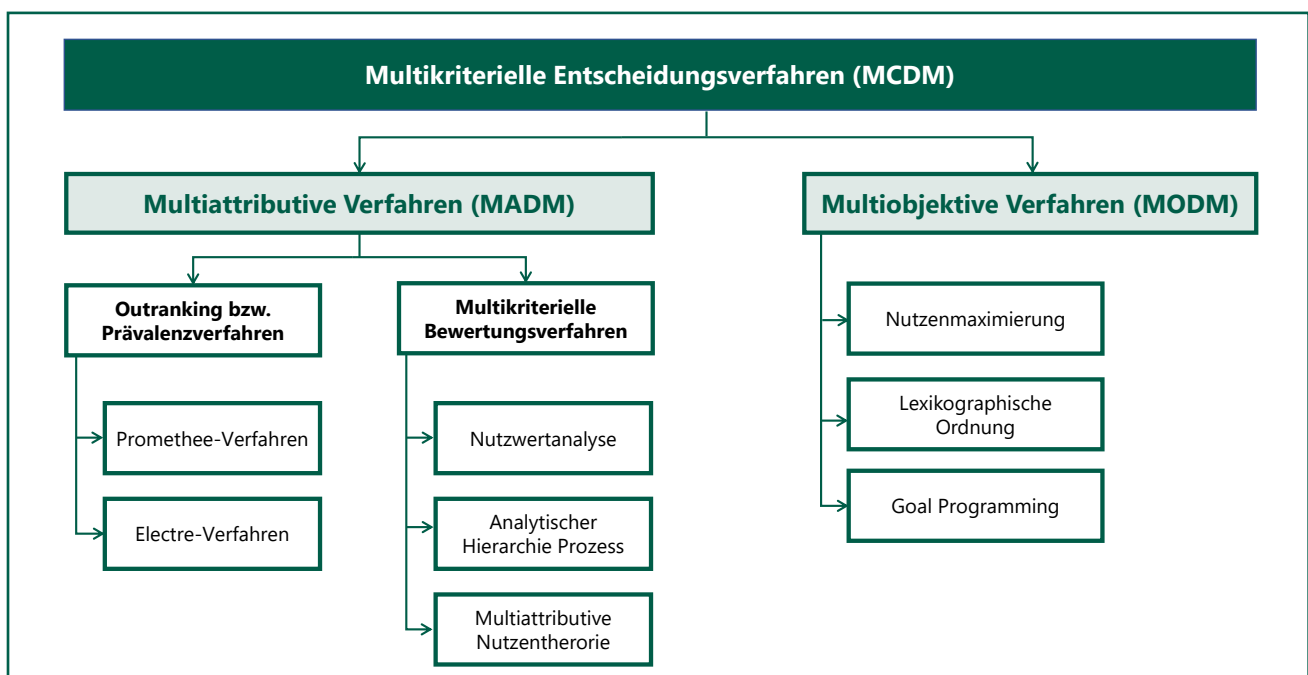


Abbildung 5-3 Multikriterielle Entscheidungsverfahren in der Bewertung von Alternativen [70]

also eine gute Grundlage, um komplexe Bewertungssituation zu bewältigen und zu stringenten Entscheidungen und Bewertungsergebnissen zu gelangen.

Nachteile dieser Verfahren liegen vor allem in ihrer Komplexität, die insbesondere bei einer großen Anzahl von Alternativen und Kriterien überproportional zunimmt. Hieraus ergibt sich häufig die Notwendigkeit zu umfangreichen Datenanalyse und Modellierung, verbunden mit den entsprechenden Aufwänden für den jeweils Ausführenden. Die Auswahl, Gewichtung und Bewertung der Kriterien unterliegt zudem einer starken Subjektivität und ist häufig von den persönlichen Präferenzen und Einschätzungen des Bewertenden beeinflusst. Die Anwendung von MCDM erfordert darüber hinaus oft spezifisches Fachwissen und Erfahrung in der Methodik, was zusätzliche Schulung und Ressourcen erfordern kann.

5.4 Mögliche Bewertungsverfahren für einen Einsatz bei Bauten der unterirdischen Infrastruktur

5.4.1 Allgemeine Hinweise

Im Folgenden wird eine ausgewählte Anzahl von Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden vorgestellt, die derzeit bereits zum Einsatz gelangen oder aber sich in der Entwicklung befinden. Es handelt sich hierbei um eine heterogene Auswahl von methodischen Ansätzen, die ihrerseits jeweils Vor- und Nachteile in der Anwendung mit sich bringen. Die grundlegende Idee hinter der Methodik wird vorgestellt und die Vor- und Nachteile ihrer Anwendung aus Sicht des DAUB formuliert. Abschließend erfolgt eine Einordnung im Hinblick auf die theoretischen Grundlagen von Bewertungsverfahren (vgl. **Kapitel 5.4.8**).

5.4.2 BREEAM Infrastructure

BREEAM Infrastructure, früher bekannt als CEEQUAL (Civil Engineering Environmental Quality Assessment and Award Scheme), ist ein Bewertungs- und Zertifizierungssystem für nachhaltige Infrastrukturprojekte und wird von der BRE-Group vertrieben. BREEAM steht für Building Research Establishment Environmental Assessment Method und ist eines der weltweit führenden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme, das derzeit vor allem in Skandinavien und dem englischsprachigen Raum auch im Bereich des unterirdischen Bauens eingesetzt wird. BREEAM Infrastructure richtet sich speziell an Infrastrukturbauten wie Straßen, Brücken, Tunnel, Wasserbauwerke, Energieinfrastrukturen und andere Großprojekte im Bereich der zivilen Infrastruktur.

Es bewertet die Nachhaltigkeitsleistung von Infrastrukturprojekten in verschiedenen Phasen, von der Planung und dem Design über die Bauausführung

bis hin zum Betrieb. Das hierzu entwickelte System umfasst 8 Kriterien und 221 zugehörige Indikatoren aus den drei Nachhaltigkeitssäulen, welche mit einer vorgegebenen Gewichtung am Gesamtergebnis und einer vorgegebenen maximalen Anzahl von Punkten (Credits), die pro Kriterium vom Projekt erreicht werden können, in die Betrachtung einfließen. Die Anzahl an Credits richtet sich nach der Performance des Projekts gegen vordefinierte Standards und wird durch den jeweiligen Evaluator – der hinsichtlich der Anwendung des Algorithmus von BREEAM geschult wurde – festgelegt.

In Summe entsteht auf diese Weise unter Berücksichtigung der Priorisierung der einzelnen Kriterien eine Gesamteinschätzung vor dem Hintergrund eines vordefinierten Bewertungsmaßstabs. Die Kriterien und Indikatoren sind a priori durch BRE festgelegt, sowie auch die Priorisierungen der einzelnen Kriterien und Indikatoren untereinander. Zudem wird durch BRE das zugehörige Punktesystem zur Verfügung gestellt und die entsprechenden Zertifizierungsstufen formuliert, welche von „Pass“ über „Good“, „Very Good“ und „Excellent“ bis hin zu „Outstanding“ reichen. Der Algorithmus der Bewertung basiert dabei auf den Grundprinzipien einer Nutzwertanalyse, da die Einschätzungen pro Indikator über vordefinierte Nutzenfunktionen in Punkte umgerechnet werden und so eine finale Einschätzung des gesamten Projekts über einen aggregierten diskreten Punktwert erfolgt.

Vor- und Nachteile der Methodik

Grundsätzlich hilft das BREEAM-System dabei, Nachhaltigkeitsprinzipien in den Planungs- und Bauprozess zu integrieren, was zu umweltfreundlicheren und sozialverträglicheren Infrastrukturen führen kann. In Norwegen wird BREEAM mitunter als Projektsteuerungsmethodik verwendet, um die Nachhaltigkeit des Projekts während der Design- und Bauphase zu optimieren, beispielsweise durch Änderung der Konstruktion oder Austausch von Materialien. Durch die Berücksichtigung einer Vielzahl von Nachhaltigkeitskriterien können Projekte so theoretisch an Qualität gewinnen und langfristig wirtschaftlicher und ressourceneffizienter gestaltet werden. Der strukturierte Bewertungsprozess und die klaren Kriterien fördern dabei die Nachvollziehbarkeit bei der Projektbewertung. Die in Deutschland weniger flexiblen vertraglichen Strukturen lassen dieses Vorgehen nicht unmittelbar zu.

Die Zertifizierung nach BREEAM Infrastructure ist mit erheblichen Kosten und administrativem Aufwand verbunden, insbesondere für kleinere Projekte. Die Anwendung der Bewertungsmethodik erfordert ein hohes Maß an Fachwissen und Erfahrung, was Schulungen und spezialisierte Berater notwendig machen kann. BRE bildet hierzu zertifizierte Evaluatoren aus,

die in internen Schulungen auf die Anwendung der Methodik trainiert werden. Trotz standardisierter Kriterien kann es bei der Bewertung zu subjektiven Interpretationen kommen, die die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Ergebnisse beeinträchtigen könnten. Zudem ist nicht klar, ob die definierten Standards und die damit hinterlegten Nutzenfunktionen ohne weiteres auf beispielsweise den deutschsprachigen Raum übertragbar sind.

Generell ist für Außenstehende der Bewertungsablauf und die Zusammenstellung der jeweiligen Kriterien eher intransparent, da eine Beschreibung der Indikatoren fehlt und auch die Entstehung der hinterlegten Nutzenfunktionen nicht dokumentiert ist. Zudem ist zu berücksichtigen, dass BREEAM-Infrastructure zwar bei Tunneln bereits Anwendung findet, an sich aber eher für Brücken und andere Infrastrukturbauten entwickelt wurde und daher die Abbildung der tunnelspezifischen Randbedingungen der Nachhaltigkeitsbewertung nicht in Gänze gelingt.

5.4.3 Envision

Envision ist ein umfassendes Bewertungssystem, das vom Institute for Sustainable Infrastructure (ISI) in den USA entwickelt wurde, um die Nachhaltigkeit von Infrastrukturprojekten zu messen und zu fördern. Seit dessen Einführung im Jahr 2012 ist mittlerweile die 3. Version dieses Bewertungsverfahrens verfügbar. Mit seiner Hilfe sollen insbesondere große Infrastrukturprojekte in den Bereichen Verkehr, Wasser, Energie und Abfallwirtschaft geprüft, bewertet und verbessert werden. Das Verfahren folgt einem klar strukturierten Evaluierungsprozess, wobei die Methodik eine flexible Anpassung an verschiedene Projektphasen und -anforderungen ermöglichen soll. Projekte können zwischen zwei Evaluierungswegen wählen: Path A (Planung und Nachbereitung) oder Path B (Nachbereitung). Die Aufteilung in diese beiden Pfade erleichtert theoretisch die Integration des Systems in verschiedene Projektphasen.

Die Bewertung und Evaluierung basiert auf fünf Kriterien, welche die verschiedenen Dimensionen der Nachhaltigkeit abdecken sollen, und selbst wiederum durch verschiedene Unterkategorien oder Indikatoren hinterlegt sind bzw. hinterlegt werden können. Die Kriterien sind mit einer unterschiedlichen Wichtung an der Ermittlung des Gesamtergebnisses beteiligt, wobei "Natur" mit 23,2 % den größten Anteil ausmacht. Es handelt sich hierbei um folgende Größen (in Klammern der Anteil der Wichtung am Gesamtergebnis):

- Lebensqualität (20 %)
- Führung (8,2 %)
- Ressourcenverteilung (19,6 %)
- Natur (23,2 %)
- Klima und Widerstandsfähigkeit (19 %)

Die Bewertungsmethodik Envisions definiert dabei Zielgrößen, deren Erreichung über ein Punktesystem durch den jeweiligen Evaluator gemessen wird. Ähnlich zur Vorgehensweise bei BREEAM lassen sich so über alle Kategorien hinweg Zielerreichungswerte ermitteln und final zu einer Gesamteinschätzung des Projekts aggregieren, wobei keine diskreten Zahlenwerte aus dem Projekt direkt verwendet, sondern über die verwendeten Zielfunktionen durch den Evaluator in qualitative Größen transformiert werden. Im Rahmen einer finalen Einschätzung lässt sich dann ein Zertifikat für das Projekt erwerben, wobei vier sogenannte "Award level" erreichbar sind, von "Verified" bis hin zu "Platinum", als bestmöglichem Zertifikat ab einer Zielerreichungsquote von 50 %.

Vor- und Nachteile der Methodik

Das Envision Framework fördert theoretisch die Integration von Nachhaltigkeitsprinzipien in den gesamten Lebenszyklus von Infrastrukturprojekten – von der Planung über die Konstruktion bis hin zum Betrieb und zur Instandhaltung. Es deckt eine Vielzahl von Aspekten ab, basierend auf den drei Säulen der Nachhaltigkeit, und fördert eine integrierte Betrachtung von ökologischen, sozialen und ökonomischen Zielen. Das Framework hilft zudem, bei konzertierter Anwendung die Umweltauswirkungen durch Strategien wie Ressourcenschonung, Abfallreduktion und den Schutz von Ökosystemen zu verringern. Indem es auch soziale Dimensionen wie die Schaffung von Arbeitsplätzen und die Verbesserung der Lebensqualität in der Gemeinschaft berücksichtigt, trägt es dazu bei, die sozialen Vorteile von Infrastrukturprojekten zu maximieren.

Im Gegensatz zu BREEAM, das explizit für ex-post Betrachtungen entwickelt wurde, können mit Envision auch ex-ante Beurteilungen durchgeführt werden, wobei die Anwendung des Frameworks zusätzliche Kosten und einen höheren administrativen Aufwand erzeugt. Dies gilt sowohl in der Planungsphase als auch während der Implementierung des Projekts: Es sind zertifizierte Evaluatoren zu beauftragen, die vom ISI hierzu ausgebildet wurden.

Auch Envision wurde nicht explizit für die Randbedingungen unterirdischen Bauens entwickelt und muss daher mitunter Anpassungsprobleme erzeugen, insbesondere vor dem Hintergrund der langen Lebensdauern der Bauwerke. Auch gilt wie schon bei BREEAM, dass die hinterlegten Nutzenfunktionen und die mit den Einschätzungen der Kriterien korrespondierenden Schwellenwerte intransparent und somit nicht nachvollziehbar sind. Dies gilt auch für die Grundlage der Wichtung der Kriterien.

5.4.4 Standardisierte Bewertung

Die Standardisierte Bewertung ist ein Verfahren zur einheitlichen und transparenten Beurteilung von Projekten im öffentlichen Verkehrsbereich, insbesondere von Infrastrukturprojekten wie dem Bau neuer Schienenstrecken oder der Verbesserung bestehender Verkehrssysteme. In Deutschland wird die standardisierte Bewertung hauptsächlich im Kontext des öffentlichen Nahverkehrs verwendet, um die Wirtschaftlichkeit und Förderwürdigkeit von Projekten zu ermitteln. Ihre wesentlichen Merkmale liegen zum einen in der Nutzung eines festgelegten Bewertungsverfahrens, das auf einheitlichen Kriterien basiert. Dies ermöglicht eine vergleichbare Bewertung unterschiedlicher Projekte. Zum anderen steht bei der Standardisierten Bewertung eine Nutzen-Kosten-Analyse im Mittelpunkt, wobei monetäre und nicht-monetäre Kosten eines Projekts dem erwarteten Nutzen gegenübergestellt werden.

Da die Standardisierte Bewertung nicht primär zur Bewertung der Nachhaltigkeit eines Projekts entwickelt wurde, stehen vor allem solche Kriterien im Vordergrund, welche die Effektivität des urbanen Personennahverkehrs beschreiben, wie Reisezeitgewinne, Betriebskosten, Umweltwirkungen, Sicherheit, Raumordnung oder Aspekte der Stadtentwicklung. Das Ergebnis der Bewertung wird in einem Nutzen-Kosten-Indikator (NKI) ausgedrückt. Ein NKI größer als 1 bedeutet dabei, dass der erwartete Nutzen die Kosten übersteigt und das Projekt wirtschaftlich sinnvoll ist.

Vor- und Nachteile der Methodik

Beim Verfahren der Standardisierten Bewertung handelt es sich um ein gewachsenes und im Laufe der Jahre sukzessive weiterentwickeltes Bewertungsverfahren, das insbesondere im Bereich der Bewertung von ökonomischen Aspekten bei ÖPNV-Projekten unumgänglich ist. Hieraus ergeben sich einige Vorteile für den Anwender bzw. den Auftraggeber: Da Prozeduren und Verfahren der Datenerhebung und -erfassung bekannt und vielfach angewendet sind und somit keine Neuerung darstellen, handelt es sich hierbei um eine verlässliche Methodik, die nachvollziehbare und transparente Ergebnisse produziert. Zudem wird durch die Vielzahl von ökonomischen Kriterien eine umfassende Betrachtung des Projekts gesichert.

Im Hinblick auf die ganzheitliche Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten sind jedoch systemimmanent einige Schwachstellen der Methodik zu identifizieren. Zum einen sind die Kriterien auf die Bewertung von Projekten des ÖPNV ausgelegt und die korrespondierenden Monetarisierungen entsprechend entwickelt worden. Aus diesem Grund ist eine Übertragbarkeit auf andere Verkehrsträger, insbesondere auf Bauten der Straßeninfrastruktur, zum jetzigen Zeitpunkt problematisch. Zudem liegt der Fokus der Standardisierten Bewertung auf den ökonomischen

Kriterien des Projekts, was speziell mit Blick auf den Tunnelbau und dessen Nachhaltigkeitsbetrachtung als nicht hinreichend anzusehen ist.

5.4.5 Methodik der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) hat ein umfassendes und anerkanntes Zertifizierungssystem entwickelt, das zur Bewertung und Förderung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Quartieren dient. Derzeit wird an einer Ausweitung der Gültigkeit des Systems auch für Infrastrukturbauten im Allgemeinen und Tunnelbauten im Besonderen gearbeitet. Das DGNB-System zeichnet sich dabei durch eine ganzheitliche Betrachtung aller wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte aus und bietet eine flexible Anwendung auf verschiedene Gebäudetypen und Bauprojekte. Neben der Nachhaltigkeitsbewertung anhand der drei Hauptdimensionen ökologische, ökonomische und soziokulturelle bzw. funktionale Qualität werden dabei zusätzlich auch die technische Qualität, die Prozessqualität und der Standort der baulichen Maßnahme berücksichtigt. Die angewandte Methodik basiert auf multikriteriellen Einschätzungen der jeweiligen Säulen, wobei auch hier im Sinne eines Scorings durch hinterlegte Nutzenfunktionen Erfüllungsgrade definiert sind, die dann zu einer Gesamteinschätzung des Projekts aggregiert werden können. Die DGNB-Zertifizierung erfolgt in vier Stufen, basierend auf der erreichten Gesamtpunktzahl:

- Platin: Höchste Auszeichnung, für Projekte mit sehr hoher Gesamtpunktzahl
- Gold: Hohe Gesamtpunktzahl, sehr gute Erfüllung der Kriterien
- Silber: Gute Erfüllung der Kriterien
- Bronze: Grundlegende Erfüllung der Kriterien

Die DGNB schult sogenannte Auditoren für die Durchführung der Bewertung. Diese definieren für die Projektbeteiligten den notwendigen Umfang an zu beschaffenden Daten und prüfen anschließend die bereitgestellten Unterlagen auf Vollständigkeit und Kohärenz und führen die Bewertung unter Nutzung der DGNB-Methodik durch. Zur Beschaffung der Daten stellt die DGNB Softwarelösungen zur Verfügung, welche die Datenbeschaffung vereinheitlichen und für die Projektbeteiligten vereinfachen sollen.

Vor- und Nachteile der Methodik

Die Methodik der DGNB hat sich in einer Vielzahl von Einsätzen bewährt und stellt ein erprobtes und funktionales Bewertungsverfahren zur Nachhaltigkeitsbewertung dar. Da sich zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Empfehlung die Entwicklung der Bewertungs-

methodik für Infrastrukturbauten und insbesondere für Tunnel noch in der Entwicklung befindet, kann über die Vor- und Nachteile derzeit nur vage geurteilt werden. Wichtig wird hierbei vor allem sein, auch den Nutzen von untertägigen Bauten in die Bewertung zu integrieren, da hier das größte Asset für Bauherren und Nutzer vor dem Hintergrund des Bauwerklebenszyklus liegt.

5.4.6 Methodik der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS)

Das Nachhaltigkeitsbewertungssystem „Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) – Infrastruktur“ ist ein umfassendes Bewertungsinstrument, das zur Förderung nachhaltigen Bauens in der Schweiz vom „Netzwerk Nachhaltiges Bauen Schweiz“ entwickelt wurde. Es wurde auf dem für Hochbauten entwickelten System aufgesetzt und für Infrastrukturbauten weiterentwickelt und berücksichtigt gleichermaßen ökologische, ökonomische und soziale Aspekte für eine ganzheitliche Bewertung von Bauprojekten. Hierzu greift der SNBS auf einen detaillierten Kriterienkatalog zu, der spezifische Anforderungen und Bewertungsmaßstäbe für jedes Kriterium in den drei Dimensionen definiert. Basierend auf dem methodischen Vorgehen einer klassischen Nutzwertanalyse wird jedes Kriterium basierend auf hinterlegten Nutzenfunktionen mit Punkten bewertet und final die Gesamtpunktzahl eines Projekts aus der Summe der Punkte in allen Kriterien aggregiert. Dabei muss ein Mindestpunktwert in jeder Dimension erreicht werden, damit das Projekt insgesamt als nachhaltig gelten kann.

Aufgrund des modularen Aufbaus lässt sich der SNBS für unterschiedliche Arten von Bauprojekten (z. B. Gebäude, Infrastrukturbauwerke etc.) anpassen und ermöglicht so eine flexible Anwendung des Systems. Im Zuge der Bewertung werden Daten zu den einzelnen Kriterien gesammelt und analysiert, wobei hier neben klassisch verfügbaren Daten wie Energieverbräuchen, Materialauswahl oder Baukosten auch Nutzerbefragungen und deren Ergebnisse integriert werden können. Auf Basis der gesammelten Daten wird anschließend jedes Kriterium bewertet und die entsprechenden Punkte vergeben. Die Bewertung erfolgt nach festgelegten Maßstäben und Benchmarks, welche in der jeweiligen Beschreibung des entsprechenden Kriteriums nachvollziehbar dargelegt sind. Die Gesamtpunktzahl und das Erreichen der Mindestanforderungen in jeder Dimension bestimmen abschließend das Nachhaltigkeitsniveau des Projekts. Erfolgreiche Projekte erhalten eine entsprechende Zertifizierung nach dem SNBS.

Vor- und Nachteile der Methodik

Das NNBS legt mit seiner Methodik eine sehr ausgereifte und gut handhabbare Methodik vor, die vor

allem durch die Vollständigkeit der Kriterien über alle Nachhaltigkeitssäulen hinweg besticht. Es stehen umfangreiche Unterlagen zur Beschreibung der Kriterien zur Verfügung, die neben der Einschätzung der Nachhaltigkeit auch eine eindeutige Beschreibung der Anforderungen des Kriteriums bzw. des Indikators enthält. Daneben wird innerhalb der Beschreibung der Kriterien auch dargestellt, inwieweit und für welchen Bereich das jeweilige Kriterium Anwendung findet, beispielsweise im Hinblick auf die Phase des Lebenszyklus des Bauwerk, für die das Kriterium Gültigkeit besitzt.

Als Nachteil der Methode lässt sich identifizieren, dass beispielsweise bei den ökonomischen Aspekten nicht die tatsächlichen Kosten des Projekts berücksichtigt werden, sondern lediglich die Fragestellung, ob und in welchem Umfang beispielsweise Lebenszykluskosten für das Projekt erhoben werden. Exemplarisch: Wird eine solche Erhebung durchgeführt, so gilt dies als positiv, unabhängig von der tatsächlichen Höhe der Lebenszykluskosten. Generell werden so alle Kriterien über ein dreistufiges Bewertungsschema beurteilt. Vor diesem Hintergrund lassen sich Verbesserungen innerhalb der Planung nur bedingt abbilden und führen nicht konsequent zu einer abweichenden Einschätzung von der ursprünglichen Bewertung.

5.4.7 Nachhaltigkeits-Indikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte (NISTRA)

NISTRA wurde durch das schweizerische Bundesamt für Straßen (ASTRA) entwickelt und stellt ein Instrument dar, das die Beurteilung von Straßeninfrastrukturprojekten unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsziele ermöglichen soll. NISTRA bewertet ein Projekt dabei anhand von 42 vorselektierten Indikatoren aus den Bereichen direkte Kosten, Verkehrsqualität, Sicherheit, Siedlungsentwicklung, Umwelt sowie Realisierung und Kohärenz. Diese Indikatoren werden zum Teil in Schweizer Franken monetarisiert, zum Teil über den Umweg von Zielfunktionen quantifiziert und in Wirksamkeitspunkte überführt. Ein Teil der Indikatoren verbleibt aber rein qualitativ und wird über spezifische Skalen umgerechnet und dargestellt.

NISTRA bildet somit die Nachhaltigkeitsbewertung über eine Mischberechnung ab, wobei eine Kosten-Nutzen-Analyse mit einer Kosten-Wirksamkeits-Analyse und einer qualitativen Analyse kombiniert wird. Die einzelnen Einschätzungen verbleiben damit weitestgehend in ihren Einheiten oder werden kohärent auf eben solche umgerechnet und nicht zu einer einzigen Bewertungszahl aggregiert. Ziel hierbei ist es, Interessenkonflikte sichtbar zu machen und somit den Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern Grundlagen zu liefern, die für den politischen Abwägungsprozess verwendet werden können.

Die NISTRA-Bewertungsmethode und das zugehörige Excel-Berechnungsfile (eNISTRA) werden vom ASTRA seit 2003 bei größeren Bau- und Ausbauprojekten von National- und Hauptstraßen angewendet – seit 2023 in der neuesten Fassung NISTRA 2022.

Vor- und Nachteile der Methodik

NISTRA ermöglicht eine umfassende Betrachtung von Straßeninfrastrukturprojekten durch die Einbeziehung ökologischer, ökonomischer und sozialer Kriterien. Dadurch wird Nachhaltigkeit eines Projekts über konkret alle drei Säulen hinweg bewertet und nicht nur der rein technische oder monetäre Aspekt. Ziel ist dabei, den Einsatz von umweltfreundlicher Materialien und Verfahren zu fördern, natürlicher Ressourcen zu schützen. Theoretisch werden über seine Anwendung die Umweltauswirkungen von Straßenprojekten minimiert, etwa durch die Berücksichtigung von CO₂-Emissionen und Ressourcenverbrauch.

NISTRA berücksichtigt dabei nicht nur die Anschaffungs- und Baukosten, sondern auch die Langzeitkosten einer Straße, einschließlich der Instandhaltung und des Rückbaus. Das Verfahren berücksichtigt soziale Auswirkungen, wie die Auswirkungen auf die Lebensqualität der Anwohner, Verkehrssicherheit und Zugangsmöglichkeiten für verschiedene Bevölkerungsgruppen. Durch die Verwendung von standardisierten Nachhaltigkeits-Indikatoren können Projekte objektiv bewertet und miteinander verglichen werden, um eine transparente Entscheidungsfindung zu fördern. Indem die sozialen und ökologischen Auswirkungen in den Vordergrund gestellt werden, kann das Verfahren zudem dazu beitragen, die Akzeptanz von Infrastrukturprojekten in der Bevölkerung zu erhöhen, da es den Nutzen für die Gesellschaft verdeutlicht.

Die Heterogenität des Ansatzes bedingt zugleich aber auch seine Komplexität. Die Bewertung nach NISTRA erfordert eine umfangreiche Datensammlung und eine detaillierte Analyse, was sowohl zeitintensiv als auch kostspielig sein kann. Insbesondere bei großen oder komplexen Projekten kann der administrative Aufwand erheblich sein. Das System wurde zudem nicht mit einem Fokus auf unterirdische Infrastruktur entwickelt, sodass eine Anwendung auf unterirdische Bauten zwar möglich aber im Einzelfall geprüft werden müsste. Für eine vollständige und genaue Bewertung nach NISTRA sind oft spezifische und umfangreiche Daten erforderlich, die möglicherweise nicht immer in der erforderlichen Form oder Qualität verfügbar sind, insbesondere in den frühen Projektphasen.

In Projekten mit komplexen ökologischen und sozialen Auswirkungen kann es zudem schwierig sein, die richtige Gewichtung für jeden Nachhaltigkeitsindikator festzulegen, da NISTRA hier dem Anwender große Freiheiten einräumt. Es besteht daher das Risiko, dass manche Aspekte zu stark oder zu schwach

gewichtet werden, was zu verzerrten Ergebnissen führen kann und dem Grunde nach eine nachgeschaltete Sensitivitätsanalyse erfordert. Diese bedeutet weiteren Aufwand und steigert die Komplexität zusätzlich.

5.4.8 Zusammenfassende Darstellung der betrachteten Bewertungsverfahren

In **Tabelle 2** sind die zuvor betrachteten Bewertungsverfahren aufgelistet und ihrem theoretischen Hintergrund zugeordnet. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine solche Zuordnung nicht immer vollkommen eindeutig ist, weil zum Teil theoretische Ansätze miteinander vermischt werden. Die nachstehende Einstufung stellt somit das Abbild der überwiegend zugrunde liegenden Methodik dar.

5.5 Empfehlung für die Auswahl von Kriterien, Indikatoren und Zielsysteme der Nachhaltigkeitsbewertung im Untertagebau

Die bisherigen Ausführungen der Empfehlung haben im Hinblick auf die zu verwendenden Kriterien vor allem zwei Dinge gezeigt:

- Das untertägige Bauen unterscheidet sich zum Teil erheblich vom allgemeinen Infrastrukturbau hinsichtlich seiner Auswirkungen auf das bauliche Umfeld und die sonstigen gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen. Vor diesem Hintergrund müssen spezifische Kriterien und Indikatoren in der Bewertung Eingang finden, die eben diese Auswirkungen abbilden können und diese Auswirkungen hinreichend beschreiben
- Da jedes Tunnelprojekt sehr spezifisch ist, kann es keinen „vollständigen“ Kriterienkatalog geben, der allgemeingültig auf alle anderen Projekte übertragbar wäre.

Vor diesem Hintergrund wird im **Anhang A** eine Liste mit Basiskriterien zur Verfügung gestellt, welche für die Evaluierung ökologischer, ökonomischer und sozialer Aspekte herangezogen werden kann. Diese dient als Grundlage und ist bei ihrer Anwendung dann um projektspezifische Einflussgrößen geeignet zu erweitern.

5.6 Empfehlungen zur Durchführung von Projektbewertung bei untertägigen Bauten

5.6.1 Allgemeines

Die Durchführung einer Nachhaltigkeitsbewertung für Projekte des untertägigen Bauens umfasst einen systematischen und methodischen Prozess, der da-

Tabelle 2 Übersichtsdarstellung der betrachteten Bewertungsverfahren und ihrer formalen Zuordnung

Verfahren	Methoden		
	NKA	NWA	MCDM
BREEAM		Transformation aller Indikatoren auf einen vordefinierten Maßstab	
Envision		Transformation aller Indikatoren auf einen vordefinierten Maßstab	
Standardisierte Bewertung	Überwiegende Monetarisierung aller Indikatoren		
Methodik der DGNB		Transformation aller Indikatoren auf einen vordefinierten Maßstab	
Methodik der SNBS		Transformation aller Indikatoren auf einen vordefinierten Maßstab	
NISTRA			Mischung von NKA, mit NWA und rein qualitativen Bewertungen

rauf abzielt, die ökologischen, sozialen und ökonomischen Aspekte einer baulichen Lösung umfassend zu bewerten. Dabei spielen vor allem die für untertägiges Bauen spezifischen Randbedingungen eine zentrale Rolle, wie beispielsweise die vergleichsweise hohen Lebensdauern der Bauwerke und die direkten wie indirekten Auswirkungen auf das Umfeld der baulichen Maßnahmen.

Im Folgenden wird exemplarisch die Durchführung einer solchen Bewertung skizziert und auf die spezifischen Aspekte hingewiesen, die für das untertägige Bauen von besonderer Bedeutung sind.

5.6.2 Durchführung der Bewertung

5.6.2.1 Initialisierungsphase

Zu Beginn wird das Projekt in seinen grundlegenden Parametern definiert, einschließlich der Projektziele, des Umfangs und der wesentlichen Anforderungen. Hierbei wird auch die Zielsetzung der Nachhaltigkeitsbewertung festgelegt, die als Grundlage für alle weiteren Schritte dient.

Hierzu ist ein geeigneter Bewertungsrahmen auszuwählen, wie beispielsweise das System der DGNB oder eine vergleichbare Methodik. Die Auswahl des Rahmens erfolgt ganz allgemein basierend auf den spezifischen Anforderungen und Zielen des Projekts sowie den nationalen und internationalen Standards. Für untertägiges Bauen ist dabei im Besonderen zu berücksichtigen:

- Der Bewertungsrahmen muss alle essenziellen Kriterien umfassen, die für die Bewertung des untertägigen Bauens notwendig sind.
- Die dem Bewertungsrahmen zugrunde liegende Methodik muss im Stande sein, Effekte aus dem Bau und Betrieb des Objekts über einen Zeitrahmen von mindestens 100 Jahren abzubilden. Es ist bei der Auswahl einer Methodik daher darauf zu achten, dass transiente Kriterien und Indikatoren, also solche, die mitunter einer zeitlich-veränderlichen Einschätzung unterliegen, entsprechend in die Methodik eingebettet und ihrer Veränderlichkeit über den Lebenszyklus hinweg berücksichtigt werden können. Dies betrifft beispielsweise Umfeldfaktoren des Projekts, wenn sich exemplarisch über die Lebensdauer des Bauwerks hinweg eine sukzessiv ansteigende Verbesserung der Lebensqualität im Umfeld der Maßnahme ergibt.
- Die Methodik muss flexibel genug sein, sodass ein „Mit“- und ein „Ohne“-Fall berücksichtigt werden kann. Dies gilt beispielsweise im Hinblick auf den Vergleich von materialtechnologischen Lösungen, die zu einer Senkung der THG-Emissionen führen. Hier ist es wichtig, Substitute gegen die originären Produkte hinsichtlich ihrer Auswirkung prüfen zu können.
- Die Methodik sollte nicht auf einer reinen Nutzen-Kosten-Basis funktionieren, um schwer quantifizierbare Aspekte des unterirdischen Bauens

(beispielsweise Effekte an der Oberfläche) ebenfalls berücksichtigen und gleichwertig in die Betrachtung einbringen zu können. Idealerweise beruht die Methodik auf einer Mischform aus Nutzwertanalysen und/oder multikriteriellen Ansätzen.

- Es ist wichtig, Projekte ex ante bewerten zu können, also einen Blick in die Zukunft zu ermöglichen. Einige proprietäre Ansätze können lediglich einen Blick ex post realisieren, was gerade für untertägiges Bauen nicht zielführend sein kann.

5.6.2.2 Datenerhebungsphase

In dieser Phase werden alle erforderlichen Daten gesammelt, die für die Bewertung notwendig sind. Dies umfasst bautechnische Daten, Materiallisten, Energieverbrauchsprognosen, Lebenszykluskostenanalysen sowie umweltbezogene Informationen wie Emissionsdaten und Abfallmanagementpläne.

Die gesammelten Daten werden systematisch dokumentiert und aufbereitet. Hierbei wird besonderer Wert auf die Nachweisführung gelegt, um die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Daten zu gewährleisten. Dies umfasst technische Berichte, Zertifikate für Baustoffe, Energieberechnungen und sonstige relevante Dokumente.

Aufgrund der Komplexität von Bauten der untertägigen Infrastruktur empfiehlt sich hier eine Methodik, welche eine strukturierte Erhebung der Daten, idealerweise mit Softwareunterstützung, anbietet. Durch den mittlerweile durch das BMV vorgegebenen Masterplan BIM für den Fernstraßenbau [71] sind einige der Informationen bereits heute in strukturierter Form vorhanden. Eine geeignete Methodik ist idealtypisch im Stande, über Schnittstellen zu den BIM-Modellen essenzielle Informationen zu extrahieren.

5.6.2.3 Bewertungsphase

Die gesammelten Daten werden anhand der Kriterien des ausgewählten Bewertungsrahmens analysiert und bewertet. Jedes Kriterium wird auf der Basis spezifischer Benchmarks und Anforderungen betrachtet und es werden entsprechende Punktzahlen vergeben bzw. Einschätzungen vorgenommen.

Die individuellen Bewertungen der einzelnen Kriterien werden aggregiert, um eine Gesamtbewertung des Projekts zu ermitteln. Hierbei wird darauf geachtet, dass alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökologisch, sozial und ökonomisch) ausgewogen berücksichtigt werden.

5.6.2.4 Audit- und Verifikationsphase

Ein externes Audit wird durchgeführt, bei dem unabhängige Prüfer die erhobenen Daten und die durchgeführte Bewertung überprüfen. Ziel des Audits ist es, die Richtigkeit und Vollständigkeit der Bewertung zu

bestätigen und eventuelle Diskrepanzen zu identifizieren.

Nach dem Audit erfolgt eine Verifikation und Validierung der Ergebnisse. Dies schließt die Behebung von identifizierten Mängeln und die abschließende Bestätigung der Bewertung durch die zertifizierende Stelle ein.

5.6.2.5 Nachbewertungsphase

Nach der Bewertung erfolgt ein kontinuierliches Monitoring des Projekts, um sicherzustellen, dass die Nachhaltigkeitsstandards während der gesamten Lebensdauer des Bauwerks eingehalten werden. Regelmäßige Berichte dokumentieren den Fortschritt und identifizieren Verbesserungspotenziale.

In regelmäßigen Abständen kann eine Re-Evaluierung erforderlich sein, um zu bestätigen, dass das Projekt weiterhin den festgelegten Nachhaltigkeitsstandards entspricht. Dies umfasst eine erneute Datenerhebung, Bewertung und Auditierung.

Die Nachhaltigkeitsbewertung unterirdischer Infrastruktur stellt einen komplexen Prozess dar, der sehr hohe Anforderungen an alle Beteiligten stellt und im Prinzip alle Phasen des Lebenszyklus' des Bauwerks abbilden sollte. Neben der Auswahl der passenden Kriterien und Indikatoren spielt dabei auch die Wahl der optimalen Bewertungsmethodik eine entscheidende Rolle für das Ergebnis.

Mit Blick auf die kommenden Entwicklungen spricht der DAUB zwar Empfehlungen zur Auswahl einer Bewertungsmethodik aus, präferiert aber keine Methodik, um andere nicht auszuschließen.

6 Offene Fragen der Nachhaltigkeitsbewertung und Fazit

6.1 Bewertung des derzeitigen Wissensstandes

6.1.1 Zur Nachhaltigkeitsbewertung und der vorliegenden Empfehlung

Die Ausführungen in den vorhergehenden Kapiteln haben aufgezeigt, dass aus den verschiedensten Gründen eine ganzheitliche, vollständige und seriöse Bewertung der Nachhaltigkeit von unterirdischen Infrastrukturprojekten derzeit kaum möglich ist. Wesentliche soziale und ökologische Aspekte entziehen sich noch einer gleichwertig quantifizierten Bewertung. Mittelfristiges Ziel muss es sein, alle am Bau beteiligten Stakeholder hierzu zu befähigen.

Mit dieser Empfehlung hat der DAUB nun verschiedene Grundlagen zur Erreichung einer solchen Zielsetzung erarbeitet. Neben einer Blaupause für vollständige THG-Bilanzierungen (in Teil 2 dieser Empfehlungen [1]) bei verschiedenen Bauweisen im Tunnelbau werden die Randbedingungen unterirdischer Infrastruktur im Kontext der Nachhaltigkeitsbewertungen aufgezeigt und grundsätzliche Hinweise zur Auswahl von Bewertungsverfahren und der Durchführung von Nachhaltigkeitsbewertungen formuliert.

Gleichwohl sieht der DAUB nach wie vor substanzielle Hürden und Problemfelder, die derzeit noch entsprechend umfassende Bewertungen erschweren. Im Folgenden sollen daher die identifizierten Problemfelder benannt und Hinweise zu ihrer Ausleuchtung formuliert werden. Diese Felder lassen sich den folgenden Themenkomplexen zuordnen:

- Anpassung der politisch-administrativen Randbedingungen
- Weiterentwicklung der methodischen Ansätze der Bewertungsverfahren
- Priorisierung und Wichtung von Kriterien und Indikatoren

6.1.2 Hinweise zur Anpassung politisch-administrativer Randbedingungen

Nachhaltigkeit und ihre Sicherstellung ist eine Herausforderung für alle am Bau beteiligten, die über alle Phasen des Lebenszyklus hinweg gelebt und umgesetzt werden muss. Idealtypisch beginnt daher bereits in den frühesten Phasen der Projekte die Auseinandersetzung mit dem Bauwerk und seiner Herstellung, die Erfassung und Bereitstellung der notwendigen Daten und Informationen sowie die Entwicklung eines Konzepts zur Einbindung des Nachhaltigkeitsgedankens in die Planung. Nur so lässt sich ein möglichst großer Effekt bei der Reduktion der Emission von THG und der Mobilisierung des Nutzens des Bauwerks realisieren. Aus diesem Grundsatz ergeben sich einige notwendige Voraussetzungen für das Zusammenspiel von Bauherren, Planern und Ausführenden, die derzeit so noch nicht erkennbar sind:

- Die politischen und regulatorischen Randbedingungen müssen dergestalt formuliert werden, dass ein ausreichender Spielraum für die Umsetzung innovativer Maßnahmen besteht. Hier sind insbesondere Ministerien, Bezirksregierungen, Genehmigungsbehörden und Infrastrukturbetreiber gefordert.
- Die Schaffung der projektspezifischen Rahmenbedingungen obliegt dem Bauherrn, der a priori die Nachhaltigkeitsziele in Form konkreter Vorgaben für seine Bauwerke definieren und formulieren muss. Hierzu bedarf es vor allem bei den großen Infrastrukturbetreibern einer konzeptionellen Idee,

welche Nachhaltigkeitsziele wie, in welchem Umfang und mit welchen konkreten Effekten für das Umfeld erreicht werden können und sollen.

- Auf Basis dieser Zielsetzungen ist die Planung der Bauwerke zu erstellen. Dies inkludiert zum einen die Definition von konkreten Zielen, beispielsweise bei der Einsparung von THG. Zum anderen müssen künftige Planungskonzepte die Möglichkeiten für Wettbewerb zwischen den Bietern eröffnen, bei denen nicht nur der Preis über die Vergabe entscheidet, sondern auch die konkrete Erfüllung dieser vordefinierten Ziele. Idealtypisch lässt die Planung dabei Raum für die Umsetzung innovativer Lösungen, beispielsweise durch neuartige Bauweisen oder neue Materialkonzepte.
- Hieraus ergibt sich auch die Notwendigkeit zur Novelle und Anpassung der gültigen Vertragskonstruktionen und Vergabemodalitäten. Stand heute ist davon auszugehen, dass beispielsweise das recht starre Konzept der VOB/A schwerlich geeignet ist, Ausschreibungen, die an Nachhaltigkeitsgrundsätzen orientiert sind, abzubilden und geordnet umzusetzen. Hier braucht es konkrete und dezidierte Vorgaben, die nicht nur die Wirtschaftlichkeit des Projekts in den Vordergrund stellen, sondern auch die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitszielsetzungen ermöglichen, beispielsweise durch eine Bewertung der Angebote auf Basis verschiedener gewichteter Kriterien, ohne allerdings die Transparenz und Rechtssicherheit der Vergabe herabzusetzen.

6.1.3 Hinweise zur Weiterentwicklung der methodischen Ansätze von Bewertungssystemen

Die derzeit verfügbaren Bewertungsmethoden haben die bereits in Kapitel 5 dargestellten Schwachpunkte und bislang erfüllt keines vollumfänglich die Anforderungen, die sich aus den Randbedingungen der Bauwerke der unterirdischen Infrastruktur ergeben. Vor diesem Hintergrund lässt sich aber ein Anforderungsprofil entwerfen, dass für künftige Weiterentwicklungen als Vorlage dienen kann. Die wichtigsten Anforderungen lassen sich wie folgt subsumieren:

- Eine Methodik für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung bei unterirdischer Infrastruktur muss derart gestaltet sein, dass mit ihr bereits in frühen Lebenszyklusphasen eine Analyse des Projekts gelingen kann. Methodiken, die nur reine ex-post Betrachtungen ermöglichen, sind hier nicht einsetzbar.
- Der Bewertungsrahmen muss alle essenziellen Kriterien umfassen, die für die Bewertung des unterirdischen Bauens notwendig sind. Dies gilt insbesondere für solche Kriterien, welche den Nutzen des

Bauwerks für das bauliche, soziale und ökologische Umfeld beschreiben.

- Die dem Bewertungsrahmen zugrunde liegende Methodik muss im Stande sein, Effekte aus dem Bau und Betrieb des Objekts über einen Zeitrahmen von mindestens 100 Jahren abzubilden. Es ist bei der Auswahl einer Methodik daher darauf zu achten, dass transiente Kriterien und Indikatoren, also solche, die mitunter einer zeitlich veränderlichen Einschätzung unterliegen, entsprechend in die Methodik eingebettet und mit ihrer Veränderlichkeit über den Lebenszyklus hinweg berücksichtigt werden können. Dies betrifft beispielsweise Umfeldfaktoren des Projekts, wenn sich exemplarisch über die Lebensdauer des Bauwerks hinweg eine sukzessiv ansteigende Verbesserung der Lebensqualität im Umfeld der Maßnahme ergibt.
- Die Methodik muss flexibel genug sein, sodass ein „Mit“- und ein „Ohne“-Fall berücksichtigt werden kann. Dies gilt beispielsweise im Hinblick auf den Vergleich von materialtechnologischen Lösungen, die zu einer Senkung der THG-Emissionen führen. Hier ist es wichtig, Substitute gegen die originären Produkte hinsichtlich ihrer Auswirkung prüfen zu können.
- Die Methodik sollte nicht auf einer reinen Nutzen-Kosten-Basis funktionieren, um schwer quantifizierbare Aspekte des unterirdischen Bauens (beispielsweise Effekte an der Oberfläche) ebenfalls berücksichtigen und gleichwertig in die Betrachtung einbringen zu können. Idealerweise beruht die Methodik auf einer Mischform aus Nutzwertanalysen und/oder multikriteriellen Ansätzen.

Derzeit fehlen vor allem konkrete Ansätze, wie die Effekte im Umfeld der baulichen Maßnahmen korrekt und fair in eine Bewertung einbezogen werden können. Der DAUB empfiehlt hier dringend, durch weitere Forschung den hierzu notwendigen Wissenstand zu schaffen.

6.1.4 Priorisierung und Wichtung von Kriterien und Indikatoren

Dem Grunde nach sind bei Nachhaltigkeitsbewertungen alle Kriterien gleich zu bewerten, also Ökologie, Ökonomie und Soziales. Dies ist aber innerhalb der Kriterien schwerlich – beispielsweise mit Blick auf die verschiedenen Indikatoren des Kriterium „Ökonomie“ – umsetzbar und auch kaum mit bereits bestehenden Bewertungsansätzen in Einklang zu bringen. Beispielsweise umfasst die Methodik, nach der im Rahmen des Bundesverkehrswegeplan die Priorisierung infrastruktureller Maßnahmen erfolgt, eine dezierte Wichtung bestimmter Faktoren und Parameter. Nachhaltigkeitsbewertungen können daher nicht im

„freien Raum“ vorgenommen werden, sondern müssen abgestimmt und quasi „konsensual“ mit anderen Bewertungssystemen ausgeführt sein. Auch dürfen Indikatoren und Kriterien in ihrer Wichtung nicht vollkommen dem Anwender überlassen sein, damit die Wahrung der übergeordneten Zielsetzung ermöglicht wird und eine Nachhaltigkeitsbewertung nicht völlig subjektiv gerät.

Der DAUB empfiehlt daher eine Abstimmung zwischen den großen Infrastrukturbetreibern und die Festlegung von Bewertungshorizonten, Grenzwerten und Wichtungen vor dem Hintergrund eines festgelegten Sets von Kriterien und Indikatoren. Auch hier besteht ein dringender Handlungs-, Forschungs- und Regelungsbedarf.

6.2 Fazit

Mit der vorliegenden Empfehlung hat der DAUB ein umfassendes Werk zur Bewertung von Nachhaltigkeitsfragen bei unterirdischer Infrastruktur zur Verfügung gestellt. Neben der Aufarbeitung des Status Quo bei der Beschreibung von nachhaltigen Effekten im baulichen Umfeld geht die Empfehlung weit über bisherige Papiere zum Thema hinaus. Herzstücke sind vor allem die Erarbeitung und die Umsetzung einer exemplarischen THG-Emissionsberechnung für verschiedene Bauverfahren (siehe Teil 2 der Empfehlung) sowie die Beschreibung von Wegen, wie das unterirdische Bauen insgesamt nachhaltiger werden kann. Diese Ansätze lassen sich wissenschaftlich und technisch weiterverfolgen und münden idealtypisch in konkreten Maßnahmen auf künftigen und aktuellen Baustellen der unterirdischen Infrastruktur.

Darüber hinaus werden Entscheidungshilfen zur Auswahl von Bewertungsverfahren formuliert und Aspekte aufgezeigt, bei denen das unterirdische Bauen schon heute essentielle Beiträge zur Nachhaltigkeit leistet. Diese gehen vielfach weit über das hinaus, was in vorhandenen und verfügbaren Bewertungsverfahren zur Nachhaltigkeitsbetrachtung abgebildet wird. Die Beiträge zur Nachhaltigkeit werden zudem häufig nicht in die Betrachtung integriert, da sonstige Ingenieurbauwerke hier zumeist keine Effekte erzeugen, beispielsweise im Hinblick auf die Verbesserung der Lebensqualität an der Oberfläche durch die Verlegung einer Trasse in den Untergrund. Im Umkehrschluss gilt, dass nachhaltige Effekte des unterirdischen Bauens vor allem über vergleichsweise lange Zeiträume wirken und sich zudem substantiell von dem unterscheiden, was beispielsweise durch Brücken oder oberirdische Verkehrswege generiert werden kann. Deshalb müssen diese Beiträge zukünftig zwingend gleichrangig bei der Bewertung berücksichtigt werden.

Es ist daher ein wesentliches Ziel des DAUB, die vorgelegte Empfehlung fortzuschreiben und mit ei-

nem künftig erzielten Erkenntniszugewinn zu erweitern und/oder anzupassen. Vor diesem Hintergrund ergibt sich auch eine der zentralen Forderungen dieser Empfehlung, Bewertungsverfahren zur Verfügung zu stellen, die sich an diesen Randbedingungen orientieren und so eine objektive, nachvollziehbare und fachlich fundierte Einschätzung ermöglichen. Dabei ist zu beachten, dass weitere DAUB-Empfehlungen, wie beispielsweise die für die Ermittlung von Lebenszykluskosten oder die zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial komplementär zu dem vorliegenden Papier zu sehen sind. Sie ergänzen den Gegenstand dieser Ausarbeitung logisch um Hinweise zu ökonomischen und ökologischen Fragestellungen bei der Nachhaltigkeitsbilanzierung. Es ist denkbar, dass dieses Gesamtbild durch weitere noch folgende Empfehlungen ergänzt wird.

Die wesentliche Erkenntnis ist, dass Nachhaltigkeit und die Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen zwar miteinander verwoben, aber trotzdem alles andere als deckungsgleich sind. Bauwerke mit höheren THG-Emissionen können absolut betrachtet nachhaltiger als konkurrierende Lösungen sein. Grund hierfür ist, dass eventuelle Nachteile im Bereich der THG-Emissionen – die derzeit einen dominierenden Anteil der öffentlichen Diskussion einnehmen – über ökonomische, soziale oder andere ökologische Aspekte im Sinne der ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtung kompensiert werden können.

Daher wird eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbetrachtung bereits im Rahmen der Auswahl der Vorzugsvariante in der Vorplanung empfohlen.

7 Verweise

- [1] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB); Empfehlungen Nachhaltigkeit im Tunnelbau Teil 2: Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase, Köln, 2025
- [2] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB); Empfehlungen für die Ermittlung von Lebenszykluskosten für Tunnel, Köln, 2023
- [3] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB); Empfehlung „Verwertung von Tunnelausbruchmaterial“, Köln, 2024
- [4] Rio-Erklärung über Umwelt und Entwicklung; <https://www.un.org/Depts/german/conf/agen-da21/rio.pdf>
- [5] United Nations Framework Convention on Climate Change <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>
- [6] United Nations Convention on Biological Diversity <https://www.cbd.int/doc/legal/cbd-en.pdf>
- [7] United Nations Climate Change Conference, “The Paris Agreement to the United Nations Framework Convention on Climate Change”, COP 21, 2018 https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf
- [8] United Nations, “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development,” Resolution Adopted by the General Assembly, 2015. <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- [9] European Commission, Directorate-General for Communication, “European green deal: delivering on our targets”, Publications Office of the European Union, 2021. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/green-deal-industrial-plan_de
- [10] Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>
- [11] Deutsche Bundesregierung, Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, Weiterentwicklung 2021 <https://www.publikationen-bundesregierung.de/resource/blob/2277952/1875176/9b7154e-5739ecc19a2d1520d2a94a2c3/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-2021-langfassung-download-bpa-data.pdf?download=1>

- [12] EU, JRC for policy report, GHG emissions of all world countries, 2023 Report https://edgar.jrc.ec.europa.eu/booklet/GHG_emissions_of_all_world_countries_booklet_2023report.pdf
- [13] Umweltbundesamt, Berechnung der Treibhausgasemissionsdaten für das Jahr 2022 gemäß Bundesklimaschutzgesetz, Begleitender Bericht, Kurzfassung vom 15. März 2023, Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/vjs_2022_-_begleitbericht_final_kurzfassung.pdf
- [14] Leopoldina, Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten, Factsheet Version 1.1, 2021
- [15] BMBF, Ariadne-Hintergrund, Das deutsche Klimaschutzgesetz: Möglichkeiten einer sektorübergreifenden Klimagovernance, Potsdam 2021 <https://ariadneprojekt.de/publikation/klimaschutzgesetz-sektorübergreifende-klimagovernance/>
- [16] Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2019, Bundestags-Drucksache 19/14337 in der mit Bundestags-Drucksache 19/15128 geänderten Fassung
- [17] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland, BBSR-Online-Publikation Nr. 17/2020
- [18] Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2023 nach KSG, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2024_03_13_em_entwicklung_in_d_ksg-sektoren_thg_v1.0.xlsx
- [19] BAU-Industrie – Aktuelles Zahlenbild, Ausgabe 421
- [20] Statistisches Bundesamt DESTATIS, Tätige Personen und Umsatz der Betriebe im Baugewerbe, <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Baugewerbe-Struktur/personen-umsatz-baugewerbe-2040510227005.xlsx>
- [21] Schäfer, Martin: Tunnelbau in Deutschland: Statistik (2022/2023), Analyse und Ausblick, Tunnel 1/2024
- [22] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.); Dekarbonisierung von Zement und Beton – Mindestungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [23] Höltschi, René; Auch Deutschland setzt auf CO₂-Speicherung, Neue Zürcher Zeitung, 27.02.2024
- [24] Umwelt Bundesamt, Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen), <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#bau-abbruch-gewerbe-und-bergbauabfalle>
- [25] Secretariat of the Convention on Biological Diversity – United Nations Environment Programme – 2011 Convention on Biological Diversity (CBD)
- [26] World Economic Forum, The Global Risks Report 2023, 18th Edition, Cologny/Geneva <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/in-full/1-global-risks-2023-today-s-crisis/>
- [27] Bundesamt für Naturschutz, Artenschutz-Report 2015 – Tiere und Pflanzen in Deutschland, Bonn https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-04/Artenschutzreport_Download.pdf
- [28] <https://www.bmu.de/themen/artenschutz/nationaler-artenschutz/ursachen-der-bedrohung#:~:text=Frei%20lebende%20Tier%2D%20und%20Pflanzenarten,Zerschneidung%20und%20Flächenverluste%20natürlicher%20Lebensräume>
- [29] NABU/BCG, Wirtschaften im Einklang mit der Natur – Handlungswege zur Sicherung der Biodiversität, Berlin, 2020 <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/biodiv/200923-nabu-bcg-studie-biodiv2.pdf>
- [30] Europäische Kommission, Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa, Brüssel, 20.09.2011, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0571&from=EN>
- [31] <https://www.umweltbundesamt.de/bild/anstieg-der-siedlungs-verkehrsflaeche>
- [32] Bundesamt für Naturschutz, Bundeskonzept Grüne Infrastruktur, Fachgutachten TU Berlin und Universität Kassel, 2017, <https://www.bfn.de/sites/default/files/2023-07/Skript457.pdf>
- [33] Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG), §10 Veräußerung von Emissionszertifikaten, Abs. 2
- [34] Sustainable Bavaria (o.J.) Ziff. 3: Einpreisung und Bewertung von Klimaauswirkungen. München: Bayerische Ingenieure-Kammer-Bau.
- [35] Püstow, M. et al. (2023): Impulspapier Klimaverträgliches Bauen mit einem Schattenpreis für CO₂-Emissionen. Wien: KPMG Law; Berlin: Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e. V.
- [36] <https://www.mass.gov/info-details/the-big-dig-project-background>

- [37] Massachusetts Turnpike Authority: „Transportation Impacts of the Massachusetts Turnpike Authority and the Central Artery/Third Harbor Tunnel Project“, Volume I, February 2006, Boston, USA
- [38] <https://www.rosekennedygreenway.org/>
- [39] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-landschaftszerschneidung#die-wichtigsten-fakten>
- [40] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1084696/umfrage/prognose-der-nachfrage-nach-urbanen-mobilitaetsleistungen-weltweit/>
- [41] VDV (Herausgeber): Stadtbahnsysteme – Grundlagen-Technik-Betrieb-Finanzierung; Buch der blauen VDV-Reihe; Juni 2014; S. 32
- [42] Datensatz DB Netz AG, 2022 (nicht veröffentlicht)
- [43] Bundesverkehrswegeplan 2030, Stand 03/2016, Bundesministerium für Digitales und Verkehr
- [44] Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel, Ausgabe 1998, Bundesministerium für Verkehr
- [45] Resch, Daniel; Verwendung von Tunnelausbruchmaterial – Entscheidungsgrundlagen Montanuniversität Leoben, 2012
- [46] Thienert C.; Breitsprecher G.; Budach C.; Entsorgungskonzepte für Tunnelausbruchmaterial: Innovative Ansätze für Ressourceneffizienz und Praxisbeispiele, In: Forschung + Praxis, Tagungsband zur STUVA-Tagung 2019, S. 209–215, 2019
- [47] Haist et al. (Haist, Michael; Bergmeister, Konrad; Curbach, Manfred; Forman, Patrick; Gaganelis, Georgios; Gerlach, Jesko; Mark, Peter; Moffatt, Jack; Müller, Christoph; Müller, Harald; Reiners, Jochen; Scope, Christoph; Tietze, Matthias; Voit, Klaus), Betonkalender 2022, S. 421–531: Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton, Februar 2022
- [48] Haist M.; Moffatt J.S.; Breiner R.; Vogel M., Müller H. S.: Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) Heft 10
- [49] Proske T.; Rezvani M.; Palm S.; Müller C.; Graubner C.-A.: Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone. Cement and Concrete Composites (2018) 89, S. 107–119
- [50] 45 % CO₂-Reduzierung bei der Zementproduktion für Stuttgart-21-Tunnelprojekt. Tunnel 06/2022 (2022)
- [51] Vogt O.; Ukrainczyk N.; Koenders E.: Geopolymere als Spezialbaustoff. Nachrichten aus der Chemie 65 (12), S. 1198–1202
- [52] Uebachs S.: Geopolymerbeton und seine Eigenschaften. BetonWerk International, 2, 42–46, 2018
- [53] Vollmann G., Thienert C., Budnik J., Kleen E.: Entwicklung eines geopolymerbasierten zementfreien Spritzbetons, Tagungsband zur STUVA-Tagung 2021
- [54] Coenen, M., Beyer, D., Heipke, C., Haist, M. (2022): „Learning to Sieve: Prediction of Grading Curves from Images of Concrete Aggregate“, in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, pp. 227–235.
- [55] Thienert, C.; Klaproth, C.; Otterbein, R., Ludwig, F. (2017): „Entwicklung und Erprobung eines Online-Messsystems zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Zementsuspensionen beim Düsenstrahlverfahren“, AZ 32564/01, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
- [56] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB); Empfehlungen für den Entwurf, die Herstellung und den Einbau von Tübbingringen, Köln, 2024
- [57] „Innovative use of industrial robots in partially automated segment production“ in Geomechanics and Tunnelling 16, No. 2, Ernst & Sohn GmbH, 2023
- [58] Bilger C.; Grundlagen/Anforderungen Tunnelabwasserbehandlung, Konferenz der Vorsteher der Umweltämter (Schweiz), 2017, https://www.kvu.ch/getdownloadfile.cfm?file-name=180409065659_Bericht_WS_Tunnelausbruchmaterial_2017_Stand_2018_03_08.pdf
- [59] Technische Universität München (2018): Leitfaden für klimaorientierte Kommunen in Bayern
- [60] Europäische Kommission (2020): EU Biodiversity Strategy for 2030
- [61] Schweizer Radio und Fernsehen (SRF, 2023): Gotthardtunnel: Ausbruchmaterial wird in Urnersee gekippt
- [62] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV, 2014): Das Bundesprogramm Wiedervernetzung
- [63] Bayrisches Landesamt für Umwelt (LfU, 2006): Darstellung und Analyse der Landschaftszerschneidung in Bayern (Endbericht)
- [64] Land Baden-Württemberg (2010): Verordnung des Umweltministeriums über die Anerkennung und Anrechnung vorzeitig durchgeführter Maßnahmen zur Kompensation von Eingriffsfolgen (Ökokonto-Verordnung, ÖKVO)

- [65] OECE (2002): Handbuch zur Bewertung der biologischen Vielfalt: Ein Leitfaden für Entscheidungsträger
- [66] Ril 853.8003: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten - Richtlinie Instandsetzung, Teil- und Vollerneuerung von Tunnelbauwerken, DB InfraGO AG, Version 1.1, 15.04.2024
- [67] <https://www.hagen-siegen-hanau.de/der-weg-zu-den-tunnelvarianten>
- [68] Wittke, Walter; Wittke, Martin: "Einsparungen von CO₂-Emissionen und Kosten mit einschlägigen konventionellen Tunnelbauweise" in "8. Felsmechanik- und Tunnelbautag", S. 150), 2023
- [69] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz, KrWG): § 6 Abfallhierarchie
- [70] Kamarianakis, Sissis; Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2013: Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur
- [71] BMVI, Masterplan BIM Bundesfernstraße, Berlin, 2021
- [72] Brilon, Werner; Lemke, Kerstin: Verkehrssicherheit in Straßentunneln. In: Bauingenieur (79), 2004, S. 286-290
- [73] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, Österreich: Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen 1999–2023, Stand: 18. September 2024
- [74] Bundesministerium für Verkehr: Standardisierte Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen im öffentlichen Personennahverkehr Version 2016+, Berlin, 2023
- [75] Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen: Entwurf zur Nachhaltigkeitsbewertung von Tunneln, unveröffentlicht, 2024
- [76] BRE-Group: BREEAM Infrastructure – Technical Manuals (Version 6), Watford, England, 2025
- [77] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen – Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: Hinweise zu Einsatzbereichen von Verfahren zur Entscheidungsfindung in der Verkehrsplanung (2010)



Anhänge

ANHANG A: Kriterien und Indikatoren für Nachhaltigkeitsbewertungen

Im Folgenden werden im Rahmen von Tabellen Indikatoren für die drei Säulen/Kriterien der Nachhaltigkeit „Ökologie, Ökonomie und Soziales“ zusammengestellt, die bei einer Betrachtung und Bewertung zu berücksichtigen sind. Diese sind projektspezifisch um lokale Effekte und Einschätzungen zu ergänzen, stellen aber in dieser Form ein Grundgerüst für den Bewertungsgang dar. Nachfolgende Hinweise sind dabei zu berücksichtigen:

- Wie bereits im Hauptteil der Empfehlung ausgeführt, lassen sich einige Indikatoren bereits hinreichend durch entsprechende Modelle hinterlegen, um den konkreten Einfluss auf die Nachhaltigkeit exakt zu quantifizieren. Andere sind derzeit noch nicht bzw. nur sehr begrenzt abbildbar und werden sich auch langfristig nur begrenzt quantifizieren lassen. Die kombinierte Betrachtung beider Typen setzt also sowohl eine entsprechend angepasste Methodik voraus wie auch die eingehende Beschäftigung mit den weichen Indikatoren und einer geeigneten Modellierung ihrer Ausprägung.
- Einige Indikatoren beschreiben Effekte, die über den Wirkungsbereich der jeweiligen Kriterien hinausgehen können. Beispielsweise kann die Steigerung der Lebensqualität im Umfeld einer baulichen Maßnahme Rückkoppelungen im Hinblick auf ökonomische Aspekte haben, wie beispielsweise die Grundstückskosten im urbanen Umfeld. Hier ist scharf zwischen rein monetären und eher weichen Aspekten wie dem Wohlbefinden der Anwohner zu trennen.
- Nachhaltigkeitsbewertungen finden nicht entkoppelt von legislativen und normativen Vorgaben statt. Vor diesem Hintergrund sind die Indikatoren mitunter an die Vorgaben des Gesetzgebers oder des Infrastrukturbetreibers anzupassen. Beispielsweise korrespondieren einige Indikatoren mit denen des Bundesverkehrswegeplans, der für die Ingenieurbauwerke von Verkehrsinfrastrukturen verbindlich ist. Im konkreten Fall ist hier die Kohärenz mit diesen Vorgaben sicher zu stellen, um abweichende bzw. variierende Bewertungen bei partikulären Indikatoren zu vermeiden.
- Wie schon im Hauptteil der Empfehlung ausgeführt, können einige der Aspekte durch bereits heute veröffentlichte DAUB-Empfehlungen ausgeleuchtet werden. Dies gilt insbesondere für die Bereiche der Ermittlung von Lebenszykluskosten sowie zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial. Es wird dringend empfohlen, sich im Bewertungsgang an diesen zu orientieren.

Tabelle 3: Ökologische Indikatoren für eine Nachhaltigkeitsbewertung bei unterirdischer Infrastruktur

Ökologie		
Indikator	Indikatorebene 2	Einheit
Emission	Lärm	dB(A)
	Staub	g/m ³
	Erschütterungen	mm/s
Abfälle	belastet	t
	unbelastet	t
Aushub ¹⁾	Verwertung auf der Baustelle	t
	Verwertung mit sonstig. ökologischem Nutzen	t
	Beseitigung	t
Flächenbeeinflussung	Nutzflächen und Wälder	ha
	Zerschneidung	ha
	Versiegelung	ha
Wasserhaushalt	Verschmutzung des Grundwassers	[–] ²⁾
	Einfluss auf den Grundwasserhorizont	[–] ²⁾
	Wasserverbrauch	m
THG-Emissionen	Herstell- und Errichtungsphase	t CO ₂ e/a
	Nutzungsphase	t CO ₂ e/a
Energieverbrauch	Herstell- und Errichtungsphase	kWh
	Nutzungsphase	kWh
Artenschutz	Beeinflussung von Lebensräumen	[–] ²⁾
	Einwirkung auf Flora und Fauna	[–] ²⁾
¹⁾ Siehe hierzu auch [3] ²⁾ Für die genaue Erfassung und Beschreibung der Einflüsse wird die Konsultation der einschlägigen Fachliteratur empfohlen.		

Tabelle 4: Ökonomische Indikatoren für eine Nachhaltigkeitsbewertung bei unterirdischer Infrastruktur

Ökonomie		
Indikator	Indikatorebene 2	Einheit
Lebenszykluskosten Bauwerk ³⁾	Herstell- und Errichtungsphase	€
	Nutzungsphase	€
	Investitionen	€
Attraktivitätssteigerung	Grundstückspreise	€
	Steuermehereinnahmen	€
Verkehrliche Effekte	Reduktion von Reisezeiten	€/h
	Reduktion von Staurisiken	€/h
Sekundäreffekte aus Verkehrsumlagerung	Reduktion von Instandhaltungskosten	€
	Einnahmen aus Infrastrukturnutzung	€
³⁾ Siehe hierzu auch [2]		

Tabelle 5: Soziale Indikatoren für eine Nachhaltigkeitsbewertung bei unterirdischer Infrastruktur

Soziales		
Indikator	Indikatorebene 2	Einheit
Attraktivitätsvarianz	Einfluss auf landschaftliches Umfeld	[–]
	Einfluss auf Denkmalschutz	[–]
	Veränderung der Lebensqualität im Umfeld	[–]
	Veränderung der Attraktivität der Region	[–]
	Veränderung der Flächenverfügbarkeit	[–]
Risikomanagement Verkehr	Einfluss auf Sachschäden	€
	Einfluss auf Personenschäden	n/a
Beschäftigungssituation	Einfluss auf die gewerbliche Wirtschaft	[–]
	Einfluss auf die Anzahl verfügbarer Stellen	[–]
Risikomanagement Umfeld	Einfluss auf die Kriminalität	[–]
	Einfluss auf Behaglichkeit	[–]

ANHANG B: Projektbeispiele mit Beiträgen zur verbesserten Nachhaltigkeit

Tunnel Baaker Mulde

Projektzweck:	Umnutzung bestehender Tunnel zu Feldermausquartier
Projektort:	Bochum-Linden
Bauzeitraum:	1894
Betroffene SDGs:	<div> <div>12 NACHHALTIGE/R KONSUM UND PRODUKTION</div> <div>15 LEBEN AN LAND</div> </div>



Projektcharakteristika: Ehemalige Eisenbahntunnel der Zeche Baaker Mulde

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Der ehemalige Eisenbahntunnel der Zeche Baaker Mulde wurde auf der überwiegenden Länge verfüllt. Durch den verfüllten Tunnel führt eine Sauerstoff-Transportleitung, die weiterhin in Betrieb ist. Am südlichen Portal blieb ein Tunnelteil unverfüllt und wurde mit einer Abschlusswand verschlossen zu einem Fledermaustunnel umgenutzt.

Durch den Ausbau der Radwegeinfrastruktur der Stadt gibt es nun auch Interesse, den Tunnel eventuell für einen Radweg wieder nutzbar zu machen.



Fledermaustunnel Baaker Mulde in Bochum-Linden (Quelle: Stadt Bochum)

Industrietunnel von Thyssen-Krupp

Projektzweck: Umnutzung bestehender Tunnel zu Radtunneln

Projektort: Alleestraße in Bochum

Bauzeitraum: —

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: Ehemaliger zweigleisiger Industriebahntunnel

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Der ehemalige zweigleisige Industriebahntunnel (Rechteckquerschnitt) unter der Alleestraße in Bochum von Thyssen Krupp verband zwei ursprünglich verschiedene Werksteile nördlich und südlich der Alleestraße und hätte nach Ende der Nutzung zurückgebaut oder verfüllt werden müssen. Die westliche Tunnelröhre wurde verfüllt und in die östliche Röhre wurde ein Wellstahlrohr eingebaut und dann der Ringraum verfüllt. Die Maßnahme war noch mit der Verkürzung des Tunnels um 20 m und dem Bau einer Rampenanlage verbunden und bildet heute einen wichtigen Teil des Radnetzes über den auch der Radschnellweg RS1 laufen wird.



Tunnel Alleestraße vorher und nachher (Radtunnel) in Bochum (Quelle: Stadt Bochum)

Schulenbergtunnel

Projektzweck: Umnutzung bestehender Tunnel zu Fuß- und Radtunnel

Projektort: Hattingen, Nordrhein-Westfalen

Bauzeitraum: 1884

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: 195 m langer, ehemaliger Eisenbahntunnel

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Der Schulenbergtunnel ist ein 195 Meter langer, ehemaliger Eisenbahntunnel in Hattingen in Nordrhein-Westfalen. Er wurde 1884 als sogenannte Kohlenbahn auf der Bahnstrecke Wuppertal–Wichlinghausen–Hattingen für den Mischverkehr eröffnet. Nach rund 100 Jahren wurde zunächst 1979 der Personenverkehr und 1984 auch der Güterverkehr eingestellt. Für den Bahnverkehr konnte diese Strecke nicht wieder hergestellt werden. So begannen 19 89 die Umbaumaßnahmen um den ehemaligen Eisenbahntunnel. Am 23. September 2008 fand dann die Wiedereröffnung statt. Seitdem dient der Tunnel als Fuß- und Radweg.



Schulenbergtunnel Hattingen (Quelle: Olschowy)

Zierenbergtunnel

Projektzweck: Umnutzung bestehender Tunnel zu Fledermausquartier

Projektort: Zierenberg, Kassel

Bauzeitraum: 1897

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: 815 m langer, ehemaliger Eisenbahntunnel

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Der Zierenbergtunnel befindet sich auf der Strecke Kassel–Korbach und wurde 1897 in Betrieb genommen. Hier war eine Erneuerung des Bestandsbauwerkes nicht wirtschaftlich möglich, weshalb ein neuer parallel führender ca. 900 m langer Tunnel errichtet wurde. Die Portale des alten Zierenbergtunnels sind aufgrund des hessischen Denkmalschutzgesetzes als Kulturdenkmäler zu behandeln und müssen somit erhalten bleiben. Aus diesem Grund hat man sich entschieden, nach Fertigstellung des neuen Bauwerks im Jahr 2018, den alten Zierenbergtunnel mit rund 30.000 Tonnen Material zu verfüllen. Hierfür wurde soweit möglich geeignetes Ausbruchmaterial des neuen Tunnels verwendet. Außerdem wurden im Bereich des Ostportals Eingänge belassen, so dass hier ein Fledermausquartier entstehen konnte.



Ostportal Zierenberg Tunnel (Quelle: DB InfraGO AG, Stephan Nink)

Abwasserkanal Emscher

Projektzweck: Renaturierung der Emscher

Projektort: Ruhrgebiet, Deutschland

Bauzeitraum: ab 2012

Betroffene SDGs:

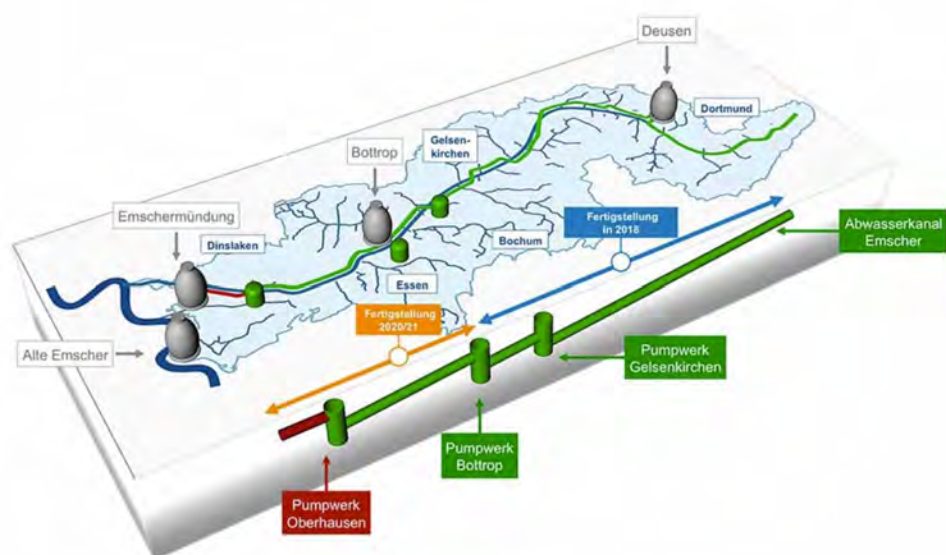


Projektcharakteristika: Insgesamt ca. 47 km Rohrvortriebe mit Durchmessern zwischen 1,6 und 2,8 m, bis 40 m Tiefe

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Im Ruhrgebiet zwischen Dortmund im Osten und Dinslaken im Westen verläuft der Fluss Emscher. Dieser, sowie seine Nebenflüsse, wurden in der Vergangenheit zur Ableitung von Abwässern benutzt. Die damit einhergehende Umweltbelastung sowie der Verlust von Naturräumen für Menschen und Tiere sollte nicht länger hingenommen werden. Die Vielzahl an Projekten zur Renaturierung der Emscher sollen die Wasserqualität verbessern und diesen wieder als Lebensraum für Flora und Fauna sicherstellen.

Im Jahr 2016 wurde das Emscher Projekt von der International Tunneling Association als Umweltinitiative des Jahres ausgezeichnet.



(Quelle: www.eglv.de)

Pumpspeicherwerk Limmern

Projektzweck: Speicherung von Stromüberschüssen aus Schwachlastzeiten und Produktion von Spitzenenergie mit klimaneutraler Wasserkraft

Projektort: Kanton Glarus, Schweiz

Bauzeitraum: 2009 bis 2016

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: Umfangreiches System bestehend aus Stollen und Kavernen, inkl. 3,8 km langer Zugangsstollen, Vortrieb einer Hartgestein-TBM mit Durchmesser 8,03 m

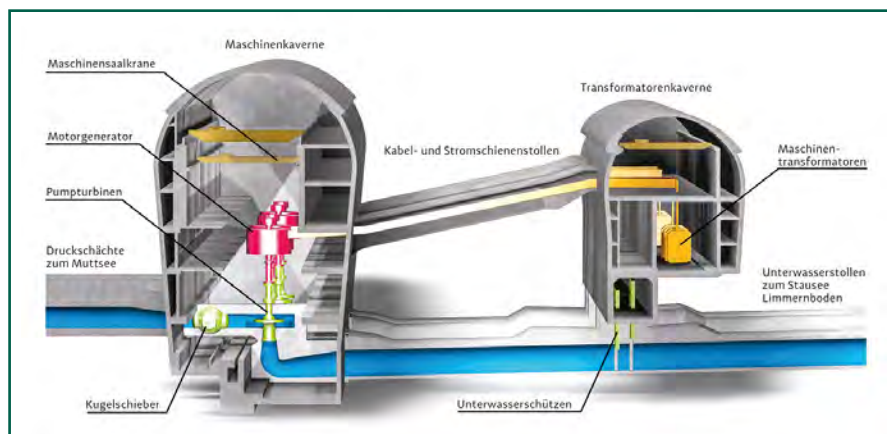
Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Die unterirdischen Anlagen dienen der Produktion von klimaneutralem elektrischem Strom.

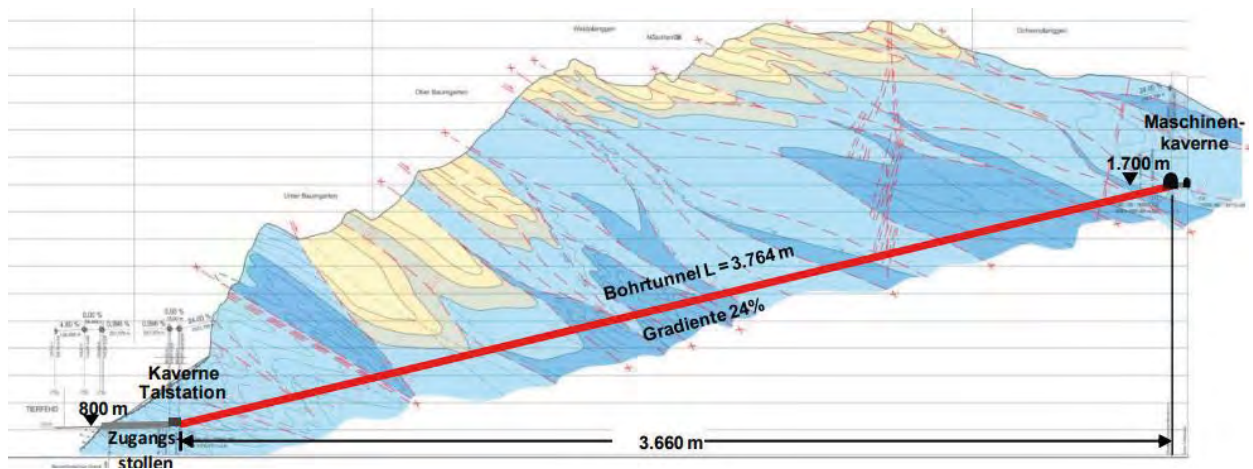
Der Zugangsstollen 1 verbindet vom Talboden aus das 1.700 m oberhalb des Meeresspiegels errichtete Kraftwerk Linth-Limmern, um eine witterungsunabhängige, ganzjährige sichere Erreichbarkeit des Kraftwerks zu ermöglichen.



(Quelle: AXPO)



(Quelle: AXPO)



(Foto: Fridolin Walcher)

Weitere Beispiele:

Pumpspeicherkraftwerke Rodund, Limberg III und Kühtai in Österreich derzeit im Bau

Gemeinschaftsspeicherwerk Inn

Projektzweck: Klimaneutrale Stromproduktion

Projektort: Tirol, Österreich

Bauzeitraum: 2015–2022

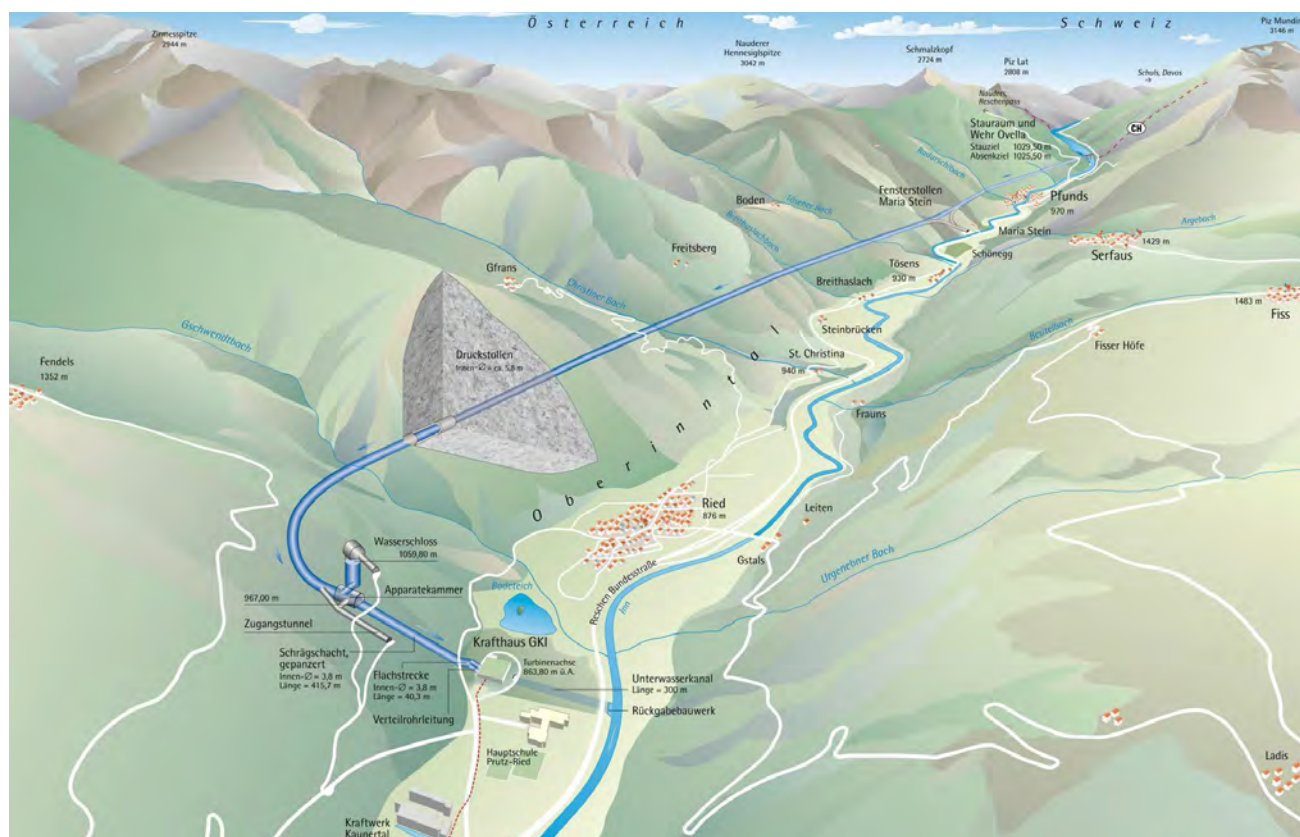
Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: Laufwasserkraftwerk, bestehend aus einem Wehr, einem 21,5 km langen Druckstollen und einem unterirdischen Krafthaus

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Produktion von klimaneutralem Strom mit einer Wasserkraftanlage mit einem hohen Erntefaktor. Verbesserung der Schwall- und Sunk-Erscheinungen im Inn dank eines Ausgleichbeckens. Wiederverwertung von Abbruchmaterial zur Betonherstellung und zur Geländemodellierung.



(Quelle: GKI)

London Power Tunnels

Projektzweck: Elektrische Energieversorgung

Projektort: London, England

Bauzeitraum: 2020–2026

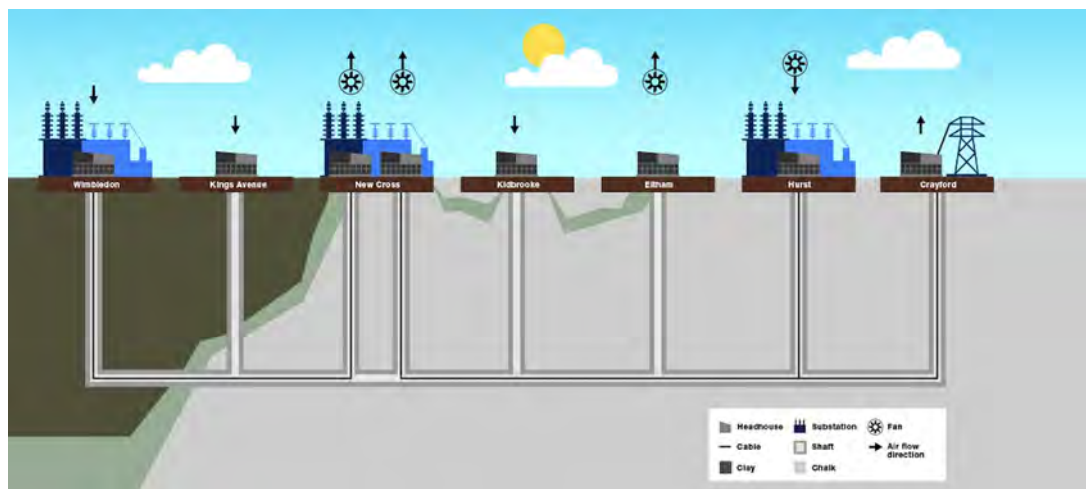
Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: über 60 km Tunnel mit Durchmesser 3,0 bis 4,0 m, Tiefe bis 60 m unter GOK

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Mit dem Bau des neuen Stromnetzes in bis zu 60 m tiefen Tunneln werden alternde, unsichere Kabel ersetzt und der prognostizierte Strombedarf der Stadt mit künftig klimaneutral produzierter Energie abgedeckt.



(Quelle: HOCHTIEF)

Corrib Onshore Gas Pipeline

Projektzweck: Elektrische Energieversorgung

Projektort: Nordwestküste Irland

Bauzeitraum: 2011–2015

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: 4,2 km langer Hydroschild-Vortrieb mit 4,2 m Durchmesser

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Die lokale Bevölkerung verlangte, dass bei der Planung des Projektes besonders auf eine nachhaltige und sensible Umsetzung des Projektes mit besonderem Schutz von Flora und Fauna geachtet wurde. Zum Schutz der sensiblen Natur wurde deshalb der Tunnelbau einer Landverlegung vorgezogen.

In der Umsetzung wurde eine maximale Bauhöhe von 4 m festgelegt, der Portalkran mit einem Fachwerkträger ausgebildet und die Bentonitbecken abgedeckt. Alle Aufbauten wurden farblich der Umgebung angepasst und eine rigorose Lärmbegrenzung durchgeführt.



(Quelle: Wayss & Freytag)

Stauraumkanal Sint-Pieters Woluwe

Projektzweck: Überflutungsschutz

Projektort: Sint-Pieters-Woluwe, Belgien

Bauzeitraum: 2018–2021

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: 375 m EPB-Tunnel mit Durchmesser etwa 5,5 m

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Aufgrund vermehrter außergewöhnlicher Regenereignissen müssen in Innenstädten immer öfter Stauräume zur temporären Zwischenspeicherung geschaffen werden. Bei Starkregenereignissen war die vorhandene Kanalisation in Sint-Pieters-Woluwe überlastet, wodurch es zur Überflutung von Straßen und Kellern kam. Durch den Vortrieb unter beengten Platzverhältnissen wurde ein unterirdischer Zwischenspeicher von etwa 8.000 m³ als Überflutungsschutz geschaffen.



(Quelle: Wayss & Freytag)

SMART-Tunnel: Stormwater Management and Road Tunnel

Projektzweck: Überflutungsschutz und Verkehrstunnel

Projektort: Kuala Lumpur, Malaysia

Bauzeitraum: 2018–2021

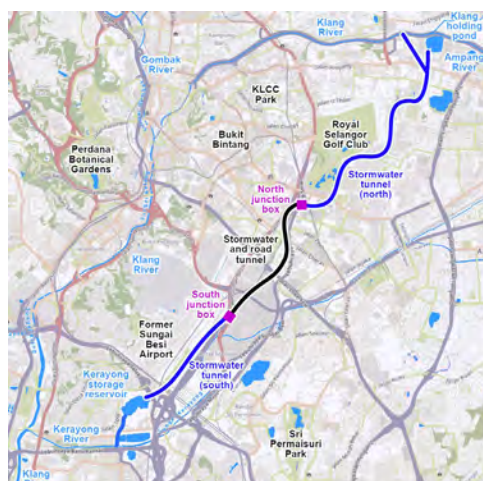
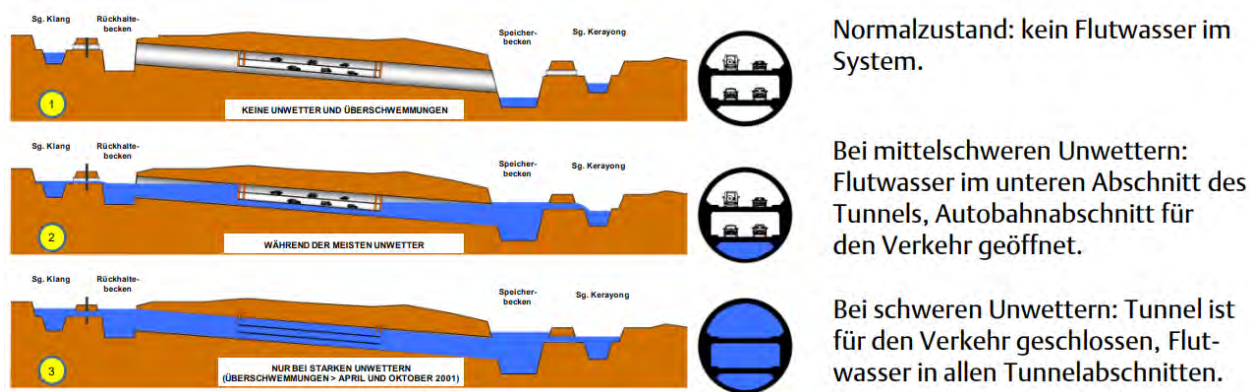
Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: 9,7 m Hydroschild-Tunnel mit Durchmesser etwa 13,2 m

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

In der Innenstadt von Kuala Lumpur in Malaysia kommt es während der Monsunzeit zu teilweise schweren Überschwemmungen, da die beiden Flüsse Gombak und Klang über die Ufer treten. Während der Planung des Tunnels wurde das Potential des Tunnels zur Mehrfachnutzung des Tunnelprojekts sowohl als Verkehrstunnel, als auch für den Überflutungsschutz erkannt und eine kombinierte Tunnelnutzung implementiert. Der Tunnel kann mit seinen 3 Betriebszuständen sehr flexibel genutzt werden.



(Quelle: Wayss & Freytag)

(Quelle: By cmglee, OpenStreetMap - <http://openstreetmap.org/search?query=smart+tunnel>, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=101297562>)

Gotthard-Basistunnel

Projektzweck: Verkehrsprojekt Verlagerung des Schwerverkehrs über die Alpen von der Straße auf die Schiene

Projektort: Schweiz

Bauzeitraum: 1996–2016

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: Bau eines 151,1 km langen unterirdischen Systems bestehend aus den Tunnelröhren, Querschlägen, Kavernen, Schächten und Stollenbauten für diverse Zwecke mit einem Ausbruchvolumen von total 10 Mio. m³.

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

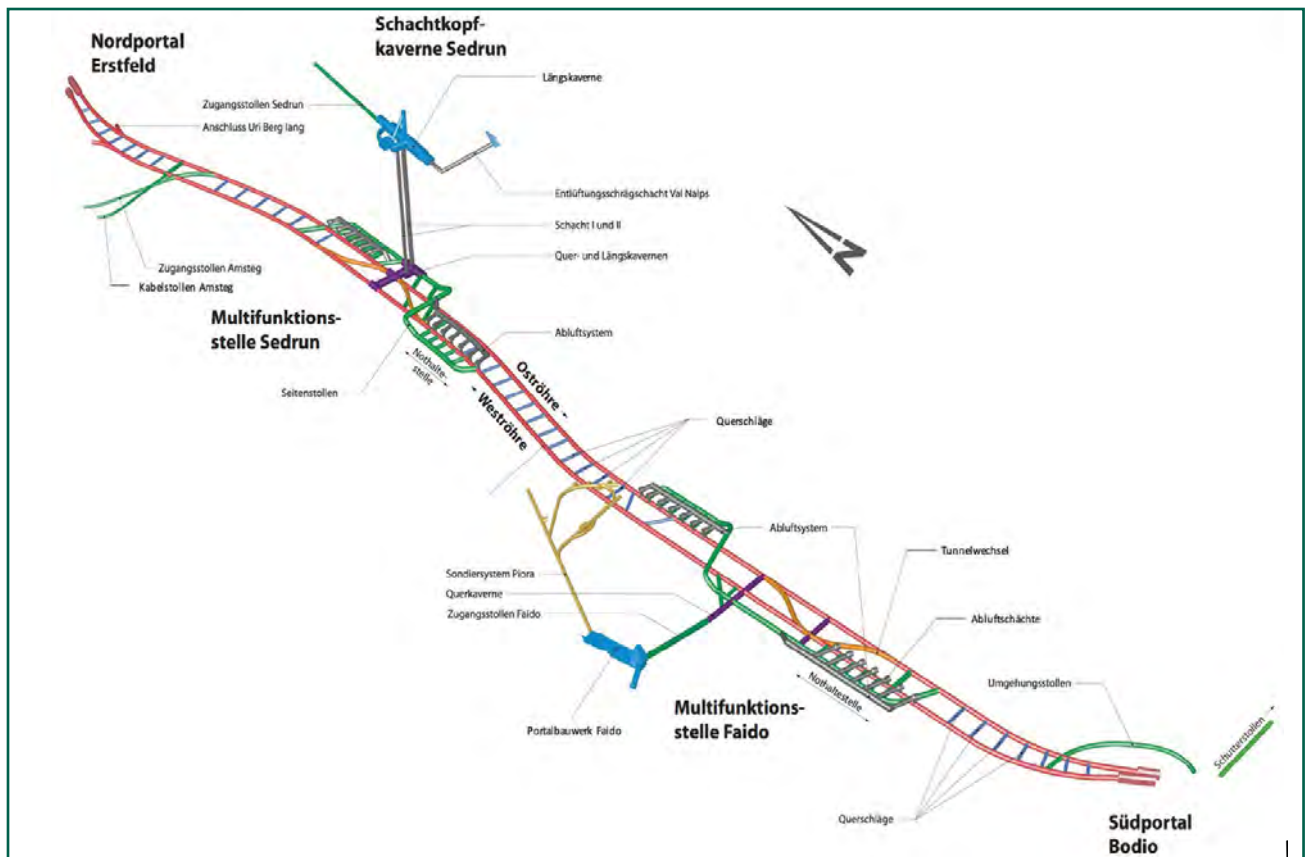
Der Gotthard-Basistunnel dient primär der Verlagerung des europäischen Alpentransitverkehrs von der Straße auf die Schiene. Die Eisenbahn wird in der Schweiz mit klimaneutraler Wasserkraft betrieben.

Durch die Verlagerung des Schwerverkehrs auf die Schiene sollen die engen Alpentäler von den negativen Folgen des Straßengüterverkehrs (Abgase, Unfälle) entlastet werden. Der Schienenanteil im Alpentransitverkehr durch die Schweiz betrug im Jahr 2022 72,5 %.

Bereits während des Baus des Tunnels wurde den Nachhaltigkeitszielen höchste Beachtung geschenkt. Für sämtliche Untertagearbeiten der Tunnelröhren wurden nur Spritzbetone und Betone verwendet, deren Gesteinskörnung zu 100 % aus dem Ausbruchmaterial stammte (TBM- und konventionelle Vortriebe). Rund 30 % des Ausbruchmaterials konnten so wiederverwendet werden. Dank frühzeitiger enger Zusammenarbeit mit der Industrie und innovativer Techniken konnte die Wiederverwertungsquote maximiert werden.

Rund 70 % des Ausbruchmaterials wurden für Dammschüttungen für den Trassenbau und für Geländemodellierungen verwendet. Bei den Geländemodellierungen wurde darauf geachtet, dass positive Beiträge zur Artenvielfalt geleistet wurden, sei dies für Fische und Vögel bei den Seeschüttungen im Vierwaldstättersee oder aber mit der Schaffung neuer alpiner Trockenwiesen auf den Geländemodellierungen aus dem unvermeidlichen Deponiematerial.

Die Partikelfilterpflicht wurde auf den Baustellen eingeführt, lange bevor sie gesetzliche Pflicht war, und die Arbeitssicherheit im Untertagebau konnte massiv verbessert werden



(Quelle: Amberg Engineering AG)



(Quelle: Seeschüttung Uri)

ElbX

Projektzweck: Transport von elektrischer Energie

Projektort: Glückstadt, Deutschland

Bauzeitraum: Seit 2023

Betroffene SDGs:



Projektcharakteristika: Flüssigkeitsgestützter Vortrieb unter der Elbe, Gesamtlänge etwa 5,2 km, Außendurchmesser knapp 5 m.

Kurzbeschreibung des Nachhaltigkeitsaspektes:

Die 5 km lange Unterquerung der Elbe ist ein Teil des Gesamtprojektes SuedLink, welches ein Erdkabel zwischen Schleswig-Holstein und Bayern verlegt. Das 700 km lange Gesamtprojekt soll die Versorgung von 10 Millionen Haushalten durch erneuerbare Energien in Deutschland verbessern.

Bei der Umsetzung des Projekts ist eine Wasseraufbereitungsanlage im Einsatz, wodurch Elbwasser auf der Baustelle verwendet werden kann und gebrauchtes Wasser aufbereitet wieder in die Elbe eingeleitet werden kann. Dieser Prozesswasserkreislauf schont das lokale Trinkwassernetz und -aufbereitungssystem.



Darstellung der Bauphase Kabeleinzug im ElbX Projekt

(Quelle: <https://www.tennet.eu/de/projekte/suedlink-planfeststellungs-abschnitt-a2>)