

Nachhaltigkeit im zyklischen Tunnelbau

Eine LCA-basierte Untersuchung österreichischer Verkehrsinfrastrukturtunnel

Felix Noldin, BSc

Innsbruck, Juni 2026

Masterarbeit

eingereicht an der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Technische
Wissenschaften zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur

Diese Masterarbeit ist der Vertiefungsrichtung „Baustoffe, Baubetrieb und
Projektmanagement“ des Masterstudiums Bauingenieurwissenschaften zugeordnet.

Beurteiler/in:

assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser,

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Betreuer/in: assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser
Universität Innsbruck
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Mitbetreuer/in: Dipl.-Ing. Dr. techn. Lukas Hausberger, BSc
Universität Innsbruck
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften,
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Danksagung

Zuerst geht mein Dank an assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser, bei welchem ich erneut die Möglichkeit hatte, meine Abschlussarbeit zu verfassen. Insbesondere möchte ich mich für die Themengestaltung und die unkomplizierte Art innerhalb sowie außerhalb der Betreuung bedanken.

Mein weiterer Dank gilt den Kolleginnen und Kollegen am Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau für die kollegiale Zusammenarbeit und die gemeinsamen Unternehmungen. Darüber hinaus geht ein herzlicher Dank an meine Zimmerkolleginnen aus dem Raum 221 für die angenehme Arbeitsatmosphäre.

Ein besonderes Dankeschön geht an Dipl.-Ing. Dr. techn. Lukas Hausberger, BSc. Danke für die enorme fachliche Unterstützung aufgrund des immensen Fachwissens, die hilfreichen Anregungen, das regelmäßige Feedback, die motivierenden Worte und das sorgfältige Korrekturlesen. Diese mannigfaltige Betreuung hat maßgeblich dazu beigetragen, dass die vorliegende Arbeit so in dieser Form und Zeit entstehen konnte. Außerdem möchte ich mich für den freundschaftlichen Umgang, vor allem über die Masterarbeit hinaus als Tischnachbar im *Excel & Espresso-Büro* bedanken.

Im Zuge der Bearbeitung wurde dankenswerterweise auf die Expertise einiger Personen zurückgegriffen. Dabei geht mein Dank speziell an Dipl.-Ing. Stefan Auderer von der BEMO Tunnelling GmbH für die fachliche Unterstützung durch diverse Daten und wertvolle Informationen. Weiters geht mein Dank an Dipl.-Ing. Christoph Parzer und Dr. techn. Matthias Spiegl von der ILF Group Holding GmbH sowie an Dipl.-Ing. Dominik Lumetzberger und Dipl.-Ing. (FH) Thomas Bartl von der ÖBB Infrastruktur AG für die Bereitstellung von Planunterlagen und technischen Informationen.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei meinen Eltern für die bisher 26-jährige Unterstützung und den Rückhalt in allen Lebenslagen bedanken, welche dieses Studium erst ermöglichte.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Freundin Birgit für ihre wundervolle Art sowie für die vergangenen und hoffentlich vielen gemeinsamen Jahre liebevoll bedanken. Ich bin unendlich dankbar, eine so herzengute Person an meiner Seite zu haben!

Kurzfassung

Das Nachhaltigkeitsergebnis von Verkehrsinfrastrukturprojekten wird maßgeblich in den frühen Projektphasen geprägt. Insbesondere trassierungs- und planungstechnische Entscheidungen, wo Verkehrstrassen oder -tunnel verlaufen sollen, bestimmen, den Materialbedarf, den Bau- und Vortriebsprozess sowie die Instandhaltungsaufwände über den gesamten Lebenszyklus. Da der Verkehrssektor für rund 30 % der nationalen Treibhausgasemissionen (THG) in Österreich verantwortlich ist und mehr als die Hälfte des inländischen Materialverbrauchs von jährlich 143 Millionen Tonnen auf das Bauwesen entfällt, besitzt der Tunnelbau mit einem geschätzten Anteil von etwa 4,2 % an den nationalen THG-Emissionen einen bedeutenden ökologischen Hebel. Die frühzeitige Integration von Nachhaltigkeitsbewertungen scheitert in der Praxis jedoch oft an der hohen Komplexität des Tunnelbaus, geotechnischen Unsicherheiten und einer mangelnden, verfügbaren sowie anwendbaren Datengrundlage für österreichische Randbedingungen.

Die vorliegende Masterarbeit schließt diese Forschungslücke durch eine systematische ökobilanzielle Analyse des zyklischen Tunnelbaus nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) innerhalb der Lebenszyklusphasen A1-A5 gemäß EN 17472. Auf Basis repräsentativer (Durchschnitts-)Werte für Bauprozesse, Baumaterialien und Logistikketten werden Umwelt-Benchmarks für österreichische Verkehrsinfrastrukturtunnel inklusive der zugehörigen Querschlüge generiert. Die Bewertung umfasst alle wesentlichen Tunnelbauaktivitäten vom Ausbruch über die Sicherungsmaßnahmen bis zum Einbau der Innenschale (ohne Straßen- bzw. Bahnoberbau) sowie die zugehörigen Transportprozesse und die Deponierung des Ausbruchmaterials. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt für das Treibhauspotenzial (GWP) sowie zehn weitere Wirkungsindikatoren nach EN 15804.

Die Ergebnisse weisen die Materialherstellung und die baustellenseitige Errichtung als die primären ökologischen Emittenten aus. Aufgrund der geologischen Varianz und des daraus resultierenden Aufwands für Ausbruch, Stützmaßnahmen und Innenschale etc. zeigen die laufmeterbezogenen Kennwerte erhebliche Schwankungsbreiten. Für das Treibhauspotenzial reichen die berechneten Auswirkungen beispielsweise von 9,7 bis 19,6 Tonnen CO₂-Äquivalent pro Tunnelmeter bei zweispurigen Straßentunneln über 7,5 bis 13,7 Tonnen CO₂-Äquivalent/m bei eingleisigen Bahntunneln bis hin zu 3,2 bis 5,5 Tonnen CO₂-Äquivalent/m bei begehbaren Querschlügen.

Die ermittelten Benchmarks werden schließlich durch konkrete material- und prozessbezogene Optimierungspotenziale ergänzt. Für zukünftige Projektentwicklungen im österreichischen

Verkehrsinfrastrukturbau sollen diese Kennwerte eine fundierte, vereinfachte Abschätzung der Umweltwirkungen ermöglichen und den Weg für eine ganzheitliche, lebenszyklusbasierte Entscheidungsfindung bzw. Trassenoptimierung ebnen.

Abstract

The sustainability performance of transport infrastructure projects is largely shaped during the early project phases. In particular, alignment and planning decisions regarding the location and design of transport routes and tunnels determine the required material quantities, construction processes, excavation methods, and maintenance requirements throughout the entire life cycle. Since the transport sector accounts for approximately 30% of Austria's national greenhouse gas (GHG) emissions and more than half of the annual domestic material consumption of 143 million tonnes is attributed to the construction sector, tunnelling represents a significant potential lever for ecological improvements, accounting for an estimated 4.2% of national GHG emissions. However, the early integration of sustainability assessments is often hindered in practice by the high complexity of tunnelling, geotechnical uncertainties, and the limited availability of applicable and representative data for Austrian conditions.

This master's thesis addresses this research gap through a systematic Life Cycle Assessment (LCA) of conventional tunnelling according to the New Austrian Tunnelling Method (NATM), considering life cycle modules A1-A5 in accordance with EN 17472. Based on representative averaged parameters for construction processes, construction materials, and logistics chains, environmental benchmarks for Austrian transport infrastructure tunnels, including associated cross-passages, are developed. The assessment covers all relevant tunnelling activities, from excavation and support measures to the installation of the inner lining (excluding road and railway superstructure), as well as associated transport processes and the disposal of excavated material. The results are presented for the Global Warming Potential (GWP) and ten additional environmental impact indicators according to EN 15804.

The results identify material production and construction-site activities as the primary contributors to environmental impacts. Due to geological variability and the resulting differences in excavation effort, support requirements, and inner lining quantities, the calculated impacts per metre of tunnel show considerable variations. For the Global Warming Potential, the calculated impacts range from 9.7 to 19.6 tonnes of CO₂ equivalents per metre of tunnel for standard two-lane road tunnels, from 7.5 to 13.7 tonnes of CO₂ equivalents per metre for single-track railway tunnels, and from 3.2 to 5.5 tonnes of CO₂ equivalents per metre for walkable cross passages.

The developed benchmarks are complemented by specific material- and process-related optimisation potentials. For future project developments in Austrian transport infrastructure,

these indicators enable a well-founded and simplified estimation of environmental impacts and support holistic, life-cycle-based decision-making and alignment optimisation.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Kurzfassung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abbildungsverzeichnis	XI
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungsverzeichnis.....	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Nachhaltige Entwicklung und österreichische Tunnel	1
1.2 Zielsetzung und Forschungskonzept	4
1.2.1 Ziel der Arbeit	4
1.2.2 Methodik	5
1.2.3 Forschungsfragen	5
1.3 Nachhaltigkeit in der Bauwirtschaft.....	6
1.3.1 Nachhaltigkeit im Tunnelbau	8
1.4 Bedeutung von Ökobilanzdaten im Infrastrukturbau	15
1.5 „LZinfra“ Tool.....	18
2 Zyklischer Tunnelbau	21
2.1 Allgemein	21
2.2 Vortrieb.....	25
2.2.1 Sprengvortrieb.....	25
2.2.2 Baggervortrieb.....	26
2.2.3 Sichern.....	27
2.3 Innenschale	30
3 Verkehrstunnel in Österreich.....	33
3.1 Arten	33
3.2 Querschnitte.....	35
3.2.1 Bahntunnel.....	35
3.2.2 Straßentunnel.....	36
3.2.3 Betrachtete Querschnitte	38
4 Die Ökobilanz.....	39
4.1 Allgemein	39
4.2 Phasen einer Ökobilanz	41

4.2.1	Untersuchungsrahmen	42
4.2.2	Sachbilanz.....	43
4.2.3	Wirkungsabschätzung.....	44
4.2.4	Auswertung.....	45
5	Grundsätze Baukalkulation	47
5.1	Allgemein.....	47
5.2	Transformation: Kalkulation zur Sachbilanz	50
6	Ökobilanzanalyse des zyklischen Tunnelbaus.....	55
6.1	Zieldefinition.....	55
6.2	Funktionelle Einheit.....	55
6.2.1	Hintergründe zur Wahl der funktionellen Einheit	55
6.3	Systemgrenzen	57
6.3.1	Allgemein	57
6.3.2	Technische Systemgrenze.....	57
6.3.2.1	Ausbrucharbeiten	59
6.3.2.2	Stützmaßnahmen.....	59
6.3.2.3	Innenschale.....	61
6.3.3	Geografische Systemgrenze.....	63
6.3.4	Zeitliche Systemgrenze.....	63
6.4	Sachbilanz	64
6.4.1	Hintergrunddaten der tunnelbautechnischen Hintergründe	64
6.4.2	Herstellung (A1-A3).....	67
6.4.3	Transport.....	72
6.4.4	Errichtungsphase (A5).....	74
6.4.5	Sachbilanz nach Tunnelquerschnitt	84
6.5	Wirkungsabschätzung	86
6.6	Ergebnisse	89
6.6.1	Bahntunnel.....	89
6.6.1.1	Bahntunnel zweigleisig	89
6.6.1.2	Bahntunnel eingleisig.....	98
6.6.2	Straßentunnel	107
6.6.2.1	Straßentunnel zweispurig.....	107
6.6.2.2	Straßentunnel einspurig.....	113
6.6.3	Querschlüge	120
6.6.3.1	Befahrbare Querschlüge (EQ).....	120
6.6.3.2	Begehbare Querschlüge (GQ)	128
6.6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	134
6.6.5	Gegenüberstellung in Abhängigkeit der Querschnittsgröße	137
7	Diskussion	139
7.1	Ergebnisdiskussion.....	139
7.1.1	Sensitivitätsanalyse.....	139
7.1.2	Vergleich mit anderen Ergebnissen	140
7.1.2.1	Absolute quantitative Indikatoren nach Tunneltyp und Geologie.....	141
7.1.2.2	Relative Allokation der Hauptmaterialien und Lebenszyklusmodule (A1–A5) ...	142
7.1.2.3	Prozessanalytische Betrachtung der Ausbrucharbeiten.....	143
7.1.2.4	Prozessanalytische Betrachtung der Stützmaßnahmen	143
7.1.2.5	Prozessanalytische Betrachtung der Innenschale	144

7.1.2.6	Datengrundlage und methodische Hintergründe der Ökobilanzierung.....	144
7.2	Limitationen	145
7.3	Verbesserungspotenziale	147
7.3.1	Material	148
7.3.1.1	Ausbruchmaterial.....	148
7.3.1.2	Beton.....	148
7.3.2	Prozess.....	150
7.3.2.1	Sprengtechnik	150
7.3.2.2	Spritzbeton.....	151
7.3.2.3	Energie.....	151
8	Fazit	153
9	Literatur	155
10	Anhang.....	169
	Statement zur Verwendung künstlicher Intelligenz.....	189
	Verpflichtungs- und Einverständniserklärung.....	191

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Nachhaltigkeitsaspekte als Kreise, adaptiert nach [31].....	6
Abb. 1-2: Graue Emissionen und betriebsbedingte Emissionen als Summe der Lebenszyklusbetrachtung [38].....	7
Abb. 1-3: Absoluter und prozentueller Anteil des Bausektors an den globalen THG- Emissionen in 2023 [39].....	8
Abb. 1-4: Abschätzung ökologischer Anteil Tunnelbau in Österreich	10
Abb. 1-5: Implementierung Nachhaltigkeit und Einfluss, adaptiert nach [54]	12
Abb. 1-6: Nachhaltigkeit auf Baustoffebene [37]	13
Abb. 1-7: Bewertungsebenen und zyklischer Tunnelrechner von „LZinfra“ [eigene Abbildung].....	19
Abb. 2-1: Übersicht Tunnelvortriebsmethoden, adaptiert nach [75].....	22
Abb. 2-2: Arbeitszyklus Sprengvortrieb (mit Baggervortrieb), adaptiert nach [75]	22
Abb. 2-3: Querschnitt und Längsschnitt eines Tunnels für die Bezeichnungen [27].....	23
Abb. 2-4: Abrechnungslinien für Ausbruch, Stützmittel und Beton [27]	24
Abb. 2-5: Sprengvortrieb [77]	25
Abb. 2-6: Baggervortrieb [78]	25
Abb. 2-7: Abdichtungsträger und Sohlgewölbe [eigene Aufnahme]	31
Abb. 2-8: Widerlager, KDB und Gewölbebeton [eigene Aufnahme]	31
Abb. 3-1: Verkehrstunnel in Österreich, adaptiert nach [86, 87]	33
Abb. 3-2: Bahntunnel schematisches Minimalprofil 1-gleisig [91]	35
Abb. 3-3: Bahntunnel schematisches Minimalprofil 2-gleisig [76]	36
Abb. 3-4: Straßentunnel und Querschnitte schematische Querschnitte je nach Typ [93]	37
Abb. 4-1: Lebenszyklusphasen zur Bewertung von Ingenieurbauwerken nach ÖNORM EN 17472 [30]	40
Abb. 4-2: Phasen einer Ökobilanz nach ÖNORM EN ISO 14040 [97].....	42
Abb. 4-3: Schematische Darstellung eines Prozessmoduls, adaptiert nach [96].....	44
Abb. 4-4: Prinzip der Wirkungsabschätzung am Beispiel von Treibhauspotenzial, adaptiert nach [96]	45
Abb. 5-1: Vorlage für K7 Blatt [28]	50
Abb. 5-2: Transformation Baukalkulation zur Sachbilanz [eigene Abbildung].....	52
Abb. 6-1: Systemgrenze blau umrahmt, adaptiert nach [93]	57
Abb. 6-2: Lebenszyklusphasen im zyklischen Tunnelbau, inspiriert von [103]	58
Abb. 6-3: Systemgrenze Ausbrucharbeiten	59
Abb. 6-4: Systemgrenze Stützmaßnahmen.....	60

Abb. 6-5: Systemgrenze Innenschale.....	62
Abb. 6-6: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für zweispurigen bzw. zweigleisigen Querschnitt.....	84
Abb. 6-7: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für einspurigen bzw. eingleisigen Querschnitt	85
Abb. 6-8: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für mit Einsatzfahrzeugen befahrbaren Querschlag	85
Abb. 6-9: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für begehbaren Querschlag.....	86
Abb. 6-10: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar	90
Abb. 6-11: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar	90
Abb. 6-12: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar	91
Abb. 6-13: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar	92
Abb. 6-14: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar	93
Abb. 6-15: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar	93
Abb. 6-16: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar	94
Abb. 6-17: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar	94
Abb. 6-18: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar.....	96
Abb. 6-19: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar	96
Abb. 6-20: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar.....	97
Abb. 6-21: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar	98
Abb. 6-22: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar.....	100
Abb. 6-23: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar	100
Abb. 6-24: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, schwerlösbar.....	100
Abb. 6-25: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar.....	101
Abb. 6-26: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar.....	103
Abb. 6-27: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar	103
Abb. 6-28: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar	103
Abb. 6-29: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar.....	104
Abb. 6-30: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar	105
Abb. 6-31: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar.....	105
Abb. 6-32: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar	106
Abb. 6-33: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar	106
Abb. 6-34: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar	108
Abb. 6-35: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar	108
Abb. 6-36: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar	108
Abb. 6-37: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar.....	109
Abb. 6-38: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar	110
Abb. 6-39: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar	110
Abb. 6-40: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar	110

Abb. 6-41: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar	111
Abb. 6-42: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar	112
Abb. 6-43: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar	112
Abb. 6-44: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar	112
Abb. 6-45: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar	113
Abb. 6-46: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar	114
Abb. 6-47: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar	114
Abb. 6-48: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar	115
Abb. 6-49: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar	115
Abb. 6-50: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar	116
Abb. 6-51: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar	116
Abb. 6-52: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar	117
Abb. 6-53: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar	117
Abb. 6-54: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar	118
Abb. 6-55: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar	118
Abb. 6-56: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar	119
Abb. 6-57: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar	119
Abb. 6-58: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar	121
Abb. 6-59: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar	121
Abb. 6-60: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar	122
Abb. 6-61: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar	122
Abb. 6-62: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar	124
Abb. 6-63: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar	124
Abb. 6-64: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar	124
Abb. 6-65: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar	125
Abb. 6-66: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar	126
Abb. 6-67: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar	126
Abb. 6-68: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar	127
Abb. 6-69: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar	127
Abb. 6-70: Ergebnisse Prozesse A5, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar	128
Abb. 6-71: Ergebnisse Ausbruch, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar	128
Abb. 6-72: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar	129
Abb. 6-73: Ergebnisse Innenschale, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar	129
Abb. 6-74: Ergebnisse Prozesse A5, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar	130
Abb. 6-75: Ergebnisse Ausbruch, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar	130
Abb. 6-76: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar	131
Abb. 6-77: Ergebnisse Innenschale, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar	131
Abb. 6-78: Ergebnisse Prozesse A5, begehrbarer Querschlag, leicht lösbar	132
Abb. 6-79: Ergebnisse Ausbruch, begehrbarer Querschlag, leicht lösbar	132
Abb. 6-80: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehrbarer Querschlag, leicht lösbar	133

Abb. 6-81: Ergebnisse Innenschale, begehbarer Querschlag, leicht lösbar	133
Abb. 6-82: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Straßentunnel 2-spurig	135
Abb. 6-83: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Straßentunnel 1-spurig	135
Abb. 6-84: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Bahntunnel 2-gleisig	136
Abb. 6-85: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Bahntunnel 1-gleisig	136
Abb. 6-86: Ergebnisse Verteilung A1-A5, befahrbarer Querschlag	136
Abb. 6-87: Ergebnisse Verteilung A1-A5, begehbarer Querschlag	136

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Ökonomischer Anteil Tunnelbau global und in Österreich im Jahr 2024	9
Tab. 1-2: Materialbedarfsspezifische Faktoren Tunnelneubau [9].....	10
Tab. 1-3: Mengengerüst Tunnelneubau [47]	10
Tab. 3-1: Betrachtete Querschnitte.....	38
Tab. 5-1: Transformierte Baukalkulation für Bewehrung Spritzbeton.....	53
Tab. 6-1: Ermittlung repräsentative Tunnellängen, basierend auf [13, 14, 17].....	56
Tab. 6-2: Durchschnittliche Abschlagslängen, Abwicklungen und Querschnittsflächen	67
Tab. 6-3: Sachbilanz Herstellungsphase A1-A3	72
Tab. 6-4: Klassifizierung der Elemente nach NST Codes [133]	73
Tab. 6-5: Transportdistanzen der Güterklassen für die Transportphase A4.....	74
Tab. 6-6: Sachbilanz Errichtungsphase A5	84
Tab. 6-7: Betrachtete Wirkungsindikatoren nach ÖNORM EN 15804 [99].....	88
Tab. 6-8: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, schwer lösbar pro Tunnelmeter.....	89
Tab. 6-9: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, mittel lösbar pro Tunnelmeter.....	93
Tab. 6-10: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, leicht lösbar pro Tunnelmeter	95
Tab. 6-11: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, schwer lösbar pro Tunnelmeter.....	99
Tab. 6-12: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, mittel lösbar pro Tunnelmeter.....	102
Tab. 6-13: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, leicht lösbar pro Tunnelmeter	105
Tab. 6-14: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, schwer lösbar pro Tunnelmeter.....	107
Tab. 6-15: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, mittel lösbar pro Tunnelmeter.....	110
Tab. 6-16: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, leicht lösbar pro Tunnelmeter	111
Tab. 6-17: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, schwer lösbar pro Tunnelmeter.....	114
Tab. 6-18: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, mittel lösbar pro Tunnelmeter.....	116
Tab. 6-19: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, leicht lösbar pro Tunnelmeter	118
Tab. 6-20: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, schwer lösbar pro Tunnelmeter	120
Tab. 6-21: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, mittel lösbar pro Tunnelmeter	123
Tab. 6-22: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, leicht lösbar pro Tunnelmeter.....	126
Tab. 6-23: Ergebnisse begehbarer Querschlag, schwer lösbar pro Tunnelmeter	128
Tab. 6-24: Ergebnisse begehbarer Querschlag, mittel lösbar pro Tunnelmeter	130
Tab. 6-25: Ergebnisse begehbarer Querschlag, leicht lösbar pro Tunnelmeter.....	132
Tab. 6-26: Ergebnisse GWP-gesamt je nach Tunnelart	137
Tab. 7-1: Mengengerüst Ergebnisse	139
Tab. 7-2: Anteile der wesentlichen Bestandteile an den gesamten Treibhauspotenzialen der jeweiligen Lebenszyklusphase	140

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
AP	Versauerungspotenzial, <i>Acidification Potential</i>
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
Äq.	Äquivalent
BBT	Brenner Basistunnel
BE	Baustelleneinrichtung
BGL	Baugeräteliste
bspw.	beispielsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CTUh	potenzielle gesundheitliche Wirkung toxischer Emissionen auf den Menschen, <i>Comparative Toxic Unit for humans</i>
DAUB	Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen
d. h.	das heißt
EH	Mengeneinheit
EN	Europäische Norm
eng.	Englisch
EP	Einheitspreis
EPD	Umweltproduktdeklaration, <i>Environmental Product Declaration</i>
eq.	Äquivalent, <i>equivalent</i>
EQ	mit Einsatzfahrzeugen befahrbare Querschläge
etc.	et cetera
EU	Europäische Union
FFG	Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft
FSV	Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr
ggf.	gegebenenfalls
GQ	begehbare Querschläge
GHG	Treibhausgas, <i>greenhouse gas</i>
GWP	Treibhauspotenzial, <i>Global Warming Potential</i>
h	Stunden
HG	Hauptgruppe
HTP-c	potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen – kanzerogen, <i>Potential Comparative Toxic Unit for humans – cancer effects</i>

HTP-nc	potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen – nicht kanzerogen, <i>Potential Comparative Toxic Unit for humans – non cancer effects</i>
IBU	Institut Bauen und Umwelt e. V.
i. d. R.	in der Regel
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
KEA	kumulierten Energieaufwand
kg	Kilogramm
KI	künstliche Intelligenz
km	Kilometer
kWh	Kilowattstunde
LB-VI	Leistungsbeschreibung für Verkehr und Infrastruktur
LCA	Lebenszyklusanalyse, <i>Life Cycle Assessment</i>
LCC	Lebenszykluskostenrechnung, <i>Life Cycle Costing</i>
LCI	Sachbilanz, <i>Life Cycle Inventory</i>
LCIA	Wirkungsabschätzung, <i>Life Cycle Impact Assessment</i>
lfm	Laufmeter
LG	Leistungsgruppe
Lkw	Lastkraftwagen
LO	Preisanteil Lohn
lt.	laut
LV	Leistungsverzeichnis
m	Meter
m.	mit
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
max.	maximal
MFR	Stoffe zum Recycling, <i>Materials for Recycling</i>
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule
mol H ⁺	Stoffmenge and Wasserstoffionen
Mrd.	Milliarden
MS	Microsoft
NST-2007	Einheitliche Warennomenklatur für die Verkehrsstatistik, <i>Nomenclature uniforme des marchandises pour les statistiques de transports</i>
o.	ohne
o. g.	oben genannt
OG	Obergruppe
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
ÖBB Infra AG	Österreichische Bundesbahnen Infrastruktur Aktiengesellschaft
ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung

ÖGG	Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
ÖNORM	Österreichische Norm
Pkw	Personenkraftwagen
PENRE	Nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger
PENRM	Nicht erneuerbare Primärenergie als Rohstoff
PENRT	Totale nicht erneuerbare Primärenergie, <i>Primary Energy Non-Renewable Total</i>
PERT	Totale erneuerbare Primärenergie, <i>Primary Energy Renewable Total</i>
PM	potenzielles Auftreten von Krankheiten aufgrund von Feinstaubemissionen, <i>Particulate Matter emission</i>
PP	Positionspreis
repr.	repräsentativ
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
RQ	Regelquerschnitt
SCHIG	Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft
SG	Sohlgewölbe
SM	Schildmaschine oder Einsatz von Sekundärstoffen, <i>Secondary Materials</i>
SO	Preisanteil Sonstiges
sog.	sogenannt
SQP	potenzieller Bodenqualitätsindex, <i>Potential Soil Quality Index</i>
t	Tonnen
Tab.	Tabelle
TBM	Tunnelbohrmaschine
THG	Treibhausgas
tkm	Tonnenkilometer
tm	Tunnelmeter
TSI	Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität
TVM	Tunnelvortriebsmaschine
u. a.	unter anderem
ULG	Unterleistungsgruppe
usw.	und so weiter
u. v. m.	und viele mehr
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
vs.	versus
WDI	wasserundurchlässige Innenschale im Tunnelbau
WDP	Wasser-Entzugspotenzial, <i>Water Deprivation Potential</i>
z. B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Nachhaltige Entwicklung und österreichische Tunnel

Infrastrukturen bilden das Rückgrat von modernen Staaten und stehen in Abhängigkeit mit der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung. Dabei setzen vor allem die Errichtung und die Erhaltung dieser Strukturen zentrale Voraussetzungen für einen Aufschwung voraus. Die regionale, als auch die gesamtwirtschaftliche Wertschöpfung hängt maßgeblich von der Ermöglichung der gebotenen Infrastruktur ab und bestimmt durch ihre Leistungsfähigkeit die Attraktivität eines Wirtschaftsstandortes. Über die rein ökonomische Komponente hinaus sichert eine solide Infrastruktur die gesellschaftliche Teilhabe, indem sie den Zugang zu Bildung, Gesundheitsversorgung und generell Orten des öffentlichen Lebens ermöglicht. [1, 2]

“You and I come by road or rail, but economists travel on infrastructure.”

– Margaret Thatcher [3]

In diesem Kontext nehmen Verkehrsinfrastrukturen und deren Bauwerke wie beispielsweise Brücken, Straßen- und Eisenbahntunnel eine zentrale Rolle ein. Diese tragen wesentlich zur Sicherstellung von Mobilität, Personen- und Güterverkehr bei und dienen der lokalen sowie überregionalen Erschließung von Lebensräumen unabhängig von geografischen Distanzen oder topografischen Hindernissen [2, 4]. Während der Personenverkehr die individuelle Mobilität und damit die Flexibilität des Arbeitsmarktes und des Sozialraums garantiert, stellt ein effizienter Güterverkehr die soziale Marktwirtschaft in Europa und allgemein den Handel globalisierter Märkte sicher. Besonders im alpinen Raum Österreichs ist die regionale Erschließung durch leistungsfähige Verkehrsverbindungen ein kritischer Faktor, um ländliche Regionen vor Abwanderung zu schützen und die wirtschaftliche Kohärenz zwischen urbanen Zentren und peripheren Räumen zu wahren [4, 5].

Gleichzeitig ist der Verkehrssektor dadurch mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden. In Österreich zählt der Verkehr mit ca. 30 % zu den größten Verursachern der gesamten nationalen Treibhausgasemissionen und weist seit Jahren einen hohen Anteil an den gesamten Emissionen auf. Hauptemittent ist der Straßenverkehr, welcher rund 99 % des gesamten Verkehrssektors ausmacht. Der Bahnverkehr teilt sich das restliche Prozent mit dem Schiffs- sowie dem nationalen Flugverkehr. Dabei bewirkt der Personenverkehr (Pkw, Busse und

einspurige Kraftfahrzeuge) zwei Drittel des Straßenverkehrs und ein Drittel fällt auf den Straßengüterverkehr. [6]

Diese fahrzeugbezogenen Emissionen decken jedoch nur einen Teil der ökologischen Gesamtwirkung ab, da nicht nur der Verkehr an sich, sondern auch die benötigten Baumaterialien der Verkehrswege sowie der erhebliche fossile Energieeinsatz während der Bauphase enorme ökologische Auswirkungen bewirken. So entfällt mehr als die Hälfte des inländischen Materialverbrauchs von rund 143 Mio. Tonnen pro Jahr auf Materialien, welche für den Bau bzw. für die Herstellung von Baustoffen benötigt werden [7]. Der Transport der Materialien und der anschließende Einbau erfordern verbrauchsintensive Prozesse, denn über 70 % des Ölbedarfs in Österreich fällt auf Dieselmotoren für Baumaschinen zurück [6]. Nach dem Einbau sind die jeweiligen Materialien dann für mehrere Jahre oder Jahrzehnte in den Bauwerken gebunden und daher für die zukünftige Ressourcennutzung und deren Kreislauffähigkeit von entscheidender Bedeutung [8]. Nach der Errichtung und der Nutzungsphase wird diese Menge an inerten Baustoffen wieder freigegeben und die weitere Verwendung dessen determiniert maßgeblich die ökologischen Wirkungen [9]. Anstatt die Baustoffe nach dem Lebenszyklus ungenutzt zu deponieren, gewinnt der Einsatz von Sekundärrohstoffen an Bedeutung. So wurden im Jahr 2023 etwa 10,2 Millionen Tonnen an Sekundärrohstoffen verwendet. Davon entfielen 8,8 Millionen Tonnen auf Recyclingbaustoffe (z. B. Substitution der Primärrohstoffe in der Zement- und Betonproduktion durch den Einsatz mineralischer Bau- und Abbruchabfälle) und 1,4 Millionen Tonnen auf Aushubmaterialien [9]. Weitere Verbesserungen könnten somit in Zukunft jährlich etwa bis zu 13,4 Mio. Tonnen an aufbereiteten Materialien liefern. Die Ausschöpfung dieser Reserven ist essenziell, da die Deponierung aktuell für etwa ein Drittel der Treibhausgasemissionen im Sektor Abfallwirtschaft verantwortlich ist (gesamte Deponierung, nicht nur inerte Baustoffe) [6, 9]. Trotz Effizienzsteigerungen durch die Mechanisierung und technologische Fortschritte im Bereich der Antriebsmotoren bleibt der Verkehrssektor durch den Ressourcenverbrauch beim Bau und der Erhaltung von Verkehrsinfrastruktur ein zentraler Treiber für Energieverbrauch und Umweltbelastungen, da große Mengen an Baustoffen sowie energieintensive Bauprozesse dafür erforderlich sind [10].

Im Kontext Österreichs kommt speziell dem Tunnelbau bei Verkehrsinfrastrukturen aufgrund der alpinen Topografie und der Rolle als Transitland im Zentrum Europas eine besondere Bedeutung zu. Häufig werden Verkehrsrouten aufgrund beträchtlicher Höhenunterschiede und langen bzw. ungeeigneten Umfahrstrecken untertage ausgeführt. Neben zahlreichen kleineren Eisenbahn- und Straßentunneln werden aktuell auch einige Großprojekte realisiert (z. B. Brenner Basistunnel, Semmering-Basistunnel und der im Dezember 2025 in Betrieb genommene Koralmtunnel [11]).

So gibt es nach derzeitigem Stand in Österreich 261 Bahntunnel [12] mit einer gesamten Länge von etwa 230 km im Bestand [13], wobei die o. g. Projekte noch nicht dazu zählen und diese

Zahlen somit zukünftig stark erhöht werden (Stand Ende 2024). Der Straßenverkehr verzeichnet 116 Autobahntunnel mit insgesamt etwa 275 km Länge und 58 Schnellstraßentunnel mit insgesamt etwa 142 Tunnelkilometern im Bestand (Stand Anfang 2025) [14]. Die jeweiligen Längen der zuvor aufgezählten Straßentunnel umfassen jedoch rein die gesamten übergeordneten Tunnelbauwerke. Bei detaillierterer Untergliederung ergeben sich für den Straßenverkehr 414 Tunnelröhren, wovon 153 Tunnelröhren mit ca. 315 km Länge im bergmännischen Vortrieb aufgefahen wurden (Stand Anfang 2025) [15]. Der Bau von Jahrhundertprojekten aber auch der aktuelle Bestand mit einer summierten Länge von ca. 645 Tunnelkilometern¹ in Betrieb bestätigen das Spannungsfeld zwischen infrastrukturellem Nutzen und ökologischer Belastung.

Die bauliche Substanz der österreichischen Tunnelbauwerke ist insgesamt in einem robusten Zustand [15, 17]. Eine detaillierte Analyse der Straßentunnel verdeutlicht, dass mehr als die Hälfte der Tunnel aktuell in sehr gutem oder gutem Zustand sind (Zustandsklasse 1 oder 2), wobei kein einziges Bauwerk die kritische Zustandsklasse 5 (sehr schlecht) aufweist [15]. Bei genauerer Betrachtung der Bahntunnel wird ersichtlich, dass die Gesamtnote von den Neubautunneln der letzten Jahre geprägt wird. Jedoch hat eine signifikante Anzahl von knapp 150 Tunnelanlagen bereits ein Alter von 100 Jahren erreicht. Davon sind sogar 76 Bauwerke bereits mehr als 150 Jahre alt. Dementsprechend befinden sich diese alten Bahnbauwerke daher in den Zustandsklassen 3, 4 oder auch 5 [17].

Mit einem mittleren baulichen Alter von ca. 27 Jahren bei den Straßentunneln bzw. 43 Jahren bei den Bahntunneln befinden sich die österreichischen Tunnelanlagen derzeit in einem mittleren bis fortgeschrittenen Alter [15, 17]. Dieser überwiegend positive Ist-Zustand der Alters- und Zustandsstruktur der Bestandsbauwerke deutet aber auf eine bevorstehende Investitionswelle hin. [18]

Neben diversen Instandsetzungen der Bausubstanz sowie der technischen Ausrüstung werden zukünftig weitere zugehörige Neubaumaßnahmen erforderlich sein. Als aktuelles Beispiel kann der Landecker Tunnel im Tiroler Oberland genannt werden, welcher damals als zweispuriger Autobahntunnel in einer Tunnelröhre errichtet wurde. Aufgrund der gesetzlich vorgeschriebenen Standards zur Tunnelsicherheit muss der mittlerweile in die Jahre gekommene Straßentunnel generalsaniert und durch einen knapp sieben Kilometer langen Flucht- und Rettungstunnel erweitert werden [19]. Derartige Neubaumaßnahmen werden zukünftig vermehrt andere einröhrige Tunnelbauwerke, unabhängig von der Zustandsklasse, betreffen.

Die Planungen der aktuellen Bundesregierung unterstreichen die Notwendigkeit von funktionierenden Verkehrsinfrastrukturen einerseits als Wirtschaftsfaktor und andererseits als Faktor der Mobilität durch zukünftige Lückenschlüsse im Verkehrsnetz und Entschärfungen

¹ Diese Länge würde einem fiktiven zusammenhängenden Tunnel von Bregenz nach Wien und von dort nach Graz entsprechen [16].

von gefährlichen Straßenabschnitten. Der Faktor Nachhaltigkeit soll jedoch auch mehr Gewicht bekommen, da durch die geplanten Instandhaltungsmaßnahmen die angestrebte Lebensdauer der Bauwerke erreicht werden soll, aber auch neue Projekte sollen zunehmend nach dem Kriterium Umweltschutz abwogen werden. [20]

In dieser Legislaturperiode sollen 30 Mrd. € in die Verkehrsinfrastruktur investiert werden, wovon allein 2,3 Mrd. € für den Brenner Basistunnel inkl. Brenner Nordzulauf und 1,5 Mrd. € für die Neue Südstrecke (Koralmbahn und Semmering-Basistunnel) bis 2030 bereitgestellt werden sollen. Für sonstige Streckenneu- und -ausbauten des Bahnverkehrs sollen 5,7 Mrd. € investiert werden. Im bestehenden Straßennetz sind die nächsten Jahre durch Reinvestitionen für Erneuerungen und Instandsetzungen in der Höhe von 7,2 Mrd. € gezeichnet. [12, 15, 20]

Obwohl die Relevanz nachhaltiger Infrastruktur in Bezug auf ökologische und politische Aspekte steigt, zeigt sich, dass die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken bislang nur begrenzt und oft fragmentiert erfolgt ist. Speziell der Tunnelbau nimmt inmitten dieser Problematik eine Sonderrolle ein, da die Bauvorhaben technisch hochkomplex und materialintensiv sind [21]. Bestehende Untersuchungen zeigen zwar erste quantitative Ergebnisse, beispielsweise hinsichtlich CO₂-Emissionen pro Tunnelmeter oder konzentrieren sich häufig auf einzelne Teilaspekte, ohne eine ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus vorzunehmen [22–25]. Zudem sind vorhandene Ergebnisse meistens projektspezifisch und daher nur eingeschränkt quantitativ oder regional übertragbar. Insbesondere detaillierte Analysen für den zyklischen Tunnelbau sind kaum vorhanden (vgl. [22–26]).

Diese zeitliche, politische und budgetäre Konstellation bietet aber auch gleichzeitig die Chance, die kommenden Instandsetzungszyklen sowie Neubauvorhaben bereits unter dem Vorzeichen moderner Nachhaltigkeitsaspekte und der dazugehörigen gesamthaften Lebenszyklusbetrachtung des zyklischen Tunnelbaus vorzubereiten.

1.2 Zielsetzung und Forschungskonzept

1.2.1 Ziel der Arbeit

Die Masterarbeit widmet sich basierend auf der zuvor erläuterten Ausgangslage, der Nachhaltigkeit im zyklischen Tunnelbau. Der zyklische Tunnelbau wird dabei anhand von Ökobilanzanalysen untersucht und die umweltbezogenen Ergebnisse mittels durchschnittlicher Werte für Tunnelbauwerke in Österreich präsentiert. Um diese lokale Repräsentativität zu gewährleisten, werden verschiedene geologische Bedingungen und Vortriebsklassen an typischen Querschnitten untersucht. Dabei werden sämtliche Prozesse und Materialien des Tunnelvortriebs, der zugehörigen Sicherungsmaßnahmen (bis Linie 1a nach ÖNORM B 2203-1 [27]) und der Innenschale (ohne Straßen- bzw. Bahnoberbau) in den Lebenszyklusphasen „A1-A3 Herstellung“, „A4 Transport“ und „A5 Errichtung“ betrachtet. Die Ergebnisse der Analyse, welche sich nur auf ökologische Aspekte beschränken und ökonomische, soziale

sowie betriebliche Gesichtspunkte außer Acht lassen, werden anhand ausgewählter Umweltindikatoren präsentiert und für spätere weiterführende Analysen diskutiert bzw. sollen für Vergleiche zur Verfügung stehen. Zudem sollen die ermittelten Durchschnittswerte pro Tunnelkilometer einen Beitrag für einen gesamtheitlichen und lebenszyklusorientierten Ansatz leisten und die Nachhaltigkeitsbewertung von Tunnelbauprojekten in Österreich in frühen Projektphasen vereinfachen.

1.2.2 Methodik

Anfangs wurde eine Literaturrecherche angestellt, um sich mit der Materie der Ökobilanzierung, der Baukalkulation und dem Status quo von Ökobilanzdaten im zyklischen Tunnelbau genauer auseinanderzusetzen. Währenddessen wurden parallel dazu Berechnungsansätze für baubetriebliche, baukalkulatorische und ökobilanzielle Überlegungen der zu untersuchenden Komponenten implementiert.

Die Untersuchung stützt sich in ihrer Form einerseits auf baukalkulatorische Ansätze der ÖNORM B 2061 [28], welche für eine ökobilanzielle Betrachtung entsprechend transformiert wurden und beim baubetrieblichen Teil unter Verwendung der neuen österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) [29] bzw. den Regelungen der ÖNORM B 2203-1 [13]. Andererseits fußt der ökobilanzielle Teil normativ auf der ÖNORM EN 17472 [30] und betrachtet die Prozesse des zyklischen Tunnelbaus in den Lebenszyklusphasen A1-A5. Die Berechnung erfolgte mit der Software MS Excel und unter Zuhilfenahme von Ökodatensätzen aus Umwelt-Produktdeklarationen (EPDs) und aus Ökobilanzdatenbanken sowie internen Studien. Abschließend wurden die Ergebnisse der Analyse tabellarisch, grafisch sowie in Textform zusammenfassend präsentiert und mit Ergebnissen aus der Literatur verglichen. Für die Belastbarkeit der Ergebnisse wurden einerseits Sensitivitätsanalysen hinsichtlich der abgebildeten Prozesse und der verwendeten Materialien durchgeführt und die Ergebnisse schlussendlich evaluiert.

1.2.3 Forschungsfragen

Aus gegebenem Anlass stellen sich folgende Fragen:

- Wurden bereits vergleichbare Analysen für den zyklischen Tunnelbau durchgeführt?
 - Falls ja, wie detailliert ist das Ergebnis und wie repräsentativ ist es?
- Welche Ergebnisse liefert die Untersuchung?
 - Wie wirkt sich der Querschnitt bzw. die Geologie auf die Ergebnisse aus?
 - Welche Lebenszyklusphasen beeinflussen das Ergebnis am meisten?
- Wo liegen ökologische Potentiale für die Verbesserung und welche Stellschrauben gibt es?

1.3 Nachhaltigkeit in der Bauwirtschaft

Der Begriff Nachhaltigkeit hat allgemein und speziell im Bauwesen viele Facetten [31]. Vor mehr als 300 Jahren wurde der Begriff erstmals von Hans Carl von Carlowitz als Schöpfer des Begriffs in seinem Buch „Sylvicultura Oeconomica“ verwendet. In den letzten Jahren wurde diese ursprünglich forstwirtschaftliche Bedeutung immer mehr in den allgemeinen Sprachgebrauch für die unterschiedlichsten Kontexte transformiert. Die heutige Definition wird oftmals sinngemäß mit Adjektiven wie langfristig, zukunftsfähig, dauerhaft, ganzheitlich, umweltverträglich, ressourcenschonend usw. assoziiert. [31–34]

Diese Synonyme können aber nicht nur für die rein ökologischen Aspekte verwendet werden. So hat sich im wissenschaftlichen Kontext neben dem Drei-Säulen-Modell unter anderem auch das Modell mit den Schnittmengen von drei Kreisen der Nachhaltigkeit durchgesetzt, welches die Zusammenhänge und Zielkonflikte besser verdeutlicht (siehe Abb. 1-1). Die Darstellung als Venn-Diagramm verdeutlicht, dass die anzustrebende Nachhaltigkeit ein Kompromiss aus allen drei Schnittbereichen – Soziales, Ökologie und Ökonomie – ist. Nachhaltigkeit soll demnach auch die Erträglichkeit des Wirtschaftens unter der gesellschaftlichen Überlebensfähigkeit sowie der sozialen und ökologischen Gerechtigkeit beinhalten. Diese theoretische Interessensharmonie ist in einer Welt begrenzter Ressourcen in ihrer perfekten Umsetzung letztlich unmöglich. Nichtsdestotrotz verfolgen zusammenhängende Aspekte wie Ressourcenschonung durch Materialeinsparungen bzw. Materialoptimierungen, Langlebigkeit der Bauwerke, Kreislaufführung von verwendeten Baustoffen und Bauteilen, Regionalisierung u. v. m. das Ziel, die gemeinsame Schnittmenge möglichst zu maximieren. [31]

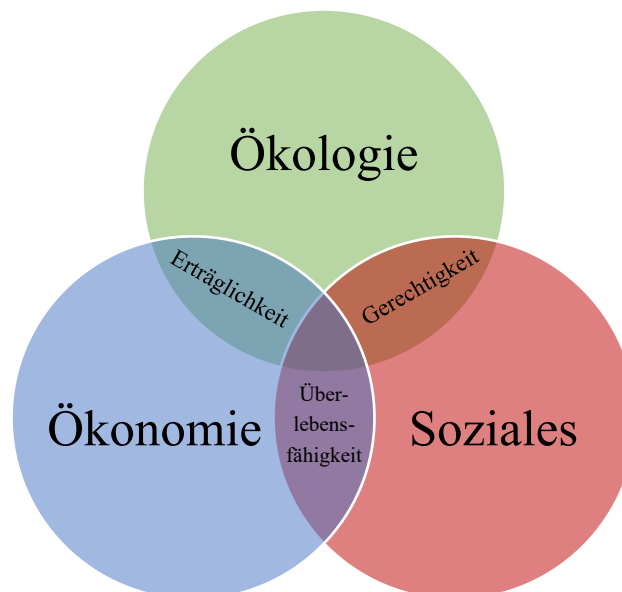


Abb. 1-1: Nachhaltigkeitsaspekte als Kreise, adaptiert nach [31]

Ein Nichtstun ist trotz der schwierigen Ausgangslage jedoch vor dem Hintergrund globaler Umwelt- und Klimaproblematiken nicht vertretbar. Diese Dringlichkeit der Implementierung und Umsetzung sofortiger Maßnahmen hinsichtlich Nachhaltigkeit äußert sich vor allem durch

den globalen Temperaturanstieg, die Zunahme anthropogener Einflüsse auf bestehende Systeme sowie die Übernutzung natürlicher Ressourcen. [35]

Auch auf politischer Ebene fand diese Dringlichkeit Anklang und wurde bereits 1992 von den Vereinten Nationen (UN) diskutiert und als Leitgedanke aufgenommen. Der ursprüngliche Leitgedanke wurde 2015 in einer UN-Generalversammlung einstimmig als Agenda 2030 verabschiedet. Infolgedessen wurden 17 spezifische Nachhaltigkeitsziele (*Sustainable Development Goals*, SDGs) beschlossen, wobei ein zentrales Ziel darin besteht, eine qualitativ hochwertige, nachhaltige und widerstandsfähige Infrastruktur zu schaffen (SDG 9). [32, 36, 37]

Der Bausektor zählt zu den maßgebenden Emittenten, da er 2023 für mehr als ein Drittel (ca. 34 %) der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich war. Die Treibhausgasemissionen (THG) in der Nutzung erreichten einen Rekordwert von ca. 9,8 Gigatonnen an CO₂-Äquivalenten und der Fußabdruck der grauen Emissionen erreichte etwa 2,9 Gigatonnen an CO₂-Äquivalenten. Erstere sind *Operational Emissions* und darunter werden alle Emissionen, welche durch den Betrieb und die Instandhaltung entstehen (z. B. Beleuchtung, Reinigung, Kühlung etc.), verstanden. Hingegen werden unter *Embodied Emissions* alle (grauen) Emissionen verstanden, welche mit dem Bau eines Bauwerks verknüpft sind. Diese Emissionen berücksichtigen die Gewinnung, die Herstellung und den Transport von Baumaterialien sowie die Bauausführung vor Ort. Nach der Lebensdauer werden Effekte aus *End-of-life*-Prozessen wie dem Abriss oder der Wiederverwendung dazugezählt. [38, 39]

Grob gesehen ist der CO₂-Fußabdruck eines Bauprojekts die Summe aus den Emissionen, welche in den Bauphasen (Herstellung und Entsorgung) und während des Betriebs über die gesamte Lebensdauer entstehen. Infolgedessen konnten die globalen THG-Emissionen des Bausektors im Jahr 2023 mit 12,7 Gigatonnen an CO₂-Äquivalenten quantifiziert werden kann (siehe Abb. 1-2). [38, 39]

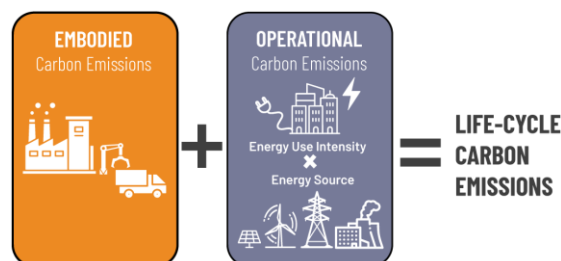


Abb. 1-2: Graue Emissionen und betriebsbedingte Emissionen als Summe der Lebenszyklusbetrachtung [38]

Mehr als 75 % entstehen dabei betriebsbedingt und setzen sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammen (siehe Abb. 1-3 links). Laut dem *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25* der Vereinten Nationen gliedern sich diese Bestandteile wie folgt (siehe Abb. 1-3 rechts) [39]:

- ca. 21 % entfallen auf den Hochbau
 - Residential (direct)

- Residential (indirect)
- Embodied Emissions
- ca. 15 % entfallen auf den Tiefbau
 - Non-residential (direct)
 - Non-residential (indirect)
 - Embodied Emissions

Die o. g. prozentuelle Differenzierung in Hoch- und Tiefbau berücksichtigt dabei die verwendeten Baustoffe, welche innerhalb von *Buildings construction industry* und *Other construction industry* als *Embodied Emissions* auftreten. Etwa 18 % fallen dabei allein auf Materialien wie beispielsweise Stahl und Zement. [35, 39]

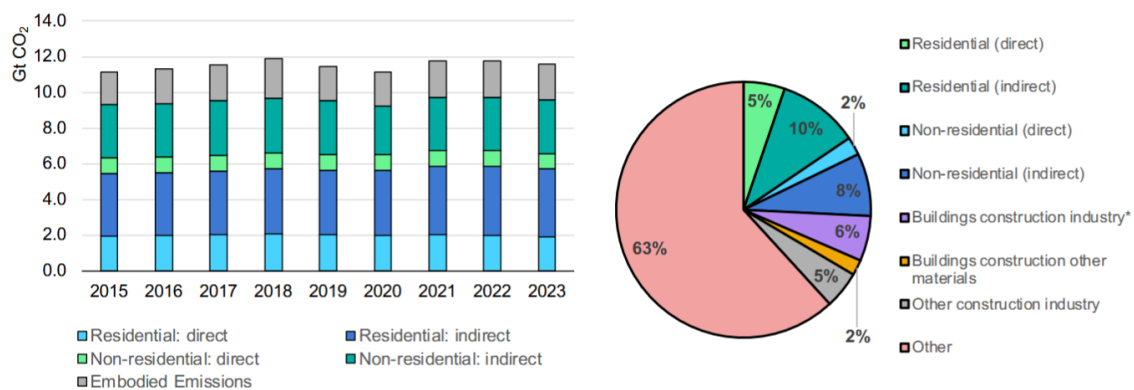


Abb. 1-3: Absoluter und prozentueller Anteil des Bausektors an den globalen THG-Emissionen in 2023 [39]

Die Baubranche ist durch eine ausgeprägte Vielfalt an Stakeholdern geprägt, bei der eine Vielzahl an Beteiligten oft stark divergierende Interessen verfolgen. Diese inhärente Komplexität wird durch den vielschichtigen Lebenszyklus von Bauwerken zusätzlich verstärkt, der sich von der ersten Projektidee über die Planung und Errichtung bis hin zur Betriebsphase und dem finalen Rückbau erstreckt. Insbesondere im Bereich zukunftsfähiger Verkehrsinfrastrukturen stehen die involvierten Akteure aus der Bauwirtschaft und dem Mobilitätssektor vor tiefgreifenden Herausforderungen, was sich unter anderem bei der Notwendigkeit zur Reduktion von Treibhausgasemissionen zeigt (vgl. Abb. 1-3). [35, 40]

1.3.1 Nachhaltigkeit im Tunnelbau

Das Bewusstsein für die Notwendigkeit eines nachhaltigen Wandels der Baubranche hat daher auch Einzug im Tunnelbau gehalten [21]. Zu Beginn der Betrachtung ist jedoch festzuhalten, dass der Tunnelbau im Vergleich zu anderen Sparten der Baubranche sowie zum gesamten Bausektor prozentual gesehen nur einen geringen Anteil an den globalen Gesamtemissionen verursacht. Dies liegt aber auch vor allem daran, dass der Tunnelbaumarkt ein spezialisierter und zentralisierter Markt ist, so repräsentiert der asiatisch-pazifische Raum mehr als 70 % des globalen Marktes [26]. Genauere Aufschlüsselungen hinsichtlich Fachdisziplinen und ökologischer Aspekte liegen bislang nicht vor, deshalb wird ausgehend von ökonomischen Zahlen für den Untertagebau eine Abschätzung für die gesamten THG-Emissionen verwendet.

Die globale Bruttowertschöpfung im Bauwesen betrug 2024 weltweit ca. 16 Billionen US-Dollar bzw. 13,8 Billionen Euro [41], in Deutschland ca. 540 Milliarden Euro [42] und in Österreich ca. 28,2 Milliarden Euro [43]. Der globale Tunnelbaumarkt betrug im selben Jahr etwa 175 Milliarden US-Dollar bzw. 150,1 Milliarden Euro [44]. Aktuelle Zahlen für Österreich und Deutschland sind schwer zu finden, deswegen wurden ältere Daten aus Marktanalysen von der *International Tunneling and Underground Space Association* (ITA) von 2016 und 2019 für eine Extrapolation verwendet und ergeben sich somit zu 1,4 Milliarden Euro in Österreich bzw. 3,0 Milliarden Euro in Deutschland [45, 46]. Daraus wurden die Anteile des Tunnelbaus bestimmt und diese ergeben sich global gesehen zu ca. 1,1 %, in Deutschland zu ca. 0,55 % und in Österreich zu ca. 4,9 %. Die gesamte tabellarische Auflistung der zuvor genannten Werte ist in Tab. 1-1 abgebildet.

Regionalität	Bauvolumen [Mrd. €]	Tunnelbauvolumen [Mrd. €]	Anteil Tunnelbau [%]
Weltweit	13.794,4	150,1	1,09%
Österreich	28,2	1,4	4,85%
Deutschland	555,0	3,0	0,55%

Tab. 1-1: Ökonomischer Anteil Tunnelbau global und in Österreich im Jahr 2024

Als Erweiterung und auf Basis einer vergleichbaren Herangehensweise, wird der Anteil des Tunnelbaus aus der prozentuellen Verteilung gemäß Abb. 1-3 und der ökonomischen Situation lt. Tab. 1-1 extrahiert. Ausgehend von dem bereits erwähnten Anteil von 15 % des Tiefbaus der globalen THG-Emissionen (inklusive der verwendeten Baustoffe, als *Embodied Emissions*), wird der bisher nicht genau quantifizierte Tunnelbau herausgefiltert. Der Tunnelbau ist Teil vom Infrastrukturbau und der Anteil des Infrastrukturmarkts am Markt des gesamten Tiefbaus wird mit ca. 30 % geschätzt [26]. Wiederum betrug der Anteil des Tunnelbaus am gesamten Infrastrukturprojektmarkt im Jahr 2019 etwa 6,5 % [45]. Daraus ergibt sich eine Abschätzung über den Gesamtanteil des Tunnelbaus mit 0,3 % an den globalen THG-Emissionen. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit dem Zahlenwert von 0,29 % für das Jahr 2019 aus einer ähnlichen Analyse zum ökologischen Anteil [26]. Für Österreich gibt es keine konkreten Zahlen, jedoch wird der Anteil des Untertagebaus in Deutschland für das Jahr 2021 mit 0,1 % betitelt [37], was in etwa der gleichen Größenordnung entspricht.

Basierend auf den globalen und deutschen Erkenntnissen wird die Situation damit in Österreich abgeschätzt. Es wird ein linearer Zusammenhang zwischen den ökonomischen und ökologischen Anteilen des Tunnelbaus angenommen. Dabei wird dieser Zusammenhang durch die Steigung der Gerade mit den zwei Punkten des ökonomischen und ökologischen Anteils beschrieben (vgl. Abb. 1-4). Anschließend wird der Mittelwert der Zusammenhänge – also der beiden Steigungen – auf deutscher und globaler Ebene mit dem ökonomischen Wert von Österreich verknüpft. Somit ergibt sich ein geschätzter Anteil der THG-Emissionen des Tunnelbaus von etwa 4,2 %. Demnach kommt diesem Teilbereich unter österreichischen Verhältnissen in Bezug auf den infrastrukturellen sowie gesellschaftlichen Nutzen eine überproportionale Bedeutung zu [37].

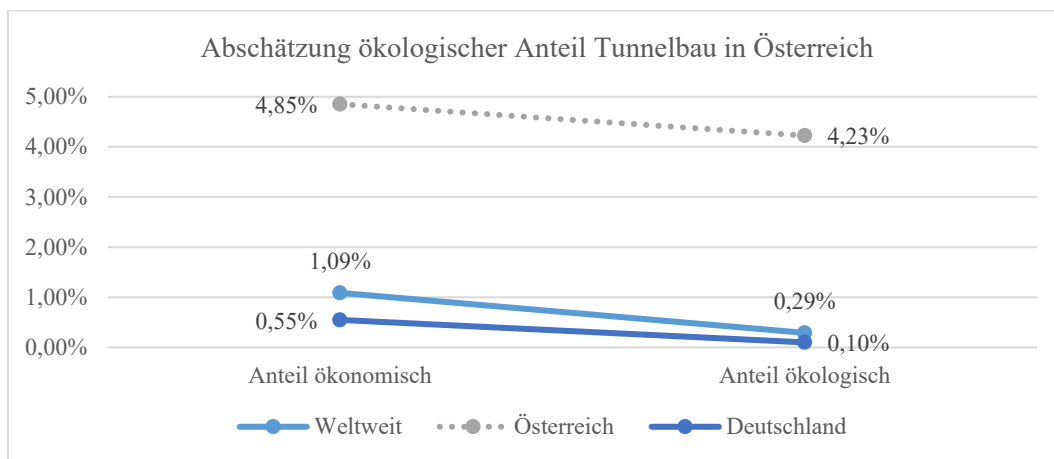


Abb. 1-4: Abschätzung ökologischer Anteil Tunnelbau in Österreich

Die Realisierung von Untertagebauwerken ist aufgrund des enormen Ressourceneinsatzes, der intensiven Logistik und der langen Nutzungsdauer ein entscheidender Hebel für das nachhaltige Bauen im Infrastrukturbereich [21]. Etwa werden die materialbedarfsspezifischen Faktoren in Tonnen Material pro Meter an errichteter Infrastruktur für die größten Materialströme verschiedene Tunnelneubauprojekte (jeweils bergmännische Bauweise und zweigleisige bzw. zweispurige Tunnelröhre) gemäß einer Analyse vom Umweltbundesamt [9] abgeschätzt (vgl. Tab. 1-2). So sind schätzungsweise ca. 211 t Erdarbeiten, 95 t Beton und 8 t Stahl für den Neubau von Eisenbahninfrastruktur pro Meter erforderlich [9].

Materialbedarfsspezifische

Faktoren für den Neubau [t/m]	Eisenbahntunnel	Autobahntunnel	Straßentunnel
Erdarbeiten	87,7	210,8	183,4
Beton	47,8	95,2	82,8
Bewehrungs- und Baustahl	2,3	7,6	6,6

Tab. 1-2: Materialbedarfsspezifische Faktoren Tunnelneubau [9]

Eine andere Analyse kommt zu ähnlichen Ergebnissen und schätzt die Beton- und Stahlmassen von bergmännisch vorgetriebenen Schieneninfrastrukturtunneln anhand von bereits umgesetzten Projekten und Regelprofilen ab (siehe Tab. 1-3) [47]. Der immense Materialbedarf unterstreicht die zuvor thematisierten ökologischen Auswirkung von Zement und Stahl.

Mengengerüst [t/km]	Eisenbahntunnel, eingleisig	Eisenbahntunnel, zweigleisig
(Spritz- und Konstruktions-) Beton	94.100	124.100
Bewehrungsstahl	2.400	3.900

Tab. 1-3: Mengengerüst Tunnelneubau [47]

So ist beispielsweise ein beachtlicher Anteil der Mengen an deponiertem Inert-Material in Österreich unter anderem auf große Tunnelbauprojekte zurückzuführen (bspw. fallen beim Bau des Brenner Basistunnels insgesamt ca. 17 Mio. m³ an Tunnelausbruchsmaterial² an [49, 50]). Etwa 93 % des zu deponierenden Abfalls von Infrastrukturprojekten betrifft Aushubmaterial, das im Zuge derartiger Bautätigkeiten anfällt [10]. Aspekte wie Ressourcenschonung, Klimaschutz und die Reduktion von Treibhausgasen gewinnen kontinuierlich an Bedeutung [51]. Derartige Bauvorhaben werden daher zunehmend so realisiert, dass sie sowohl der ökologischen Verantwortung gegenüber kommenden Generationen [52] gerecht werden, als auch den übergeordneten regulatorischen Vorgaben der Europäischen Union (EU) – wie beispielsweise dem *European Green Deal* oder der EU-Taxonomie – entsprechen [51]. Vor diesen Hintergründen hat sich das konzeptionelle Grundgerüst der Nachhaltigkeit im Tunnelbau gewandelt.

Um Nachhaltigkeit im Tunnelbau planbar, messbar und schlussendlich auch umsetzbar zu machen, ist eine differenzierte Betrachtung nach verschiedenen Systemgrenzen und Entscheidungsebenen erforderlich. Nachhaltigkeitsaspekte dürfen nicht erst auf der Baustelle ansetzen, sondern müssen sich über den gesamten Lebenszyklus von der ersten strategischen Planung bis zum Betrieb erstrecken. Diese Entwicklung manifestiert sich derzeit in vielfältigen Initiativen auf unterschiedlichen Systemebenen. Mit Vorgriff auf Kapitel 1.5 wird hierbei aus wissenschaftlicher Betrachtung methodisch zwischen drei wesentlichen Ebenen unterschieden, welche sich durch ihre spezifischen Stellschrauben, Akteure, Detaillierungsgrade und ökologischen Hebelwirkungen auszeichnen: der Korridorebene, der Bauwerksebene und der Baustellen- bzw. Baustoffebene. [53]

Die entscheidenden Weichen für die nachhaltige Umsetzung einer Baumaßnahme werden bereits in frühen Planungsphasen auf der Bauwerks- und Korridorebene gestellt. Obwohl die Entscheidungsbasis in dieser frühen Phase oft mit großen Unsicherheiten bzw. Unklarheiten behaftet ist, ist das Potenzial zur Vermeidung von Umweltbelastungen sowie den dafür notwendigen Kosten durch den anfänglich noch großen Handlungsspielraum dort am größten. Frühe (Fehl-)Entscheidungen können in späteren Phasen kaum noch kompensiert werden (siehe Abb. 1-5). [54]

² Die größte Deponie vom Brenner Basistunnel (BBT) befindet sich im Padastertal in Tirol und besitzt ein Fassungsvermögen von 7,5 Mio. m³, was dem Volumen von drei Cheops-Pyramiden entspricht [48].

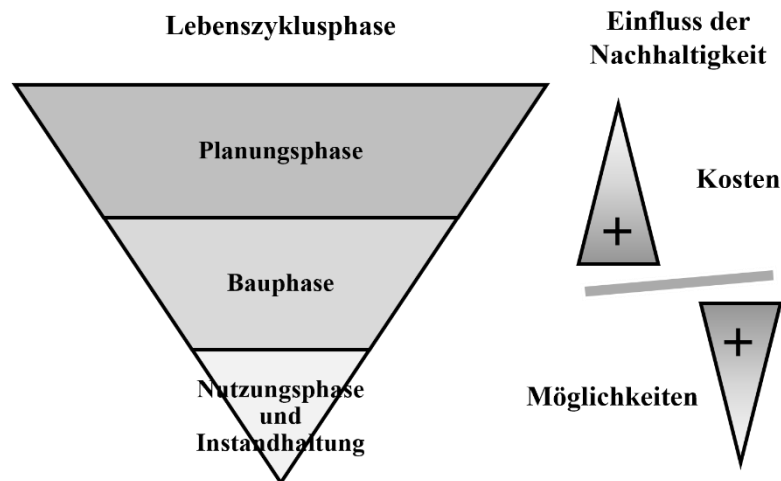


Abb. 1-5: Implementierung Nachhaltigkeit und Einfluss, adaptiert nach [54]

Auf der Korridorebene werden fundamentale Entscheidungen wie Trassenwahl oder Linienführung im Raum unter Berücksichtigung der vorherrschenden Geologie sowie des geplanten Tunnelquerschnitts und den späteren Nutzungsanforderungen getroffen. Diese Entscheidungen beeinflussen wechselwirkend wesentlich die Bauwerksebene bezüglich Materialwahl, Vortriebs- und Bauprozess sowie Baulogistik usw. [55]. Dabei wird die Baukonstruktion direkt mit der Bauwirtschaft sowie der Bauabwicklung verknüpft und die Energie- und Materialverbräuche während der Vortriebsphase bestimmt. Zudem fließen im erweiterten Sinn die Aspekte der Dauerhaftigkeit, Lebensdauer, Rückbaubarkeit und Kreislaufführung direkt in den Entwurf ein [53]. Weiters werden enorme Massenströme determiniert, da frühzeitig entschieden werden muss, wo Ausbruchsmaterial deponiert oder idealerweise direkt wiederverwendet werden kann. Für den Erfolg einer holistischen und integralen Planung bedarf es frühzeitige Optimierungen ökologischer und infolgedessen auch ökonomischer Zielsetzungen. Jedoch müssen sowohl die Herstellungskosten als auch die künftigen Betriebs- und Instandhaltungskosten in Betracht gezogen werden, um bautechnische sowie anlagentechnische Optimierungen vollumfänglich zu integrieren [56].

Abgesehen von der Trassenwahl, muss im ersten Schritt bestimmt werden, ob ein solches Bauwerk überhaupt notwendig ist. Dabei werden anhand von Machbarkeitsstudien oder groben Vorplanungen grundlegende Bauwerks- und Trassenvarianten untersucht sowie teilweise Anforderungsprofile wiederholend geprüft und ggf. adaptiert [57, 58]. Darüber hinaus liefern Vergleiche der sogenannten externen Kosten – bspw. Vergleich der Nullvariante mit der geplanten Maßnahme – sowie der zugehörigen Verkehrsbelastung bzw. Erschließungsprobleme eine Aussage über die Notwendigkeit des jeweiligen Projekts. Im Zuge von Neubau und Erhaltungsmaßnahmen sollen mögliche Verkehrsbeeinträchtigungen (z. B. Emissionen durch Stau oder Umfahrung) jedenfalls berücksichtigt werden. [58]

Die Baustellenebene stellt schließlich die operativste Stufe dar, auf der die Trasse und das Bauverfahren bereits vorgegeben sind und der Fokus auf der konkreten Material- und

Baustoffwahl sowie dem Ressourcenmanagement auf der Baustelle liegt. Vereinfacht lässt sich die Nachhaltigkeit dieser Ebene durch eine höhere Leistungsfähigkeit sowie Nutzungsdauer der Materialien und geringere Umwelteinwirkungen erreichen (siehe Abb. 1-6) [37].

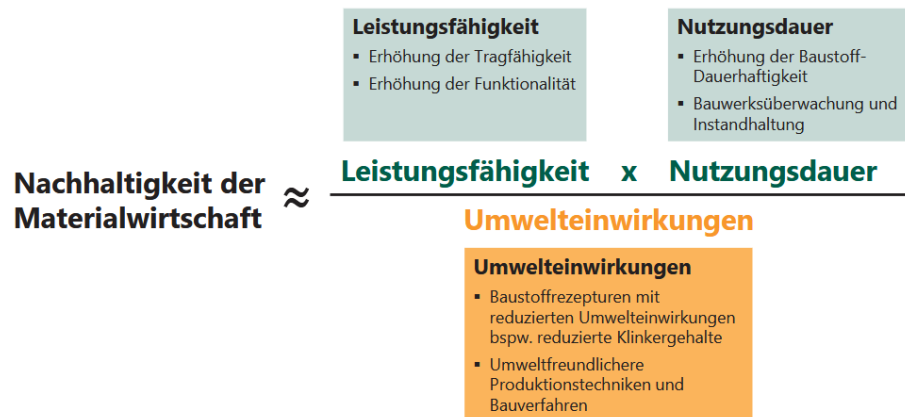


Abb. 1-6: Nachhaltigkeit auf Baustoffebene [37]

Darüber hinaus schlagen sich hier die grauen Emissionen der Baustoffe direkt in der Ökobilanz nieder, weshalb bereits kleine Optimierungen bei materialintensiven Komponenten wie Beton und Stahl große ökologische Auswirkungen haben. Beispielweise steht auf der Baustoff- und Produktebene in Bezug auf die Umwelteinwirkungen insbesondere die Dekarbonisierung des Betons im Fokus, wobei künftig vermehrt klinkerreduzierte Zemente (z. B. CEM II/C sowie CEM VI) zur gezielten Emissionsminderung beitragen sollen [59]. Über die reine Optimierung der Baustoffe hinaus zeigt sich bei Infrastrukturgroßprojekten ein Trend hin zu nachhaltigen Vergabekriterien. Staatliche Vorgaben – bspw. Emissionsgrenzwerte pro Tonne Bauprodukt – forcieren im Zuge der nachhaltigen Beschaffung den Einsatz ökologischer Materialien unter der Einbeziehung von gültigen Umweltproduktdeklarationen und beschleunigen so den Transformationsprozess der Branche. [53]

Diese drei Ebenen dürfen nicht isoliert betrachtet werden, sondern bauen hierarchisch aufeinander auf, da die Korridorebene den geometrischen Rahmen setzt, die Bauwerksebene den wesentlichen Bauprozess definiert und die Baustellenebene diesen schließlich stofflich materialisiert. Für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung ist diese strukturierte Trennung essenziell, um ökologische und ökonomische Optimierungspotenziale im Tunnelbau voll auszuschöpfen.

Abgesehen von der auf den drei Ebenen basierenden Betrachtungsweise, bietet eine Differenzierung der Ansätze für Nachhaltigkeit (in allen drei Säulen) in die zentralen Akteure eines Tunnelprojekts – Infrastrukturbetreiber, Planer, Bauindustrie und Wissenschaft – eine zusätzliche Sichtweise [55].

Aus Sicht des Infrastrukturbetreibers stehen vor allem die langfristige Sicherstellung der Netzverfügbarkeit sowie die Minimierung der Lebenszykluskosten über die gesamte Lebensdauer von häufig mehr als 100 Jahren im Fokus. Dies soll vordergründig durch die

Dauerhaftigkeit der Bauwerke und gut geplante Instandhaltungsmöglichkeiten erfolgen, um umfangreiche Sanierungsmaßnahmen sowie damit verbundene Betriebsunterbrechungen möglichst gering zu halten bzw. letztere gar zu vermeiden. Diese Anforderungen fußen jeweils auf allen Nachhaltigkeitsebenen, also exemplarisch von der frühen strategischen Korridorplanung zur Baustoffebene für die Dauerhaftigkeit bis hin zur langfristigen Instandhaltung und zum Betrieb. [55]

Die Planung wiederum trägt die Verantwortung, diese strategischen Nachhaltigkeitsziele in konkrete technische Entwürfe zu übersetzen. Basierend auf Variantenuntersuchungen und Lebenszyklusanalysen sollen konstruktive Optimierungen sowie gezielte Materialreduktion diese Anforderungen quantifizieren, sowohl am weißen Blatt Papier als auch projektbegleitend durch den stetigen Informationszuwachs (z. B. kontinuierliche Anpassung der notwendigen Innenschale aufgrund von neuen geologischen Erkenntnissen) [55]. Der Prozess der operativen Umsetzung wird schließlich der Bauindustrie zugeordnet. Hier ist den jeweiligen Unternehmen prozessbedingt ein vielseitiger Handlungsspielraum gegeben. Speziell sind der Einsatz innovativer, klimaschonender Baustoffe, allen voran klinkerreduzierte Zemente für den Tunnel- und Spritzbeton, wiederholend zu nennen [21]. Ein weiterer Kernaspekt der Bauausführung ist das Schließen von Stoffkreisläufen, bei der bspw. das anfallende Ausbruchsmaterial – natürlich stark geprägt von geologischen und bautechnischen Abhängigkeiten – direkt vor Ort aufbereitet und als Gesteinskörnung für den Beton wiederverwendet wird [60, 61]. Ein besonderes Augenmerk soll auf die Einsparung von Material und Energie gelegt werden (z. B. bei Transportwegen und Primärressourcen). [55]

Die Forschung kann nun genau an diesem Punkt ansetzen und für diesen ganzheitlichen Transformationsprozess die methodischen Grundlagen und Werkzeuge liefern. Speziell die Standardisierung von Ökobilanzdaten (Ökodaten) und die Entwicklung automatisierter Prozesse, um ökologische Kennwerte über den gesamten Lebenszyklus zu erhalten, ist unabdingbar. Dieser Ansatz gestaltet sich jedoch aufgrund von derzeit noch fehlenden Daten als sehr schwierig [62, 63].

Zusammenfassend lässt sich das Nachhaltigkeitsergebnis von Verkehrsinfrastrukturprojekten maßgeblich in den frühen Projektphasen bestimmen. Insbesondere die Planungsentscheidung, wo die zukünftige Tunneltrasse verlaufen soll, ist essenziell für die eingesetzte Menge bzw. Materialität der Baustoffe, den tunnelbautechnischen Vortriebsprozess, die darauffolgende Innenschale sowie spätere Instandhaltungsmaßnahmen über den Lebenszyklus usw. [55]. Eine frühzeitige Implementierung der Nachhaltigkeitsbewertung bietet somit die Chance, nachhaltiges Bauen und Entscheidungsprozesse zu unterstützen. Darüber hinaus können nachhaltige Transformationen im Tunnelbau nur gelingen, wenn die traditionellen, rein ökonomischen Vergabekriterien aufgebrochen werden und alle beteiligten Akteure an den Schnittstellen nahtlos zusammenarbeiten, um ökologische Nachhaltigkeit transparent messbar und vertraglich bindend zu verankern [55]. Mithilfe solcher interdisziplinärer Planungs- und

Optimierungsprozesse können Nachhaltigkeitsaspekte einerseits in frühen Phasen, aber andererseits auch in fortgeschrittenen und bereits laufenden Bauphasen umgesetzt werden [56].

1.4 Bedeutung von Ökobilanzdaten im Infrastrukturbau

Die zunehmende Bedeutung der Nachhaltigkeit im Tunnelbau führt – wie im vorigen Kapitel bereits erläutert – dazu, dass ökologische Kriterien neben technischen und wirtschaftlichen Aspekten (wie etwa der technischen Machbarkeit und ökonomischen Tragbarkeit) verstärkt in den Mittelpunkt von Planungs- und Entscheidungsprozessen rücken. Diese Gesichtspunkte erstrecken sich beispielsweise von der grundlegenden Trassenwahl und der damit einhergehenden Wahl der Vortriebsmethode, über die eingesetzten Geräte und deren Antriebsweise sowie den eingesetzten Beton in der Innenschale bis hin zu den gewählten Beleuchtungsmitteln für die spätere Betriebsphase des Tunnels. Eine zentrale Entscheidungsgrundlage bilden Ökobilanzdaten, da nur durch eine fundierte Datengrundlage die Umweltwirkungen nachvollziehbar erfasst, objektiv verglichen und somit fair bewertet werden können. Nur auf Basis belastbarer Werte lassen sich die Umweltauswirkungen unterschiedlicher Verfahren miteinander vergleichen und als entscheidungsrelevante Kriterien bereits in frühen Planungsphasen berücksichtigen. Jedoch stellt der Mangel an spezifischen Ökodaten derzeit eine erhebliche Hürde dar, da für die spezialisierten Bauverfahren und Materialien des Infrastrukturbaus, geschweige denn des Tunnelbaus noch kaum/ keine validen, technisch und geografisch repräsentativen sowie standardisierten Kennwerte vorliegen. [21, 22, 53, 56, 64]

Während im Hochbau Zertifizierungssysteme wie ÖGNI oder DGNB uvm. sowie standardisierte Ökobilanzierungen bereits seit längerer Zeit etabliert sind, rückt die Dekarbonisierung des Tunnel-, Tief- und generell des Infrastrukturbaus erst seit jüngerer Zeit verstärkt in den Fokus [31, 40]. Im Infrastrukturbau steht dabei aber weniger die nachträgliche Zertifizierung einzelner Bauwerke im Vordergrund, sondern vielmehr die Nutzung von Bewertungsverfahren als Planungs- und Entscheidungswerkzeug. Anders als im Hochbau besitzen Infrastrukturprojekte wie Tunnel, Straßen oder Brücken keinen klassischen Verkehrswert im Sinne eines Immobilienwertes, weshalb eine nachträgliche Zertifizierung häufig nur begrenzten Nutzen bietet [64]. Deutlich adäquater in Bezug auf solche Bauwerke erscheint eine frühzeitige Anwendung von Ökobilanzierungen im Planungsstadium, etwa bezogen auf die Leistungsvergleichbarkeit oder im Rahmen von Variantenvergleichen unterschiedlicher Trassenführungen oder Tunnelkonzepte. Dadurch können bereits frühzeitig Informationen über lebenszyklusweite Umweltwirkungen, Errichtungs- und Instandhaltungskosten sowie gesellschaftliche Auswirkungen bereitgestellt werden [64].

Die Definition von quantifizierbaren Referenz- und Zielwerten kann ebenfalls als weiteres methodisches Fundament zur Reduzierung klimarelevanter Emissionen fungieren. Dieser Ansatz wurde im Hochbausektor bereits seit über zehn Jahren integriert. Die Übertragung und

Erreichung ambitionierter Grenzwerte für graue Emissionen im Infrastruktursektor setzen jedoch nicht nur normative Rahmenbedingungen des Gesetzgebers oder der Auftraggeber sowie technologische Innovationen voraus. Vielmehr erfordert die baubetriebliche Praxis eine gezielte Koppelung mit ökonomischen Anreizsystemen. Etwa durch die Verankerung von Bonus-Malus-Regelungen im Rahmen des gesetzlich präferierten Bestbieterprinzips nach dem BVergG [65] – etwa über die Monetarisierung von CO₂-Schattenpreisen als Zuschlagskriterium für das technisch und wirtschaftlich günstigste Angebot – kann die effektive und effiziente Einhaltung der Reduktionspfade marktwirtschaftlich sichergestellt werden. [25]

Aber besonders der Tunnelbau stellt dabei aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen Bauverfahren, geologischen Randbedingungen und baubetrieblichen Abläufen einen besonders anspruchsvollen Anwendungsbereich innerhalb der Ingenieurbauwerke dar [66]. Eine strukturierte und objektive Bewertung der Nachhaltigkeit gestaltet sich daher besonders komplex und anspruchsvoll [53]. Zusätzlich erschweren die spezifischen Rahmenbedingungen und die hohe Individualität von Tunnelbauprojekten die Durchführung von Ökobilanzierungen erheblich. Häufig müssen Systemgrenzen abstrakt und vergleichsweise weit gefasst definiert werden, um die komplexen Zusammenhänge angemessen abzubilden. Jedoch sind klare Definitionen des Bewertungszwecks sowie geeigneter räumlicher und zeitlicher Systemgrenzen Voraussetzung dafür [64]. Dabei soll aber gleichzeitig das Ziel, die wesentlichen Einflussgrößen der Ökobilanz im Tunnelbau zu identifizieren, nicht aus den Augen verloren werden [26].

Vor diesem Hintergrund gewinnt die Entwicklung geeigneter Bewertungs- und Modellierungsansätze zunehmend an Bedeutung. Zur Beherrschung der hohen Systemkomplexität erfolgt analog zu vielen anderen ökobilanziellen Betrachtungen eine analytische Zerlegung des Tunnelbauwerks in einzelne Bestandteile. Durch diese hierarchische Dekomposition kann das Gesamtsystem transparent strukturiert werden, um die Zusammenhänge und kritischen Parameter lokalisieren zu können. Ergänzend dazu ermöglicht eine modulare Strukturierung die Untersuchung einzelner Teilmodelle unabhängig vom Gesamtmodell und unterstützt damit die Anpassungsfähigkeit sowie die detaillierte Analyse von Interdependenzen. Das entwickelte modulare Prozessmodell erlaubt eine transparente und ganzheitliche Betrachtung sämtlicher Lebensphasen von Tunnelbauwerken und schafft die Grundlage für Variantenuntersuchungen, Benchmarking sowie die Identifikation von Substitutions- und Optimierungspotenzialen. [66]

Derzeit fehlt in der Tunnelbaubranche noch ein allgemein anerkannter Nachhaltigkeitsmaßstab, wodurch die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Projekte erschwert wird. Zwar existieren bereits erste Ansätze zur Ermittlung von CO₂-Emissionen einzelner Projekte, jedoch fehlen häufig die Beschreibung der Repräsentativität sowie eine belastbare Grundlage zur Einordnung der Ergebnisse für den Vergleich mit ähnlichen Projekten [54]. Gerade Untertagebauwerke

stehen oftmals in Konkurrenz zu alternativen oberirdischen Lösungen. Die nachhaltige Bestvariante kann jedoch nur dann identifiziert werden, wenn die eingesetzten Bewertungssysteme sämtliche ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte nachvollziehbar und vollständig abbilden [37].

Ein Blick auf bereits durchgeführte Analysen zeigt, dass die ökobilanziellen Ergebnisse eine große Streuung aufweisen und sich stark voneinander differenzieren. So ist beispielsweise bei den Straßeninfrastrukturtunneln eine Bandbreite von etwa 0,9 bis 22 t CO₂-Äq. pro Tunnelmeter in der Fachliteratur angegeben [22–25, 53, 57, 67]. Ähnlich sieht es bei den Schieneninfrastrukturtunneln aus, hier ist von ca. 12 bis 28,5 Tonnen an CO₂-Äquivalenten pro Meter die Rede [22, 24, 25, 47, 53]. Diese Diskrepanz ist neben den natürlicherweise auftretenden projektspezifischen Unterschieden aber auch auf die unterschiedlichen Betrachtungsweisen bzw. Systemgrenzen zurückzuführen [22–25, 47, 57, 67].

Ein Grund dafür ist, dass einerseits geografisch bedingt nur gewisse (Nachbar-) Länder abgebildet worden sind bzw. diese Analysen daher nur bedingt auf österreichische Verhältnisse übertragbar sind. Hier ist neben Empfehlungen aus Deutschland [37, 67] beispielsweise eine Analyse zum zyklischen Tunnelvortrieb in Norwegen [23] zu nennen, welche aber aufgrund der stark abweichenden Geologie in Norwegen im Vergleich zu Österreich wenig mit den üblichen Abschlagslängen, Stützmittelmengen usw. in Österreich zu tun hat.

In Bezug auf die technische Repräsentativität beschäftigten sich weitere Literaturen zwar übergeordnet mit dem Tunnelbau, aber bilden andere Bauverfahren, wie etwa den kontinuierlichen (maschinellen) Vortrieb, ab [34]. Andere wiederum forcieren nur gewisse Bestandteile – z. B. Tübbinge im maschinellen Tunnelbau [68, 69], Innenschalen im zyklischen Tunnelbau [70] oder spätere Bauteile wie den Oberbau [32] – des Gesamtsystems „Tunnel“. Andere Literaturen bewegen sich eher auf der Materialebene und lassen die Bauprozesse außen vor [49]. Solche materialbasierten Analysen bilden nichtsdestotrotz verwertbare Vergleichswerte, denn die europäischer Klimapolitik verpflichtet zunehmend das Bauwesen dazu, Informationen zu Umweltwirkungen der Baustoffe über die Bauprodukteverordnung preiszugeben. Diese Zulassungen sollen sich ebenfalls an lebenszyklusbezogenen Daten orientieren [71, 72].

Während andere einschlägige Fachliteraturen den (zyklischen) Tunnelbau hinsichtlich der Prozesse und eingesetzten Materialien zwar detailliert abbilden, weisen diese Untersuchungen aufgrund der stark projektspezifischen Rand-, Umgebungs- und Vortriebsbedingungen meist eine nur eingeschränkte Übertragbarkeit auf oder präsentieren die Ergebnisse nur in prozentueller Form [22, 24, 26]. Weiters basieren solche Untersuchungen oftmals auf konkreten Fallstudien bereits durchgeführter Projekte. Diese Werte sind aber angesichts der spezifischen Parameter im Hinblick auf die Projektgröße und Aktualität nur begrenzt aussagekräftig für die Verwendung als Durchschnittswerte. Die Verwendung von Referenz- und Zielwerten kommt dieser Intention zwar schon näher, da erstere zum Teil auf ermittelten Mittelwerten (bspw. je Bauwerkstyp anhand der Verkehrsart und der Fahrspuren) basieren, jedoch werden infolge der

beschränkten Datenlage meistens auch unspezifische Literaturwerte hinzugezogen bzw. die dazugehörigen Bauprozesse nicht detailliert genug abgebildet [25, 47].

Der Vergleich dieser Literaturen zeigt somit deutlich, dass die Ergebnisse stark von den geografisch, technisch und zeitlich abgebildeten Systemgrenzen sowie von den verwendeten Datengrundlagen abhängen und daher erhebliche Unterschiede aufweisen. Aus diesem Grund besteht vor allem auf nationaler Ebene ein derzeitiger Mangel an durchschnittlichen und österreichischen Ökodaten für den zyklischen Tunnelbau. Parallel dazu rücken Nachhaltigkeitsbewertungen und ökologische Kennwerte zunehmend in den Fokus des österreichischen Infrastrukturbaus. Das Niveau automatisierter Lebenszyklus-Analysen hinkt dem Hochbau zwar noch hinterher, wird jedoch durch eine Vielzahl an Forschungs- und Entwicklungsinitiativen aufgeholt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauverfahren, der Verankerung nachhaltiger Vergabekriterien sowie der Generierung spezifischer Umweltproduktdeklarationen mit dem Ziel solide Benchmark-Werte für die weitere Verwendung bereitzustellen. [32]

1.5 „LZinfra“ Tool

Aufgrund dieser steigenden Nachfrage an belastbaren Ökodaten im Infrastrukturbau gewinnen standardisierte Bewertungswerkzeuge für die Infrastruktur massiv an Bedeutung. Das über die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) laufende Pilotprojekt „LZinfra“ (Lebenszyklustool zur Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastrukturen) soll dabei den österreichischen Verkehrsinfrastrukturbau in eine nachhaltige Entwicklung lenken. Momentan befindet sich das Projekt am Ende des 3. Forschungsjahres und wartet auf eine Verlängerung für ein 4. Jahr (Stand Juni 2026). [73]

Solche Werkzeuge sind für die Zukunft unerlässlich, da sie eine einheitliche, transparente und national abgestimmte Bewertung ermöglichen. Anstatt auf aufwendige und oft unvergleichbare Einzelstudien angewiesen zu sein, soll ermöglicht werden, automatisierte und benutzerfreundliche Nachhaltigkeitsanalysen zu erstellen. Der Rahmen der Analyse erstreckt sich von Bauprodukten und Bauwerken bis hin zu ganzen Projektabwicklungen mit verschiedenen Trassenvarianten. Der Anwenderkreis reicht somit von Materialherstellern, Bauunternehmen und Planern bis hin zu Infrastrukturbetreibern. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, Materialien, Konstruktionen und Verkehrsinfrastrukturen konsistent und unter reduziertem Aufwand hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu untersuchen. [35]

Ein wesentliches Merkmal vom Bewertungssystem ist die Flexibilität, die Nachhaltigkeit je nach Projektphase auf den bereits erläuterten Bewertungsebenen (siehe Abb. 1-7 links) über den gesamten Lebenszyklus hinweg auf unterschiedlichen Detailstufen abzubilden [35, 73]:

- Korridorebene: Vergleich von Bestandstrassen und verschiedenen Trassenvarianten in frühen Projektphasen
- Bauwerksebene (Planungsphase): Detaillierte Optimierung spezifischer Bauwerke (z. B. Brücken oder Tunnel) und Auswahl nachhaltiger Materialien
- Baustellenebene (Vergabephase): Bewertung der eigentlichen Bauabwicklung zur Integration ökologischer Kriterien in den Vergabeprozess

Das System integriert automatisierte Ökobilanz- (LCA) und Lebenszykluskostenrechner (LCC), welche die Analyse von Bauprodukten und Projektabwicklungen ermöglichen. [73]



Abb. 1-7: Bewertungsebenen und zyklischer Tunnelrechner von „LZinfra“ [eigene Abbildung]

Die Untersuchung zur Nachhaltigkeit im zyklischen Tunnelbau wurde auf der Grundlage des „LZinfra“-Forschungsprojekts entwickelt und führt dessen Ansätze gezielt weiter. Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt dabei einerseits in der Analyse auf Korridorebene in frühen Planungsphasen durch die bereitgestellten Benchmark-Werte für einen übergeordneten Vergleich von Trassenvarianten. Andererseits kann in darauffolgenden Planungsphasen auf Bauwerksebene das jeweilige Bauwerk gezielt mithilfe der Ergebnisse, der Sensitivitätsanalyse und der Verbesserungspotenziale hinsichtlich Materialauswahl usw. optimiert werden.

Die Basis dafür war der zyklische Tunnelrechner (siehe Abb. 1-7 rechts), auf welchem die in dieser Arbeit präsentierten Erweiterungen sowie detaillierteren Berechnungen wurzeln. Jedoch sollen auch gewisse Ansätze dieser Masterarbeit wieder zurück in das Projekt fließen, wodurch der spezialisierte Bereich der Bewertung von Untertagebauwerken im zyklischen Vortrieb eine weiterentwickelte Betrachtung bzw. Berechnung erlangt. Damit leistet diese Arbeit auch über die interne universitäre Forschung hinaus einen wissenschaftlichen Beitrag.

2 Zyklischer Tunnelbau

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit den Grundzügen des Tunnelbaus. Dabei werden beginnend die Geschichte und die Grundlagen des Tunnelbaus sowie der neuen österreichischen Tunnelbaumethode kurz erläutert. Anschließend werden die unterschiedlichen Tunnelvortriebsmethoden angeführt und speziell der zyklischen Tunnelvortrieb genauer thematisiert. Dazu werden die relevanten bautechnischen Bestandteile sowie die Bauprozesse für ein Tunnelbauwerk beleuchtet, welche später in der Ökobilanz behandelt werden.

2.1 Allgemein

Der Tunnelbau repräsentiert einen der komplexesten sowie anspruchsvollsten Bereiche des Bauwesens und wird oft als „Königsdizziplin“ des Bauingenieurs betitelt [74].

Historisch betrachtet wurden die ersten Tunnelanlagen neben der Entwicklung aus dem Bergbau für die Gewinnung von Rohstoffen primär für die urbane Wasserversorgung konzipiert. Eine maßgebliche Intensivierung dieser Bauwerke setzte mit dem Aufschwung des Schienenverkehrs für Güter und Personen sowie des späteren Pkw-Individualverkehrs ein. Vor allem im alpenländischen Raum oder in topografisch anspruchsvollen Regionen lösten Tunnel die bisher verwendeten alpinen Trassierungen oder großräumigen Umfahrungen ab. Wie in der Einleitung bereits thematisiert, sind Tunnelbauwerke in der heutigen Zeit ein fester Bestandteil bei der Planung moderner Verkehrsinfrastrukturen. [75]

Da die Sparte des Tunnelbaus sehr umfangreich und äußerst vielfältig ist, wird im Folgenden nur die geschlossene Bauweise bzw. der bergmännische Vortrieb betrachtet. Speziell wird nur auf den zyklischen Vortrieb (konventioneller Vortrieb) in der Form des Spreng- und Baggervortriebs eingegangen (vgl. Abb. 2-1).

Die „Neue Österreichische Tunnelbaumethode“ (NÖT), eng. *New Austrian Tunnelling Method* (NATM), nutzt die selbsttragende Tragfähigkeit des Gebirges, um den Hohlraum mithilfe von Spritzbeton, messtechnischer Überwachung und Ausbauelementen wirtschaftlich zu stabilisieren. Durch kontrollierte radiale Verformungen aktiviert sich ein statisch wirksamer Gebirgstragring, der anstehende Spannungen in angrenzende, ungestörte Zonen ableitet. Dieses adaptive Verfahren ist im Locker- wie im Festgestein einsetzbar, erfordert jedoch eine permanente Anpassung an die lokalen hydro-geologischen Bedingungen wie beispielsweise Gesteinshärte, Gebirgszerlegung, Verwitterungsgrad und Wasserandrang etc. Somit ist diese flexible Methode, sich an das umgebende Gebirge anzupassen, ein Anpassungsverfahren (auf Englisch *passive approach*). [29, 74, 75]

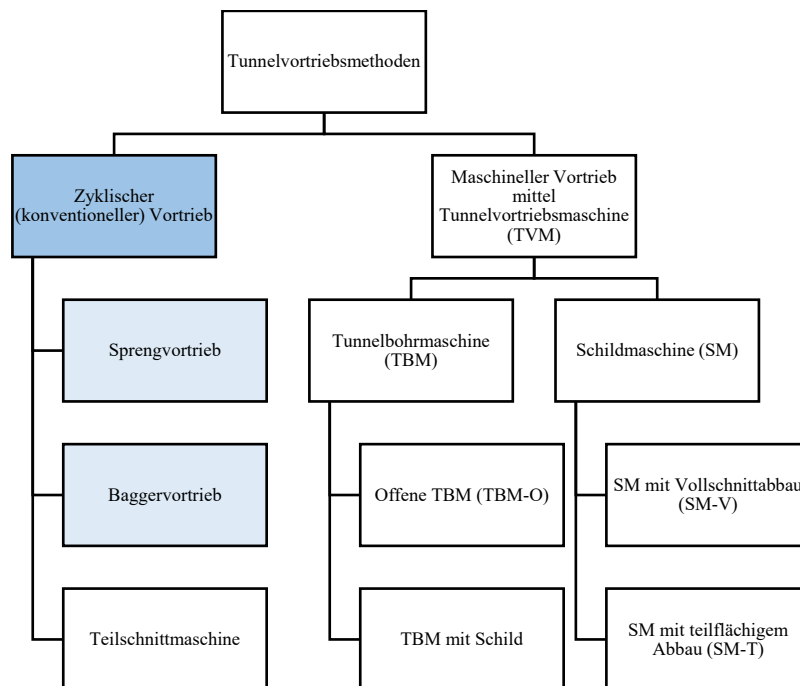


Abb. 2-1: Übersicht Tunnelvortriebsmethoden, adaptiert nach [75]

Beim namensgebenden zyklischen Vortrieb setzt sich die Abfolge der Arbeitsvorgänge, dem sogenannten Abschlagszyklus, aus sieben sich wiederholenden Teilprozessen zusammen: [74]

1. Bohren
2. Laden und Besetzen
3. Sprengen
4. Lüften (Bewettern)
5. Bereißen (Ablauten)
6. Schuttern
7. Sichern

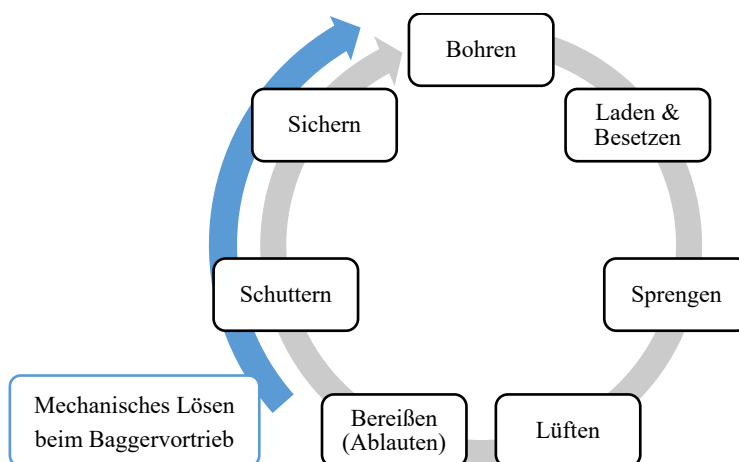


Abb. 2-2: Arbeitszyklus Sprengvortrieb (mit Baggervortrieb), adaptiert nach [75]

Die ersten fünf Prozesse entsprechen dabei dem mechanischen Lösevorgang beim Baggervortrieb (vgl. Abb. 2-2) [74]. Die zyklische Vortriebsleistung resultiert aus dem Zusammenspiel der drei Hauptfaktoren Geologie, Baubetrieb und Maschinen. Erstere ändert sich mit laufender Erkundungs- sowie Bauzeit stetig und ist vorab schwer abschätzbar. Der Baubetrieb ist vor allem abhängig von den Komponenten der Logistik und der handwerklichen Komponente, welche in starker Wechselwirkung mit den eingesetzten Maschinen für Ausbruch, Sicherung und Transport stehen. [75]

Da dieser flexible Ansatz schnelle Reaktionen bei Material, Gerät und Organisation verlangt, lässt sich der Erfolg im Tunnelbau nicht durch starre Konzepte lenken. Stattdessen sind eine kontinuierliche Anpassung sowie Rückkoppelung der neuen Erkenntnisse erforderlich. In diesen Prozess fließen sowohl quantitative Messdaten und statische Berechnungen als auch qualitative Informationen wie visuelle in-situ-Beobachtungen und geologische Erfahrungen ein. Als struktureller Leitfaden für diese geotechnische Planung, v. a. in frühen Projektphasen, dient etwa die Richtlinie der Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) [76]. [75]

Abgesehen von den geomechanischen Planungsaspekten stützen sich die normativen Vorgaben, die werkvertraglichen Rahmenbedingungen sowie die technischen Anforderungen des zyklischen Vortriebs in Österreich – wie einleitend erwähnt – auf die ÖNORM B 2203-1 [27]. Für die spätere Verwendung werden nachfolgend die wesentlichen Fachbegriffe des Untertagebaus auf Basis der o. g. Werkvertragsnorm konzise definiert (vgl. Abb. 2-3). Als Regelquerschnitt bezeichnet man den geometrisch geplanten und konstruktiv vorgegebenen Querschnitt eines Untertagebauwerks. Unter einem Teilquerschnitt versteht man die Unterteilung des plangemäßen Ausbruchprofils in mehrere Segmente zum Zwecke des Vortriebs. Diese Segmente gliedern sich in die Kalotte als obersten Teil der Ausbruchfläche in Vortriebsrichtung, die Strosse als mittleren Teil der Ausbruchfläche sowie die Sohle, welche die unterste Ausbruchs- und gleichzeitig die Begrenzungsfläche eines Querschnitts bildet. Die Laibung beschreibt die radiale Umgrenzung des Tunnelquerschnitts, die sich aus den Bereichen der Ulmen, der Kämpfer und der Firste zusammensetzt. [27]

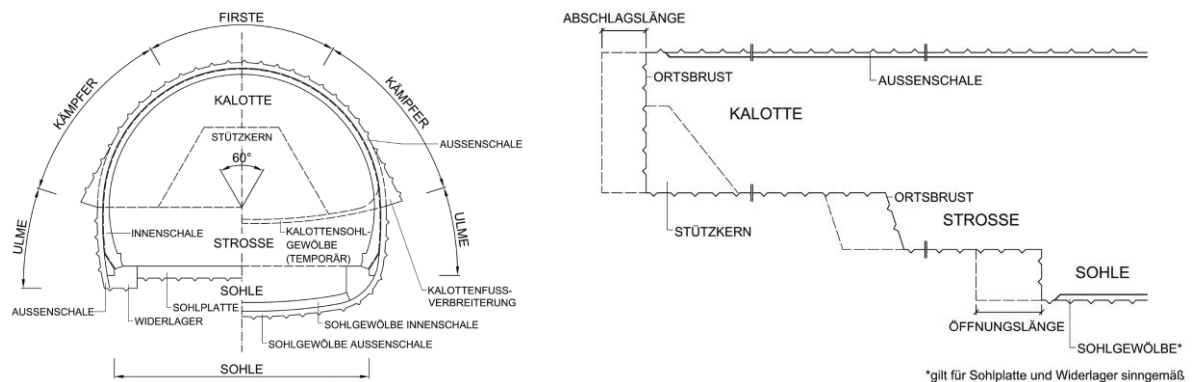


Abb. 2-3: Querschnitt und Längsschnitt eines Tunnels für die Bezeichnungen [27]

Die Ortsbrust stellt die Begrenzungsfläche dar, die am vordersten Teil des Untertagebauwerkes liegt und an der das Gebirge gelöst wird, wobei bei einem abgestuften Vortrieb folglich auch mehr als eine Ortsbrust existieren kann. Ein Abschlag ist der in einem einzelnen Abschlagszyklus geschaffene Abschnitt des Hohlraumes, dessen mittlere Dimension durch die von der Ortsbrust gemessene Abschlagslänge definiert wird. Der Ausbau umfasst die bauliche Stützung dieser Hohlraumlaibung, während die Innenschale das finale, innere Konstruktionselement des Untertage-Bauwerkes repräsentiert. [27]

Für eine klare Abgrenzung der Außen- und Innenschale werden diese im Zuge der Analyse gemäß der Abrechnungslinien definiert (siehe Abb. 2-4). Dabei beschreibt die Linie 1a die radiale Lage aller Stützmittel und die weiter außen liegende Linie 2 entspricht der Ausbruchslinie jeweils vor der Gebirgsverschiebung. Hingegen beschreibt die Linie 1b die radiale Lage und somit den Anschlusspunkt der Innenschale an die Außenschale nach der Gebirgsverschiebung. [27]

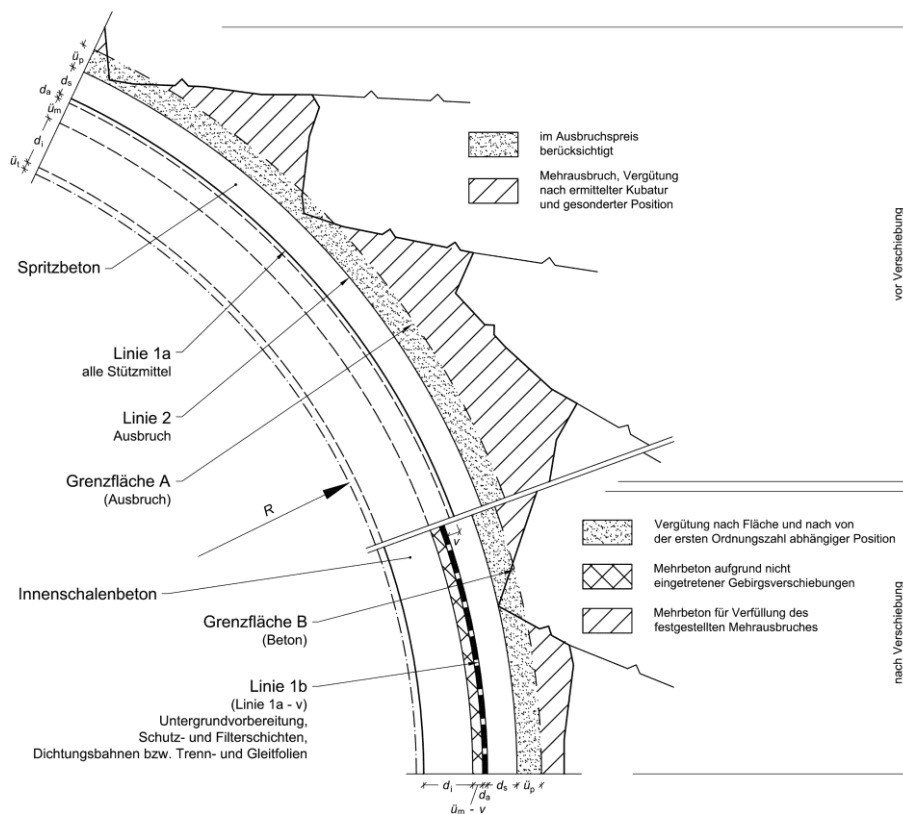


Abb. 2-4: Abrechnungslinien für Ausbruch, Stützmittel und Beton [27]

2.2 Vortrieb

Im Folgenden werden die einzelnen Prozesse des zyklischen Vortriebs ausgehend von dem zuvor beschriebenen Abschlagszyklus, jedoch aufgeteilt in Spreng- und Baggervortrieb, grob thematisiert. Dafür werden die technologischen und baubetrieblichen Vorgänge – vom ersten Anbohren der Ortsbrust bzw. dem ersten Kontakt mit den Grab- oder Fräswerkzeugen des Baggers bis hin zum Einbau der Stützmittel des neu aufgefahrenen Abschnitts – grundsätzlich beschrieben.



Abb. 2-5: Sprengvortrieb [77]



Abb. 2-6: Baggervortrieb [78]

2.2.1 Sprengvortrieb

Als initialer Prozess des Abschlagszyklus im Sprengvortrieb dient die Herstellung von Bohrlöchern, denen im Tunnelbau verschiedene bautechnische Aufgaben zukommen. Neben den klassischen Sprengbohrungen zur Aufnahme des Sprengstoffs direkt an der Ortsbrust (vgl. Abb. 2-5) ist der übergeordnete Prozess ebenfalls anderen Einsatzzwecken zuzuordnen wie bspw. Ankerbohrungen für das spätere Sichern oder Entlastungsbohrungen zur Reduktion des Bergwasserdrucks, vorausschreitende Erkundungsbohrungen zur geologischen Bestimmung sowie Messbohrungen für die geotechnische Sensorik. Die physikalischen Gesteinseigenschaften wie etwa Härte, Festigkeit und Zähigkeit definieren im Wesentlichen die Anforderungen an das Bohrwerkzeug, wobei moderne, EDV-gestützte Bohrwagen eine punktgenaue Ansteuerung der Bohrlöcher ermöglichen. Durch die softwaregestützte Automatisierung können somit selbstständig vorprogrammierte Bohrschemata hergestellt werden, wobei begleitend diverse Kennwerte (u. a. Bohrtiefe, Drehzahl und Netto-Bohrzeiten) erfasst und für die Bauwerksdokumentation ausgelesen werden können. [74, 75]

Die Steuerung des Bohrvorgangs und somit des Bohrerfolgs erfolgt über die kontinuierliche Justierung von Parametern wie Schlagleistung, Schlagfrequenz, Rotationsgeschwindigkeit, Drehmoment, Vorschubkraft und Spülwasserdruck usw. Das Gesamtsystem einer Bohrlafette besteht dabei im Wesentlichen aus dem Bohrhammer, der Verbindungsmuffe zur Kraftübertragung, der Lafette zur Gestängeführung, dem Bohrgestänge selbst und der an das jeweilige Gestein angepassten Bohrkronen. [74, 75]

Die Dimensionierung des Bohrwagens orientiert sich an der aufzufahrenden Querschnittsfläche des Tunnelbauwerks und bestimmt die Anzahl der eingesetzten Bohrarme (z. B. 3-armig bei großen Querschnitten). Diese Arme sind kinematisch so konstruiert, dass sie über mehrere Gelenkachsen jede Raumposition horizontal, vertikal oder schräg anfahren können und tragen entweder das Bohrgerät selbst oder Arbeitskörbe für die Personal- und Materialmanipulation. [74, 75]

Nach Fertigstellung des Bohrbildes wird der Sprengstoff, häufig bereits in patronierter Form, manuell mithilfe von Ladestöcken in die Bohrlöcher eingebracht, wobei höher gelegene Bereiche über die Arbeitskörbe erreicht werden. Die erforderliche Sprengstoffmenge und die spezifische Geometrie des Bohrbildes variieren bei jedem Abschlag in Abhängigkeit von den angetroffenen geologischen Verhältnissen. Die Ladungen werden händisch mit Zündern bestückt, zu Zündbündeln verdrahtet und an eine gemeinsame Zündleitung angeschlossen. Zur Initiierung dieser Bündel kommen entweder elektrische, elektronische oder nicht-electrische Zündsysteme zum Einsatz. Durch die gezielte zeitliche Staffelung der Detonationen im Millisekundenbereich lässt sich das Tunnelprofil exakt herausbrechen, was kostenintensive Nachprofilierungen bzw. Überprofile vermeidet. Das optimale Zusammenspiel aus Einbruchschüssen im Zentrum der Ortsbrust, Helferschüssen sowie Kranzschüssen am Rand formt die endgültige Kontur des Ausbruchs mit der gewünschten Abschlagslänge. [74, 75, 79]

Unmittelbar vor der Schussauslösung durch den Sprengmeister müssen sämtliche Mineure und Baggergeräte aus dem Gefahrenbereich zurückgezogen werden, um Beschädigungen sowie Verletzungen durch Steinflug sowie der Explosion selbst zu verhindern. Während der Sprengung wird die vortriebsstechnische Tunnelbelüftung (Bewetterung) temporär deaktiviert, um eine unkontrollierte Ausbreitung der Druckwelle und dadurch Schäden zu vermeiden. Bei der Detonation wandelt sich der Sprengstoff in einem hochexothermen Oxidationsprozess in gasförmige Sprengschwaden um, deren enormer Expansionsdruck das Gesteinsgefüge im Detonationsherd zermalmt und in den angrenzenden Risszonen Gesteinsfragmente heraustrennt. [74, 75, 79]

Nach der Sprengung wird die Bewetterung sofort wieder hochgefahren, um die toxischen Gase sowie die hohe Staubbelastung zu verdünnen und abzuführen, wobei der zeitliche Aufwand für diesen Luftaustausch mit zunehmender Tunnellänge progressiv ansteigt. Nach dem erfolgreichen Sprengvorgang und dem Abklingen der Sprengschwaden kann es notwendig sein, dass die Ortsbrust vor den nachfolgenden Arbeitsschritten abgelautet werden muss. Unter diesem Vorgang wird das gezielte Herunterreißen von losen Gesteinsfragmenten infolge der Explosion verstanden, was meist durch den Einsatz eines Tunnelbaggers erfolgt. [74, 75]

2.2.2 Baggervortrieb

Im Gegensatz zum Sprengvortrieb ersetzt das mechanische Lösen des Gebirges, wie zuvor bereits erwähnt, die ersten fünf Vorgänge des klassischen Sprengvortriebs, wodurch der

Vortriebszyklus direkt mit dem Ausbruch beginnt. Im Gebirge mit geringer Festigkeit sowie im Lockergestein kommen für diesen mechanischen Ausbruch spezielle Tunnel- oder auch Tunnelladebagger zum Einsatz, da herkömmliche Hydraulikbagger aufgrund fehlender Freiheitsgrade die erforderliche Profilgenauigkeit nur schwer erreichen können. Die eingesetzten Geräte verfügen daher über geeignete Ausleger, welche sich neben der kompakten und robusten Bauweise auch seitlich verschwenken lassen. [74, 75]

Für das Lösen können die Geräte je nach Geologie flexibel mit Anbaugeräten wie speziellen Tieflöffeln, Meißeln und Reißzähnen im Lockergestein oder Hydraulikhämmern und Fräsen bspw. bei härteren, eingelagerten Felsbänken bestückt werden. Bei kleineren Querschnitten werden zudem raupen- oder radgebundene Tunnelladebagger eingesetzt, die über eine vertikale Achse statt eines Drehkranzes verfügen und das gelöste Material über einen Löffel direkt zu einer integrierten, verstellbaren Förderbandeinrichtung ziehen. Durch diese hohe Flexibilität lassen sich insbesondere im Lockergestein sowie in mäßig festem Baugrund sehr hohe Ausbruchs- und Vortriebsleistungen erzielen, wobei das gelöste Material bei reinen Tunnelbaggern im Gegensatz zu Tunnelladebaggern in einem separaten Arbeitsgang geschüttet werden muss. [74, 75]

Der darauffolgende Prozessabschnitt umfasst sowohl beim Sprengvortrieb als auch beim Baggervortrieb das Laden sowie den Abtransport des Ausbruchmaterials, was im Tunnelbau fachspezifisch als Schuttern bezeichnet wird. Da dieser logistische Vorgang direkt auf dem kritischen Weg des Abschlagszyklus liegt, hat jede zeitliche Optimierung eine unmittelbare Verkürzung der Zyklusdauer zur Folge. Dies führt in der Konsequenz zu einer Verringerung der Gesamtbauzeit, weshalb eine stetige Anpassung des Schutterbetriebs an die lokalen Rahmenbedingungen erfolgen muss. [74, 75]

Für einen effizienten Ablauf ist eine exakte Abstimmung der Lade- und Transportkomponenten erforderlich. Die Konfiguration der einzusetzenden Maschinenflotte wird dabei maßgeblich durch die Dimension des Tunnelquerschnitts, die Distanz zur vorgesehenen Deponie oder Verwertungsstelle sowie durch die spezifischen Fahrbahnverhältnisse auf der Vortriebsstrecke determiniert. Neben klassischen Lade- und Transportgeräten – wie sie bspw. im Erdbau üblich sind – können hierbei auch spezielle Kombinationsgeräte eingesetzt werden, welche sowohl den Ladevorgang als auch den Transport bewerkstelligen. [74, 75]

2.2.3 Sichern

Im letzten Schritt des Abschlagzyklus muss der – explosiv oder mechanisch – herausgelöste Hohlraum gesichert werden, um das Gebirge effektiv zu unterstützen und die eigene Tragfähigkeit zu aktivieren. Falls das Gebirge durch seine Eigentragfähigkeit ausreichend standfest ist, wäre theoretisch wenig bis keine Sicherung erforderlich (vgl. Norwegen [23]). Da dies im österreichischen Tunnelbau jedoch meist nur bedingt der Fall ist, kommen verschiedene Stützmaßnahmen zum Einsatz, die je nach den geotechnischen Erfordernissen meist in Kombination verwendet werden. Diese Maßnahmen kommen entweder direkt nach dem

Ausbruch zum Einsatz oder werden dem Vortrieb vorausseilend bzw. auch an der Ortsbrust eingebaut, um das Gebirge vorab zu stabilisieren. Es wird somit einerseits zwischen nachlaufenden Stützmitteln wie Spritzbeton, Ankern sowie Ausbauelementen und andererseits vorausseilenden Stützmitteln bzw. Stützmitteln an der Ortsbrust wie Spießen, Ortsbrustspritzbeton sowie -ankern unterschieden. [27, 74, 75]

Der Spritzbeton wird primär zur Versiegelung der Gebirgsoberfläche verwendet und dient als tragfähige Verbundschicht. Die aufgetragene Stärke variiert je nach statischem Erfordernis und kann optional mit ein- oder mehrlagigen Bewehrungsmatten verstärkt werden. Eine weitere Verbesserung der Tragfähigkeit lässt sich durch die Verwendung von Zusätzen im Spritzbeton, wie etwa Stahlfasern oder Kohlenstofffasern, erreichen [80]. Durch sein spezielles Tragverhalten ist Spritzbeton im Tunnelbau ideal geeignet, da er anfangs genügend Verformungen aufnehmen kann, ohne zu versagen, und nach der Erhärtung eine entsprechende Versagensvorwarnung durch Rissbildung bietet. [74, 75, 81]

Üblicherweise kommt bei größeren Querschnitten und daher höheren Gesamtmengen das Nassspritzverfahren zum Einsatz, welches den bereits fertig gemischten Beton mittels Druckluft oder Pumpen zur Spritzdüse des Manipulators fördert, an der dann ein flüssiger Erstarrungsbeschleuniger hinzugegeben wird. Der Spritzmanipulator wird vom Düsenführer über eine Fernsteuerung bedient und ist von der Kinematik ähnlich aufgebaut wie ein Bohrwagenarm, wodurch er alle Positionen im Querschnitt erreicht und eine durchgehende, im Verbund wirkende Spritzbetonschale herstellen kann. [74, 75]

Anker werden zur temporären Hohlraumstützung und Verbesserung der Gebirgseigenschaften eingebaut. Sie können dabei als Einzelankerung oder als Systemankerung im Kollektiv wirken. Die Kraftübertragung erfolgt über eine komplexe Verbundwirkung aus dem Anker selbst, dem Spritzbeton an der Tunnellaubung und der Eigentragfähigkeit des Gebirges. Die Ankerung soll die Tragwirkung des Gebirges verstärken, die Festigkeit des geschwächten Gebirges verbessern und örtliches Versagen durch Abplatzungen vom Spritzbeton oder das Herauslösen von Gestein verhindern. Obwohl im Tunnelbau der Begriff Anker oft als Überbegriff für die Stäbe oder Rohre verwendet wird, trennt die Geotechnik normativ diese Begriffe präzise in Anker, Nägel und Verpresspfähle [27, 82, 83]. Ein Verpressanker definiert sich als vorgespannte oder nicht vorgespannte Konstruktion mit einer freien Länge des Zugglieds, während Verpresspfähle verpresste Mikropfähle oder Verdrängungspfähle darstellen, die als Einzeltragglied wirken und als Verankerung auf Zug beansprucht werden [83]. Letztere werden üblicherweise im Tunnelbau verwendet. [74, 75]

Je nach geologischen Bedingungen und Wasserandrang ergeben sich verschiedene Ankertypen. Der vermörtelte Stabanker erzielt seine Verbundwirkung mit dem Gebirge durch Vermörtelung oder als Sonderform mit Kunstharz und ist universell einsetzbar. Der Selbstbohranker erreicht die Vermörtelung durch ein selbstbohrendes Gewinderohr mittels Zementmörtel oder Kunstharz und ist universell sowie speziell bei klüftigem und porigem Lockergestein

einsetzbar. Der Rohrreibungsanker nutzt Reibungskräfte über die gesamte Ankerlänge, indem ein zusammengefaltetes Stahlrohr durch Wasserdruck im Bohrloch ausgefaltet und gegen die Wandung gedrückt wird, was ihn außer bei feuchtem, tonigen Lockergestein universell einsetzbar macht. Zumeist wird das Bohrgerät des Vortriebs auch für die Ankersetzung eingesetzt. [74, 75]

Als weitere Stützelemente kommen mechanische Ausbauelemente wie Ausbaubögen und Bewehrungsmatten zum Einsatz. Ausbaubögen werden direkt nach dem Ausbruch als Abstützung und zum Schutz des Arbeitsraumes an der Ortsbrust eingebaut. Sie dienen zudem als Kontrolle des angestrebten Querschnitts und werden bogenweise zur Vortriebssteuerung eingemessen. Zur Verwendung kommen Vollwandprofile, Gitterträger oder Sternprofile, die in einzelnen Teilen eingebracht und durch Stoßverbindungen kraftschlüssig verbunden werden, sodass die Kraftübertragung durch die Bogenwirkung über den Fußpunkt in das Gebirge erfolgt. Bewehrungsmatten dienen primär zur Spritzbetonverstärkung oder kommen als Kopfschutz in Kombination mit Ankern/ Spießen zum Einsatz. Die verwendeten Matten besitzen üblicherweise die Stahlgüte M550 mit quadratischen Maschenweiten, wobei sich die Dimensionen und Lagen aus den statischen Einwirkungen ergeben. Um eine durchgehende Verbundwirkung analog zum Spritzbeton zu erzielen, ist hierbei strikt auf die ausreichende Übergreifungslänge der Matten in Quer- und Längsrichtung zu achten. [74, 75]

Ergänzend zu den nachlaufenden Maßnahmen definiert die ÖNORM B 2203-1 Spieße als Stäbe oder Rohre, die zur Stützung des Hohlraumrandes dem Vortrieb vorausilend eingebaut werden [27]. Die Einbringung erfolgt entweder mittels bewährter Ankerbohrtechnik oder durch das Einschieben in bereits vorgebohrte Löcher. Durch den geringen Abstand entlang der Bogenlänge wirken die Spieße als statische Kragbalken, welche eine Abstützung am hinteren Bogen sowie eine feste Einspannung im vorausliegenden Gebirge erfordern. Da ein intensiver Kraftschluss mit dem Boden für die Tragwirkung zwingend erforderlich ist, kommen in der Praxis sehr häufig Selbstbohrspieße zum Einsatz, welche auch bei nicht standfesten Bohrlöchern eine effektive Verpressung erlauben. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen der Einbringung über den stehenden Ausbau hinweg ist ein baubedingter Anstellwinkel zur Tunnelachse unvermeidbar, wodurch der charakteristische Sägezahneffekt im Ausbruchprofil entsteht. [74, 75]

Während die hier beschriebenen Maßnahmen der temporären Sicherung dienen, ist die Grenze zur endgültigen Sicherung im zyklischen Vortrieb oft nicht scharf zu trennen [75]. Die Thematik der Innenschale – welche übergeordnet dem konstruktiven Ingenieurbau und speziell dem Betonbau zugeordnet wird – wird deshalb im Rahmen dieser Masterarbeit nur grob behandelt, sodass die wesentlichen Bestandteile für die Ökobilanz berücksichtigt werden.

2.3 Innenschale

Die Herstellung von Tunnelinnenschalen – im normativen Sinne die tragende, dauerhafte Betonauskleidung eines Untertagebauwerks [27] – ist ein technisch hochkomplexes sowie kostenintensives Unterfangen, weshalb an die Dauerhaftigkeit des Gesamtbauwerkes höchste Ansprüche gestellt werden. Das in Österreich und generell in Mitteleuropa dominierende System besteht dabei i. d. R. aus einer Ortbetonschale und einer flexiblen Abdichtungsschicht, welche zwischen der Außen- und Innenschale verbaut wird. In manchen Fällen wird eine Spritzbetoninnenschale als dauerhafte Auskleidung hergestellt, wobei sich diese Anwendung streng auf Querschläge, Ausgänge ins Freie sowie ausgewählte geotechnische Sonderfälle beschränkt. Der Herstellungsprozess erfolgt im Regelfall ebenfalls zyklisch nach dem Abschluss der Vortriebsarbeiten. [74, 84]

Geometrisch und statisch werden im österreichischen Tunnelbau grundsätzlich zwei primäre Profiltypen unterschieden. In Bereichen mit geringer statischer Beanspruchung bzw. bei guten geologischen Verhältnissen ist oftmals ein sogenanntes Hufeisenprofil ausreichend, welches eine flache, unbewehrte Sohle aufweist. Um die Standsicherheit des Hohlraums hingegen bei größeren Belastungen sowie in geologisch schlechteren, druckhaften Zonen zu gewährleisten, muss ein statisch geschlossenes Sohlgewölbe verbaut werden. Durch diese Ausrundung erhält das Bauwerk die statisch günstige Form eines geschlossenen Ringes, was zudem eine kontinuierliche Weiterführung der Abdichtungsbahnen in die Sohle zu einem geschlossenen Dichtring ermöglicht. Allerdings führt ein Sohlgewölbe unweigerlich zu einer Vergrößerung des notwendigen Ausbruchsquerschnitts im Vortrieb, welcher im Zuge des Innenausbaus wieder mit Beton zu verfüllen ist. Um wirtschaftlich zu arbeiten, sind daher kontinuierliche Profilanpassungen – bereits während des Vortriebs – an die wechselnden geologischen Verhältnisse entlang der Tunnelachse erforderlich. [74, 84]

Die Ortbetoninnenschale selbst wird nach den statischen Erfordernissen dimensioniert und kann je nach Lastfall bewehrt oder unbewehrt ausgeführt werden. Grundlegend wird zwischen Konstruktionen mit oder ohne Abdichtung unterschieden, wobei alternativ zu einer separaten Kunststoffdichtungsbahn (KDB) auch eine wasserundurchlässige Innenschale (WDI) [85] ausgeführt werden kann. Bei den zweischaligen Systemen mit Abdichtung wird bewusst auf einen kraftschlüssigen Verbund zwischen der Innen- und Außenschale verzichtet, indem Trennlagen eingelegt werden, welche die mechanische Verzahnung der beiden Bauteile minimieren und so temperatur- sowie schwindbedingte Zwangsspannungen im Beton reduzieren. [74, 84]

Der Bauablauf erfolgt in einer aufeinander abgestimmten Kette von Arbeitsschritten, die hier beispielhaft für einen Querschnitt mit Sohlgewölbe erläutert wird. Im ersten Schritt, der Herstellung des Abdichtungsträgers, muss die ausbruchsbedingt-unregelmäßige Oberfläche der Spritzbetonaußenschale geebnet werden, da Bestandteile wie Ankerplatten oder scharfe

Betonkanten den dünnen Abdichtungsmembran unter dem späteren Betondruck durchstoßen und so beschädigen könnten. Nach Fertigstellung des Abdichtungsträgers beginnen die konstruktiven Arbeiten in der Tunnelsohle, indem die vorübergehende Vortriebsfahrbahn mechanisch ausgehoben und die Außenschale im Sohlbereich freigelegt wird. [70, 74, 84]

Nach dem Einbringen einer Sauberkeitsschicht und einer Trennfolie wird das Sohlgewölbe bei unbewehrten Querschnitten hergestellt bzw. der Sohlfüllbeton eingebracht. Der Einbau erfolgt meist über Sohlchalwägen (vgl. Abb. 2-7). Für den Betonageprozess wird im Bewehrungskorb eine temporäre Lücke für die Aufstellung des Wagens – dem sog. Lückenschluss – freigehalten, die erst unmittelbar vor der Betonage geschlossen wird. Bei der Ausführung mit unbewehrtem Sohlfüllbeton wird das gesamte Bauteil in einem Arbeitsgang hergestellt, was die Bauzeit erheblich verkürzt. [70, 74, 84]



*Abb. 2-7: Abdichtungsträger und Sohlgewölbe
[eigene Aufnahme]*



*Abb. 2-8: Widerlager, KDB und Gewölbebeton
[eigene Aufnahme]*

Im Anschluss an die Arbeiten der Sohle erfolgt die Herstellung der seitlichen Widerlager, welche das Fundament für den Gewölbebeton sowie den schweren Gewölbeschalwagen bilden. Um diese großen Lasten aufzunehmen, werden diese Bauteile meistens bewehrt ausgeführt. Die Geometrie wird dabei oft durch die spätere Nutzung vorgegeben (z. B. erhöhter Randweg im Bahntunnel etc.). Anschließend folgt der Einbau der Ulmendrainage, bei dem die Teilsickerrohre in einem Betonbett mit dem planmäßigen Gefälle verlegt, fixiert und mit einer zementgebundenen Sickerpackung abgedeckt werden, um ein Aufschwimmen beim späteren Betonieren zu verhindern. [70, 74, 84]

Der nächste Prozess umfasst die Abdichtungsarbeiten im Gewölbebereich. Vor dem Einbau der eigentlichen Kunststoffdichtungsbahn (KDB) wird ein geotextiles Schutzvlies an den Abdichtungsträger angelegt und über Rondellen an der Laibung festgeschossen. Die KDB wird daran thermisch befestigt und die Übergänge werden dicht verschweißt. Den Abschluss bildet das Aufschweißen von zusätzlichen Schutzstreifen im Bereich der Blockfugen. [70, 74, 84]

Abschließend erfolgt die Betonage des Innenschalengewölbes, bei der die betontechnologische Zusammensetzung eine entscheidende Rolle spielt. Um einen möglichst frühen Ausschalzeitpunkt zu ermöglichen, ist eine rasche Festigkeitsentwicklung nötig, deren Wärmeentwicklung jedoch das Risiko von Schwindrissen im Beton erhöht. Daher ist es nötig, die Frischbetontemperatur zu beeinflussen und in einem engen, vordefinierten und geregelten Zielfenster zu halten. Falls erforderlich, wird zunächst die Bewehrung mithilfe eines Bewehrungswagens verlegt. Danach kann der massive Gewölbeschalwagen einfahren. Im Taktverfahren wird bei gut koordinierter Logistik täglich ein Block in einer Regellänge von etwa 10 bis 12 Metern betoniert. Um diesen Prozess zu optimieren, wird häufig mit zwei separaten Wägen gearbeitet, wobei ein Vorläuferwagen jeden zweiten Block frei betoniert und ein Nachläuferwagen die verbliebenen Lückenblöcke schließt (vgl. Abb. 2-8). [70, 74, 84]

Der Einbau des Betons erfolgt gleichmäßig über Verteilermastpumpen, während die Verdichtung über außerhalb am Schalwagen situierte Schalungsrüttler realisiert wird. Die Betonage wird im Wesentlichen durch die Steiggeschwindigkeit des Betons begrenzt, da der Schalwagen die hydrostatischen Kräfte des Frischbetons aufnehmen muss. Um den Firstbereich möglichst gut herzustellen, wird über Kontrollrohre der verbleibende Firstspalt nach Abschluss der Gewölbearbeiten kraftschlüssig mit Zementsuspension – der sog. Firstinjektion – verpresst, bevor im letzten Schritt ggf. eine Zwischendecke (bei größeren Straßentunneln) auf den Konsolen im Kämpferbereich aufgelagert wird. [70, 74, 84]

3 Verkehrstunnel in Österreich

3.1 Arten

Grundlegend bestimmen in Österreich rechtliche Vorgaben, technische Richtlinien sowie die spezifischen Anforderungen der großen Infrastrukturbetreiber ASFINAG und ÖBB die Geometrie und Dimensionierung der Regelquerschnitte von Straßen- und Eisenbahntunneln.



Abb. 3-1: Verkehrstunnel in Österreich, adaptiert nach [86, 87]

Im Bereich des Straßentunnelbaus stellen die Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS), herausgegeben von der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV), das maßgebende Regelwerk dar. Insbesondere die RVS 09.01.22 [88] definiert die notwendigen Parameter bezüglich Verkehrsraum, Fahrstreifenbreiten, Randstreifen und lichte Höhen usw. Diese werden maßgeblich von drei Hauptkriterien – Verkehrstechnik, Betriebstechnik und Bautechnik – bestimmt. Bei den verkehrstechnischen Kriterien werden Parameter wie die Projektierungsgeschwindigkeit, die Anzahl der geplanten Fahrstreifen und Entwurfparameter der Trasse (Kurvenradien, Quer- und Längsneigungen) berücksichtigt. Die Betriebstechnik beeinflusst vor allem den zusätzlichen Platzbedarf für Beleuchtung, Belüftung, Verkehrszeichen und Abstellstreifen usw. im fertigen Tunnel für die Betriebsphase und wird im Detail durch die RVS 09.02.22 [89] geregelt. Wiederum sind die bautechnischen Aspekte stark mit der jeweiligen Tunnelbauweise und der späteren Auskleidung verknüpft. Darüber hinaus werden diese Richtlinien durch das Straßentunnelsicherheitsgesetz (STSG) [90] flankiert, welches in Abhängigkeit von Tunnellänge und Verkehrsaufkommen beispielsweise sicherheitstechnische Mindeststandards und Fluchtwege vorschreibt. [88]

Bei Eisenbahntunneln hingegen werden der Regelquerschnitt und das Minimalprofil des Tunnels primär durch die Regelwerke der ÖBB-Infrastruktur AG – speziell das Regelwerk

10.01.02.01 Tunnelbau / Entwurf – Grundsätze – Querschnitt / Profil [91] – sowie durch übergeordnete europäische Vorgaben determiniert. Bei letzterem spielen die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI) eine zentrale Rolle, da sie das internationale Lichtraumprofil festlegen, um einen grenzüberschreitenden Schienenverkehr zu garantieren. Analog zu den Straßentunneln wird der Tunnelquerschnitt von Schieneninfrastrukturen auf der freien Strecke grundlegend durch folgende Elemente bestimmt [92]:

- Umgrenzung des Lichtraums einschließlich des Regellichtraums der bei einer Oberleitung
- Oberleitungsanlagen
- Anzahl der Gleise, Gleisabstand und Bettungsquerschnitt
- Signal- und Fernmeldeanlagen sowie Kabeltrassen
- Sicherheitsräume und Nutzräume

Nicht zuletzt werden bei der Dimensionierung von Eisenbahntunneln weitere Faktoren wie die Aerodynamik in Tunneln berücksichtigt, um einerseits den Druckkomfort für Fahrgäste bei Hochgeschwindigkeitsfahrten und Zugbegegnungen zu gewährleisten und andererseits den Effekt eines Tunnelknalls zu vermeiden. Wobei zweiteres vor allem die Ein- und Austrittsquerschnitte sowie die Portalbauwerke betrifft. [92]

Beim zyklischen Vortrieb ist die Definition des Tunnelprofils und des zugehörigen Vorhaltemaßes eng mit dem gewählten Konstruktionsprinzip der Innenschale verknüpft. Das maßgebliche Regelprofil ist hierbei primär gemäß der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton [85] festzulegen. Um zu garantieren, dass das mindestens erforderliche Lichtraumprofil der jeweiligen Tunnelkategorie über die gesamte Bauwerkslänge uneingeschränkt eingehalten wird, muss die Geometrie der Innenschale im Vorfeld bekannt sein. Die erforderliche Bauteildicke der Innenschale orientiert sich dabei an den statisch-konstruktiven sowie hydrogeologischen Anforderungen – beispielsweise ob diese unbewehrt, bewehrt oder als druckdichte Konstruktion im Sinne einer wasserundurchlässigen Innenschale im Tunnelbau (WDI) ausgeführt wird (vgl. Kapitel 2.3). Um den Anforderungen des Untertagebaus Rechnung zu tragen, müssen bauprozessbedingte geometrische Abweichungen als Übermaß bzw. Vorhaltemaß in die Profilentwicklung einfließen. Dieses Übermaß berücksichtigt additiv die maßgeblichen baubetrieblichen Toleranzen, zu denen insbesondere die Ausbruchs- und Vermessungstoleranz während des Vortriebs sowie die herstellungstechnische Toleranz der Innenschale zählen. Das Gesamtsystem des zyklischen Vortriebs verlangt somit eine geometrische Staffelung, bei welcher der Ausbruchsquerschnitt so groß gewählt wird, dass trotz aller Toleranzen die spezifische Innenschale ausreichend Platz findet und das mindesterforderliche Lichtraumprofil des Verkehrsweges dauerhaft geschützt bleibt.

3.2 Querschnitte

3.2.1 Bahntunnel

Die Dimensionierung der durchschnittlichen Tunnelquerschnitte der Schieneninfrastruktur für die spätere Untersuchung erfolgte auf Basis des Minimalprofils gemäß den Planunterlagen des bereits erwähnten ÖBB-Regelwerks. Dieses sieht für eine eingleisige Tunnelröhre mit Gewölbequerschnitt eine lichte Querschnittsfläche von $54,6 \text{ m}^2$ vor, während für einen zweigleisigen Tunnel ein Mindestwert von $80,6 \text{ m}^2$ heranzuziehen ist. Schematisch sind die beiden Querschnitte der freien Strecke in dargestellt. [91]

Um von diesen reinen Nutzraumvorgaben als lichte Querschnittsflächen auf die baubetrieblich erforderliche Gesamtausbruchsfläche zu schließen, wurden empirische Abschätzungen in Zusammenarbeit mit Tunnelexpert:innen und anhand realer Ausführungspläne österreichischer Tunnelprojekte sowie der ÖBV-Richtlinie Innenschalenbeton [85] durchgeführt. Dies ermöglichte eine geometrische Ableitung der Gesamtausbruchsfläche, sodass die kalkulationsrelevante Linie 2 (vgl. Abb. 2-4), auf welcher die Eingabeparameter für die Untersuchung beruhen, gemäß der ÖNORM B 2203-1 [27] bestimmt werden konnte.

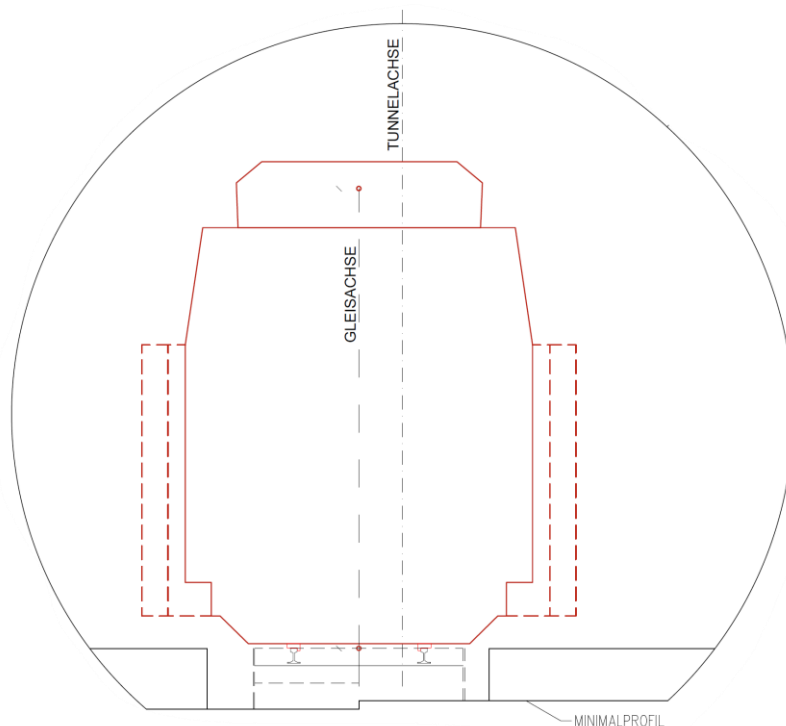


Abb. 3-2: Bahntunnel schematisches Minimalprofil 1-gleisig [91]

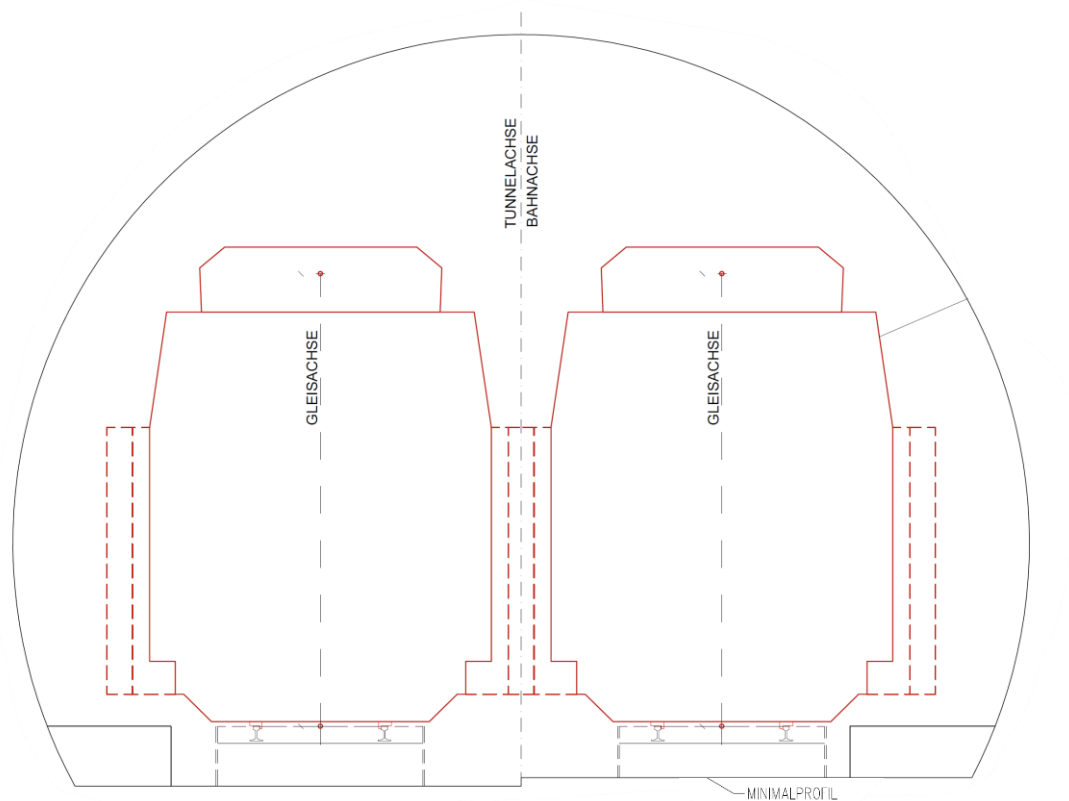


Abb. 3-3: Bahntunnel schematisches Minimalprofil 2-gleisig [76]

3.2.2 Straßentunnel

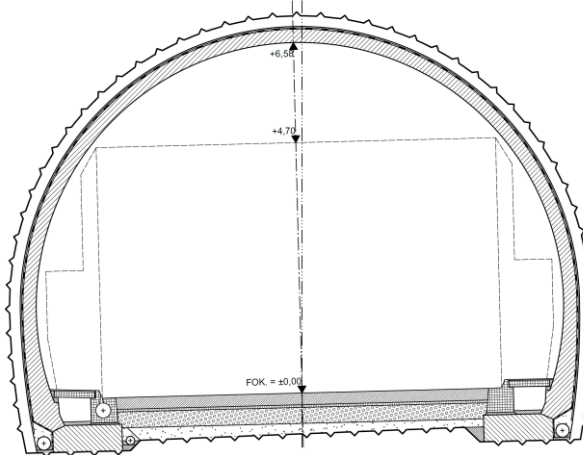
Im Gegensatz zu den minimal erforderlichen Flächenvorgaben im Bahnbereich orientierten sich die typischen Querschnitte der Straßeninfrastruktur an den Vorgaben der technischen Richtlinie der ASFINAG, sprich dem Planungshandbuch Tunnel-Bau [93]. Die geometrischen Abmessungen wurden hier direkt aus den offiziellen Planungsunterlagen und den technischen Spezifikationen bzw. den weiterführenden Regelquerschnitten abgeleitet. Darüber hinaus wurden die Parameter ebenfalls in Absprache und durch den Abgleich mit realen Projekten sowie einschlägigen Richtlinien adaptiert, sodass auch bei den Straßentunneln durchschnittliche Ausbruchsflächen je nach Tunneltyp bestimmt werden konnten.

Die Einteilung und Namensgebung der Querschnitte orientieren sich an der kalkulatorischen Einteilung der standardisierten Leistungsbeschreibung „Verkehr und Infrastruktur“ (LB-VI) [94] und sind in Abb. 3-4 schematisch abgebildet:

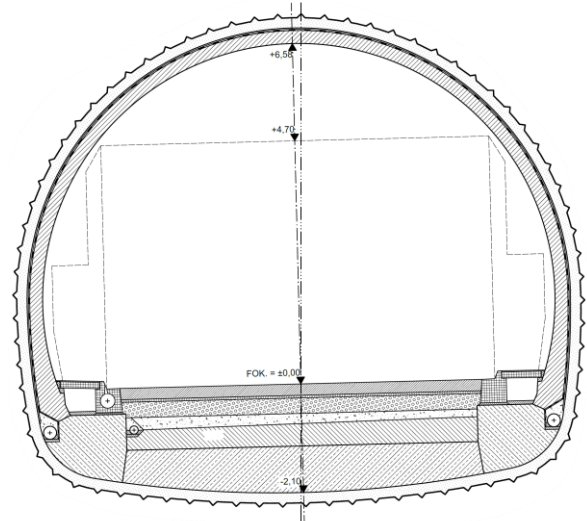
- RQ Regelquerschnitt
- EQ mit Einsatzfahrzeugen befahrbare Querschläge
- GQ begehbare Querschläge

RQ

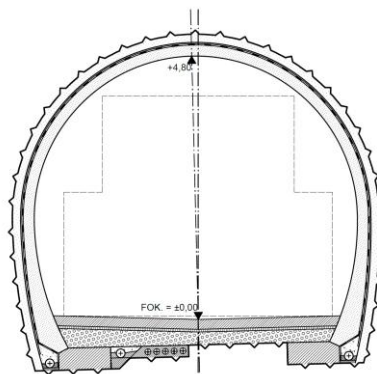
ohne Sohlgewölbe



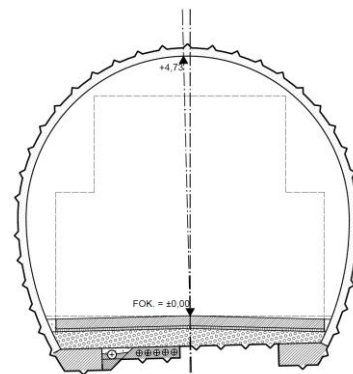
mit Sohlgewölbe

**EQ**

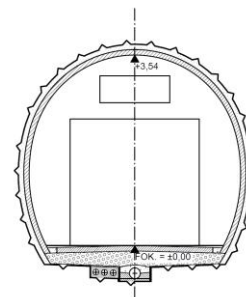
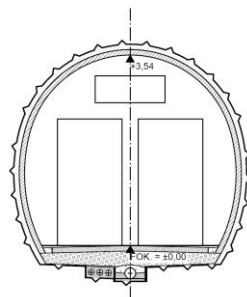
mit Innenschale



ohne Innenschale

**GQ**

offene Sohle Spritzbetoninnenschale



Sohlplatte Ortbetoninnenschale

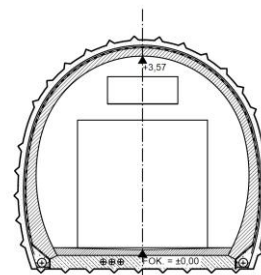
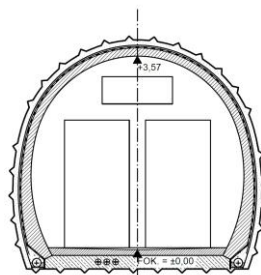
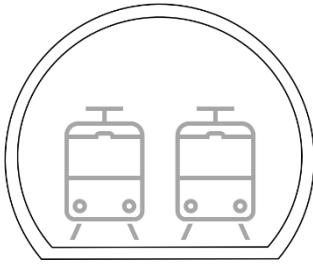
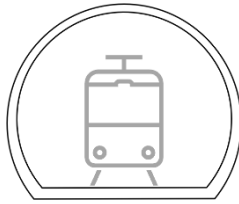
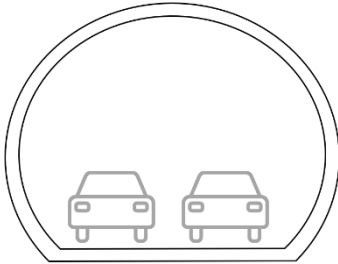
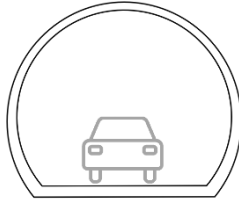
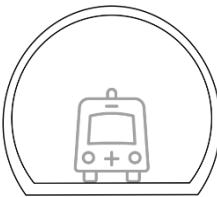


Abb. 3-4: Straßentunnel und Querschläge schematische Querschnitte je nach Typ [93]

3.2.3 Betrachtete Querschnitte

Basierend auf den zuvor erläuterten Querschnitten der beiden Verkehrsträger werden typische durchschnittliche österreichische Verkehrstunnel im ungestörten Vortrieb für die Studie abgeleitet. Die je nach Verkehrsart etwas abweichenden Querschnittsflächen werden in Zusammenarbeit mit Tunnelexpert:innen für den durchschnittlichen NÖT-Vortrieb des Streckentunnels und des jeweils abzubildenden Tunneltyps skaliert [53]. Im Zuge der Studie werden zum einen große Regelquerschnitte (RQ) mit einer Querschnittsfläche von ca. 100 m², was einem zweispurigen Straßentunnel bzw. einem zweigleisigen Bahntunnel entspricht, berücksichtigt. Zum anderen werden die Querschnitte der Querschläge durch EQ und GQ abgebildet, welche jeweils eine mittlere Ausbruchsfläche von etwa 40 m² bzw. 20 m² aufweisen. Hingegen werden die einspurigen bzw. eingleisigen Querschnitte durch die Mittelwertbildung von RQ und EQ abgebildet, da diese durch die kalkulationsbasierte Struktur nicht explizit abgebildet werden. Somit ergeben sich für diese Querschnitte eine auszubrechende Fläche von etwa 70 m², was sich mit den berücksichtigten Vergleichsprojekten deckt. Schlussfolgernd werden also folgende Querschnitte in der Studie berücksichtigt:

Bahntunnel	 zweigleisig	 eingleisig
Straßentunnel	 zweispurig	 einspurig
Querschläge	 befahrbare Querschläge	 begehbare Querschläge

Tab. 3-1: Betrachtete Querschnitte

4 Die Ökobilanz

In diesem Kapitel wird eine grundsätzliche Einführung in die Methodik der Ökobilanz gegeben, um die Begrifflichkeiten und normativen Hintergründe zu erfassen. Die Vorgangsweise wird ungeachtet von der späteren Vorgangsweise bzw. für den späteren Fall allgemein hergeleitet. Auf die durchgeführte tunnelbauspezifische Ökobilanz wird im Methodik-Teil in Kapitel 6 behandelt.

4.1 Allgemein

Das normative Werkzeug der Ökobilanzierung, international als *Life Cycle Assessment* (LCA) bezeichnet, repräsentiert ein weltweit standardisiertes Verfahren, welches dazu dient, die ökologischen Auswirkungen von Produkten bis hin zu komplexen Produktsystemen wie etwa Ingenieurbauwerken über den gesamten Lebenszyklus hinweg systematisch zu analysieren. Infolge des stetig wachsenden gesellschaftlichen und politischen Bewusstseins für den Umweltschutz im Allgemeinen und speziell im Bauwesen (vgl. Kapitel 1.3) erfuhren die methodischen Ansätze in den vergangenen Jahrzehnten eine kontinuierliche und intensive Weiterentwicklung. Das hieraus resultierende Instrumentarium bietet heute ein transparentes, validierbares und präzises System zur strukturierten Beschreibung sowie objektiven Evaluierung von Umweltwirkungen [32, 95–97].

Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten quantitativen Analysen und Berechnungen basieren fundamental auf den übergeordneten, allgemeinen Richtlinien der internationalen Ökobilanznormen EN ISO 14040 [97] und EN ISO 14044 [98]. In diesem Gefüge definiert erstere die übergeordneten Prinzipien, die allgemeinen Zielsetzungen sowie die grundlegende strukturelle Gliederung einer LCA. Zweitere fungiert als vertiefende Anleitungsnorm und präzisiert diese Vorgaben, indem sie konkrete Anforderungen formuliert und detaillierte Handlungsanleitungen für die praktische Umsetzung der Ökobilanzierung bereitstellt. Ergänzend hierzu werden die spezifischen österreichischen und europäischen Regelwerke für den Bausektor herangezogen. Diese umfassen maßgeblich die ÖNORM EN 15804 [99] auf der Produktebene, welche die Rahmenbedingungen für Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten regelt, sowie die ÖNORM EN 17472 [30], welche das normative Rechenverfahren für die Nachhaltigkeitsbewertung von Ingenieurbauwerken auf der übergeordneten Bauwerksebene liefert. [32, 35, 95]

Umweltindikatoren sowie für die formelle Umweltkennzeichnung von Produkten [32, 97]. Das methodische Ziel der LCA besteht darin, sämtliche Material- und Energieströme sowie Herstellungsprozesse und induzierte Umweltwirkungen lückenlos abzubilden und den entsprechenden Lebenszyklusmodulen zuzuordnen. Diese ganzheitliche Bilanzierung erfolgt nach dem Prinzip von der Wiege bis zur Bahre (*cradle to grave*), wobei die Dimensionierung dieses Lebenszyklus gerade im Infrastruktur- und Tunnelbau eine besondere Rolle einnimmt. [95, 97]

Da der Bau von Tunnelbauwerken – wie bereits thematisiert – einen gravierenden Eingriff in das bestehende Ökosystem darstellt, weisen diese Projekte gegenüber Hochbauten eine extrem lange Nutzungsdauer auf (z. B. beim Brennerbasistunnel 200 Jahre geplante Nutzungsdauer [56]). Der durch den Ausbruch geschaffene unterirdische Hohlraum respektive das nutzbar gemachte Terrain kann nach der Fertigstellung nur in absoluten Ausnahmefällen einer alternativen Nutzung zugeführt werden, die von der ursprünglichen Bestimmung als Verkehrsrouten abweicht. Aus diesem Grund ist ein vollständiger Rückbau oder ein Abriss bei dieser spezifischen Bauwerkskategorie im Grunde ausgeschlossen und unüblich [26]. Um die enormen initialen ökologischen Aufwände (insbesondere aus Modul A) über den Lebenszyklus zu amortisieren, wird in der Praxis alles versucht (hauptsächlich Module B2-B5), um eine dauerhafte Stilllegung dieser Bauwerke zu verhindern. Das heißt sofern es aus technischer und ökonomischer Sicht irgendwie machbar und sinnvoll erscheint, werden Tunnelanlagen daher kontinuierlich modernisiert, durch Instandhaltungen und -setzungen saniert sowie an aktuelle Sicherheits- sowie Technikstandards angepasst, während eine endgültige Außerbetriebsetzung lediglich das letztmögliche Szenario darstellt [66].

4.2 Phasen einer Ökobilanz

Der Bewertungsprozess einer Ökobilanz gliedert sich übergeordnet nach der ÖNORM EN ISO 14040 in vier aufeinanderfolgende Phasen, findet sich aber auch in den bauspezifischen Dokumenten wie der ÖNORM EN 17472 wieder (siehe Abb. 4-2). Am Anfang steht die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens im Vordergrund, in der u. a. die Systemgrenzen und die funktionelle Einheit definiert werden. Es folgt die Sachbilanz, welche die Erfassung, Quantifizierung und Allokation³ der auftretenden Stoff- und Energieströme umfassen. Darauf aufbauend erfolgt in der Wirkungsabschätzung die Verknüpfung dieser Daten mit spezifischen Wirkungsindikatoren (Umwelteinwirkungsfaktoren), um die ökologischen Auswirkungen zu bestimmen. Den Abschluss bildet die Auswertung, in der die Ergebnisse analysiert, interpretiert und als Entscheidungsgrundlage aufbereitet werden. [95, 96]

³ Unter Allokation wird die methodische Aufteilung von Input- und Outputflüssen (im Wesentlichen Stoff- und Energieströmen) sowie der damit verbundenen Emissionen auf mehrere entstehende (Koppel-) Produkte verstanden. Diese häufig schwierige methodische Zuordnung ist darauf zurückzuführen, dass industrielle Prozesse in der Regel mehrere Outputs erzeugen. [35, 95–97]

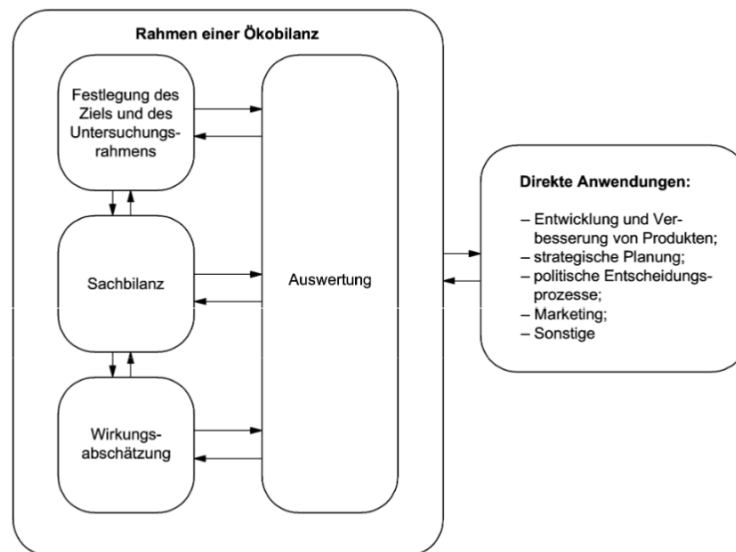


Abb. 4-2: Phasen einer Ökobilanz nach ÖNORM EN ISO 14040 [97]

4.2.1 Untersuchungsrahmen

Die erste Phase einer Ökobilanzierung widmet sich der elementaren Zielfestlegung sowie der präzisen Abgrenzung des Untersuchungsrahmens, welche jeweils durch die wesentlichen Rahmenbedingungen exakt definiert werden müssen [96]. Dazu zählen insbesondere die Spezifikation des zu analysierenden Produktsystems und dessen Funktionen, die Festlegung der funktionalen bzw. deklarierten Einheit als Bezugsbasis sowie die Ziehung der Systemgrenzen. Darüber hinaus erfordert diese Phase detaillierte Angaben zu den ausgewählten Umweltwirkungsindikatoren, der verwendeten Methodik, den qualitativen Datenanforderungen sowie ggf. den zugrunde gelegten Annahmen bzw. Ansätzen [32, 96, 97]. Das Produktsystem selbst definiert sich in diesem Kontext als eine Verknüpfung einzelner Prozessmodule (z. B. singuläre Prozesse wie die Herstellung von 1 m³ Beton), welche über spezifische Produkt- und Elementarflüsse (Stoff- & Energieströme) miteinander interagieren. Zusammen bilden diese Module den gesamten Lebensweg eines Produkts ab und erfüllen dabei eine oder mehrere festgelegte Funktionen [95–97].

Eine exakte Ausarbeitung dieser Rahmenbedingung als wesentliche Parameter ist essenziell, um den Untersuchungsumfang, die Detailtiefe und die methodischen Grundlagen der Ökobilanz konsistent, transparent und intersubjektiv nachvollziehbar zu dokumentieren. Neben der initialen Festlegung des Untersuchungsziels, müssen die Fragen nach dem Gegenstand, der Intention und der Zielgruppe beantwortet werden, um das betrachtete Produktsystem eindeutig und ausreichend beschreiben zu können [96, 97].

Als zentrale Werkzeuge dienen hierbei einerseits die funktionale bzw. deklarierte Einheit, welche als mathematische und inhaltliche Vergleichsgrößen der Bilanzierung fungieren [95, 96]. Eine funktionale Einheit liegt dann vor, wenn die Bewertung eines Produkts auf eine eindeutig definierte Funktion bzw. ein spezifisches Anwendungsszenario bezogen ist (also bspw. 1 km Tunnel im zyklischen Vortrieb), wohingegen bei Produkten mit vielseitigem oder

nicht eindeutig festgelegtem Einsatzbereich die Beschreibung über eine deklarierte Einheit erfolgt (z. B. 1 kWh Strom für Maschinen) [99].

Andererseits stellt die Festlegung der Systemgrenzen – diese Grenzen können technische Restriktionen, geografische Ausdehnungen oder zeitliche Horizonte umfassen – ebenfalls ein Werkzeug dar. Darüber hinaus gewährleistet eine präzise Definition der Systemgrenzen eine transparente Nachvollziehbarkeit und erlaubt somit die klare Abgrenzung des Produktsystems gegenüber auftretenden Vor- oder Nebenprodukten, Entsorgungsszenarien sowie benachbarten Produktsystemen [96].

4.2.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz, eng. als *Life Cycle Inventory* (LCI) bezeichnet, repräsentiert die zweite Phase innerhalb des Ökobilanzierungsprozesses und konzentriert sich im Kern auf die detaillierte Datenerhebung sowie die quantitative Erfassung sämtlicher Einflüsse und der daraus resultierenden Wirkungen, also der Input- und Outputflüsse des Untersuchungsobjekts [96, 97]. Im Zuge der Berechnungsverfahren werden die relevanten Elementarströme auf die zuvor festgelegten Prozessmodule bezogen und auf den Referenzfluss der funktionellen Einheit normiert [95–97]. Obwohl die Festlegung der Systemgrenzen unter Bezugnahme auf die ÖNORM EN 15804, spezifische Produktkategorieregeln oder die ÖNORM EN 17472 mit einem verhältnismäßig geringen Aufwand realisierbar ist, erweist sich die eigentliche Datenbeschaffung für die Sachbilanz als äußerst arbeitsintensiv und bildet das zentrale Element der gesamten Ökobilanzanalyse [96].

Methodisch betrachtet stellt die Sachbilanz eine fundierte Stoff- und Energieanalyse dar, die auf einer umfassenden Systemanalyse basiert. Diese Systemanalyse baut auf den einzelnen Prozess- bzw. Produktmodulen auf, deren grundlegende Struktur bereits in der initialen Phase der Ziel- und Untersuchungsrahmendefinition erarbeitet wurde. Die konzeptionelle Verknüpfung dieser Module erfolgt in Form von sogenannten Produktbäumen. Um die jeweiligen Inputs und Outputs anschaulich zu visualisieren, wird für jedes Prozessmodul – welches die kleinste mathematische Einheit der Ökobilanz darstellt – ein detailliertes Systemfließbild generiert (vgl. Abb. 4-3), welches die verstrickten Prozesse abbildet und sie entsprechend ihrer funktionalen Abhängigkeiten in Form von Prozessketten. [95–97]

Die Quantifizierung der erhobenen Stoff- und Energiedaten innerhalb des Moduls erfolgt unter strikter Einhaltung naturwissenschaftlicher Bilanzierungsregeln, wie insbesondere dem Erhaltungssatz der Masse, dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik zur Energie- und Entropieerhaltung sowie generellen Leistungsbetrachtungen [35, 96].

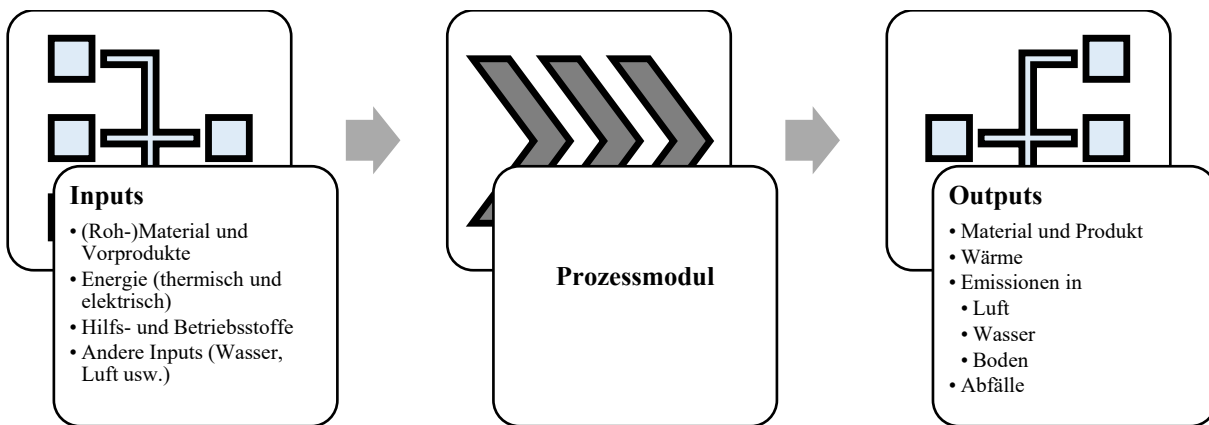


Abb. 4-3: Schematische Darstellung eines Prozessmoduls, adaptiert nach [96]

Die Aussagekraft und Validität der finalen Ökobilanzierungsergebnisse hängen maßgeblich von der Qualität, der Genauigkeit und dem Detaillierungsgrad der herangezogenen Parameter ab [30, 95–97]. Wobei die Datenqualität auch darüber entscheidet, wie präzise der übergeordnete Markt des betrachteten Objekts in technischer, geografischer und zeitlicher Hinsicht abgebildet werden kann [95]. Für die Bilanzierung können unterschiedliche Datenquellen wie etwa Primärdaten aus Unternehmens- oder Baustellenerhebungen, spezifische und/ oder generische Daten⁴ aus veröffentlichten Quellen bzw. Datenbanken sowie ingenieurmäßige Abschätzungen & Eigenmodellierungen herangezogen werden [32, 97]. Da die Zuverlässigkeit der gesamten Ökobilanz direkt mit der Güte dieser Informationen korreliert, ist eine systematische Datenprüfung und -validierung vor der Durchführung der eigentlichen Berechnungen zwingend erforderlich [96, 97].

Zusammenfassend basieren die methodischen Herausforderungen innerhalb der Sachbilanz darauf, dass einerseits Prozessmodule oftmals als komplexe Mehrprodukt- oder Koppelprozesse existieren, welche neben dem eigentlichen Hauptprodukt weitere Zwischen- oder Nebenprodukte generieren. Andererseits stellen die Datenbeschaffung qualitativ hochwertiger sowie belastbarer Quellen und die darauffolgenden Modellierungen nach den physikalischen Gesetzen eine Herausforderung dar.

4.2.3 Wirkungsabschätzung

Aufbauend auf den quantitativen Ergebnissen der Sachbilanz folgt als dritte Phase der Ökobilanzierung die Wirkungsabschätzung, im Englischen *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA). Diese Phase dient dazu, die Elementarströme der vorherigen Sachbilanz im Hinblick auf konkrete Umweltaspekte sowie potenzielle ökologische Auswirkungen zu evaluieren und die Daten in eine interpretierbare, verständliche Form zu überführen. Dies geschieht durch eine

⁴ Generische Daten stellen nicht standort- oder produktspezifisch erhobene Informationen dar, sondern beruhen daher auf durchschnittlichen bzw. sinngemäß auch repräsentativen Werten. Demgegenüber werden spezifische Daten direkt für einen bestimmten Prozess, ein spezifisches Produkt aus einem Werk oder ein selektives Unternehmen ermittelt. [96].

systematische Verknüpfung der Sachbilanzdaten mit definierten Wirkungskategorien und zugehörigen Wirkungsindikatoren [96, 97].

Dieser Prozess beginnt mit der Auswahl der relevanten Wirkungskategorien, Indikatoren und Charakterisierungsmodelle. Typische Wirkungskategorien beschreiben hierbei Phänomene wie den Treibhauseffekt, die Versauerung, die Ozonbildung, die Eutrophierung oder die generelle Ressourcenbeanspruchung wie den Energiebedarf, das Wasserentzugspotenzial, die Landnutzung sowie Human- und Ökotoxizität uvm. [95–97].

Im darauffolgenden Schritt werden die Ergebnisse der Sachbilanz klassifiziert, indem man sie den jeweiligen Wirkungskategorien zuordnet. Das eigentliche Kernstück der Wirkungsabschätzung bildet anschließend die Charakterisierung. Dabei werden die Sachbilanzwerte mithilfe von Charakterisierungsfaktoren in gemeinsame, vergleichbare Einheiten umgerechnet – wie beispielsweise in CO₂-Äquivalente zur Quantifizierung des Treibhauseffekts. Durch die Zusammenfassung dieser transformierten Daten innerhalb der gewählten Kategorien entsteht als Endergebnis ein präziser, numerischer Indikatorwert für die jeweilige Umweltwirkung (vgl. Abb. 4-4). [95, 96]

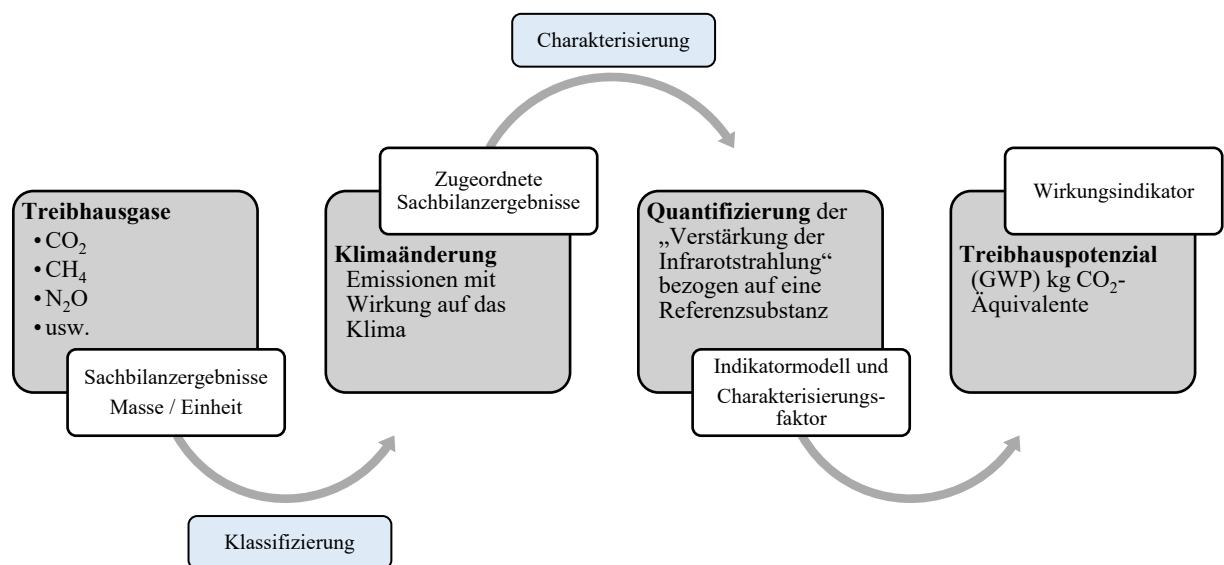


Abb. 4-4: Prinzip der Wirkungsabschätzung am Beispiel von Treibhauspotenzial, adaptiert nach [96]

4.2.4 Auswertung

Die Auswertung stellt die vierte und somit letzte Phase einer Ökobilanzierung dar, welche auf Englisch als *Life Cycle Interpretation* bezeichnet wird (i. d. R. keine Abkürzung da LCI die Sachbilanz darstellt). Neben den eigentlichen Ergebnispräsentationen besteht das Ziel der Auswertungsphase darin, ausgehend von den vorherigen Phasen fundierte Schlussfolgerungen abzuleiten sowie eventuelle Handlungs- und Entscheidungsempfehlungen (z. B. Verbesserungspotenziale) zu definieren. Weiters sollen die getroffenen Annahmen und Rahmenbedingungen kritisch hinterfragt werden und darüber hinaus vor allem die Limitationen der gewählten Methodik aufgezeigt werden. Eine solide Ökobilanz profitiert von einer

transparenten und nachvollziehbaren Erläuterung und wird durch eine Sensitivitätsanalyse sowie den Blick auf ggf. vergleichbare Analysen und deren Ergebnisse maßgebend in ihrer Aussagekraft verstärkt. [95–97]

5 Grundsätze Baukalkulation

Nachdem in den letzten drei Kapiteln eine Einführung in die tunnelbautechnischen Hintergründe, die in Österreich üblichen Verkehrstunnel und in die Methodik der Ökobilanz gegeben wurde, werden nun die Grundsätze der Baukalkulation beschrieben. Wie eingangs erwähnt, erfolgt somit der thematische Lückenschluss und die Überleitung zur Methodik der durchgeführten Ökobilanzanalyse im nächsten Kapitel.

5.1 Allgemein

In der Bauwirtschaft bildet die Baukalkulation das operative Bindeglied zwischen der technischen Planung und der betriebswirtschaftlichen Realisierung. Die Kalkulation – auch Bauauftragsrechnung genannt – stellt die Grundlage eines Angebots dar und bestimmt nach Auftragserteilung den zu realisierenden Erlös für die Herstellung der angebotenen Bauleistung. Daher hängt der Erfolg des jeweiligen Bauprojekts und der einzelnen Baustellen, im Sinne einer Produktionsstätte, primär von der Baukalkulation ab. [100]

Im Gegensatz zu stationären Industrieprozessen ist die Realisierung eines Bauprojekts immer ein Unikat und deshalb jeweils stark abhängig von dem Standort des Bauwerks, der technischen und logistischen Umsetzung, den eingesetzten Materialien sowie Bauweisen etc. Speziell der zyklische Tunnelbau ist durch eine hohe Abhängigkeit der angetroffenen Geologie und der gewählten Maschinen geprägt und somit immer mit einem gewissen Restrisiko verbunden. Daher wird dieser Komplexität durch ein standardisiertes Kalkulationsverfahren begegnet, das eine transparente Preisermittlung ermöglicht. Die Baukalkulation beruht, wie bereits erwähnt, normativ auf der ÖNORM B 2061 [28] und die Entstehung dieses Standards entspringt dem Bedürfnis, angemessene Preise für Bauleistungen mit nachvollziehbarer Herleitung aus den dafür notwendigen Ressourcen zu definieren. [100]

Diese Ressourcen sind wie folgt in vier Kostenarten gegliedert [28]:

- Lohnkosten
- Gerätekosten
- Materialkosten
- Kosten für Fremdleistungen

Ein wichtiger Bestandteil der nachvollziehbaren Herleitung der Kosten ist das sogenannte Verursacherprinzip, bei welchem jeder Teilleistung die Kosten zugeordnet werden, welche sie jeweils tatsächlich auslöst. Die Kosten beschreiben im normativen Sinn den monetär

bewerteten Einsatz oder Verbrauch von Produktionsfaktoren wie Gütern und Dienstleistungen. Falls die Kosten einer bestimmten Bezugsgröße direkt zugeordnet werden können, spricht man von Einzelkosten oder auch direkten Kosten. Jedoch ist diese Zuteilung bzw. Abgrenzung zwar nicht immer eindeutig, da oftmals Überschneidungen auftreten und/ oder die jeweilige Position nicht ausreichend beschrieben ist. Diese Kosten werden deswegen als Gemeinkosten oder auch als indirekte Kosten bezeichnet. [28]

Für die spätere Preisbildung in Form einer Zuschlagskalkulation wird die Preisermittlung auf Basis der o. g. Kostenarten, wie folgt, untergliedert [28]:

- Einzelkosten
- Baustellengemeinkosten
- Geschäftsgemeinkosten
- Finanzierungskosten
- Wagnis
- Gewinn

Essenziell für die Überleitung der Kalkulation zur Sachbilanz ist die genauere Erläuterung der Einzelkosten. Diese werden für jede Leistungsposition in Einzelmaterialkosten und Einzelgerätekosten unterteilt, wobei jeweils sachlich und wirtschaftlich gerechtfertigte Produktionsfaktoren zugrunde liegen [28].

Die Einzelmaterialkosten setzen sich aus dem kalkulierten Bedarf an Materialien für die Erbringung der betreffenden Leistung und den zutreffenden Materialkosten je Leistungseinheit zusammen. Dazu zählen aber normativ auch Betriebsstoffe und Verschleißteile für Baugeräte. Unter einem Material wird ein Werkstoff verstanden, welcher für die Errichtung eines Bauwerks eingesetzt oder bei der Errichtung verbraucht wird. [28]

Dabei wird bei den Einzelmaterialkosten in folgende Begriffe, welche in späterer Folge oftmals Verwendung finden werden, genauer unterschieden [28]:

- Baumaterial, welches bleibender Bestandteil des Bauwerks wird (z. B. Spritzbeton in der Laibung)
- Hilfsmaterial, welches nur für die Erbringung von Leistungen erforderlich ist, jedoch nicht bleibender Bestandteil des Bauwerks wird (z. B. Spritzbetonrückprall, Ortsbrustanker, aber Sprengstoff oder Baggerzähne)
- Betriebsstoff, welcher zum Betrieb und zur Wartung der für die Erbringung der Leistung eingesetzten Geräte, Anlagen und sonstigen Betriebsmittel benötigt wird (z. B. Strom, Diesel, und Schmierstoffe)
- Nebenmaterial, welches ein Hilfsmaterial oder ein Betriebsstoff sein kann und zur Erbringung der Leistung notwendig ist, aber nur geringe Kosten verursacht (z. B. Bindedraht für die Bewehrungsmatten)

Die Einzelgerätekosten setzen sich aus dem kalkulierten Zeitaufwand für Baugeräte pro Leistungseinheit für die Erbringung der betreffenden Leistung und den zutreffenden Gerätekosten je Leistungseinheit zusammen. Dabei enthält der kalkulierte Zeitaufwand der Geräte unter anderem produktionsbedingte Stehzeiten und unproduktive Zeiten. Unter einem Baugerät versteht man ein technisches Hilfsmittel, welches zur Ausführung von Bauleistungen aller Art oder zur Gewinnung und Aufbereitung von Baumaterialien verwendet wird. [28]

Für den zyklischen Tunnelbau relevante Geräte sind bspw. Tunnelbagger, Bohrwagen, Spritzbetonmanipulator, Radlader, Muldenkipper, Lkw etc. sowie die dazugehörigen Bestandteile wie eine Bohrlafette oder die Spritzdüse. Speziell für die gegenständliche Kalkulation wichtig ist dabei das untergeordnete Leistungsgerät, welches ein Baugerät ist, dessen Kosten bestimmten Leistungspositionen zugeordnet werden (z. B. beim Tunnelbagger das Lösen im Baggervortrieb) [28].

Die relevanten Kosteninformationen sollen zum Zweck der transparenten Preisermittlung unter Beachtung der jeweiligen Rahmenbedingungen einer konkreten Leistungserbringung Anwendung finden [28]. Zweiteres wird in Österreich durch standardisierte Leistungsbeschreibungen gewährleistet, welche zum Ziel haben, die komplexen und einzigartigen Bauvorhaben durch vorbeschriebene Tätigkeiten bzw. Bauteile strukturiert auszuschreiben. Detaillierter betrachtet, handelt es sich dabei um eine konstruktive Leistungsbeschreibung, da die gewünschte Leistung positionsweise vorkommt und in einem Leistungsverzeichnis (LV) systematisch gegliedert wird [100]. Dabei wird die Leistung im sogenannten Langtext vollständig, eindeutig und neutral beschrieben [28]. Im Fall des Tunnelbaus geschieht diese Auflistung durch die standardisierte Leistungsbeschreibung für Verkehr und Infrastruktur (LB-VI) [94].

Die Gliederung eines LVs ist in der ÖNORM A 2061-1 [101] folgendermaßen normativ geregelt:

- Hauptgruppe (HG): Bereiche, welche die standardisierten Leistungsbeschreibungen zur Grundlage haben z. B. Verkehr und Infrastruktur oder Hochbau
- Obergruppe (OG): z. B. Bauabschnitte
- Leistungsgruppe (LG): z. B. Stützmaßnahmen UT
- Unterleistungsgruppe (ULG): z. B. Anker
- Wählbare Vorbemerkungen bzw. Positionen

Durch diese spezielle Gliederung eines LVs, ergibt sich die kleinste verrechenbare Leistung der Einzelleistungen als Position mit der zugehörigen technischen Beschreibung der Leistung im Positionstext [100]. Eine Position hat dabei immer folgenden Aufbau [101]:

- Positionsnummer
- Positionstext
- Menge

- Mengeneinheit (EH), z. B. m³ oder kg
- Preisanteil Lohn (LO)
- Preisanteil Sonstiges (SO)
- Einheitspreis (EP), setzt sich aus Lohn und Sonstiges zusammen
- Positionspreis (PP), ergibt sich aus Menge mal Einheitspreis

Bei der Baukalkulation der gegenständlichen Analyse handelt es sich im technischen Sinn um eine Vorkalkulation, die auf Basis der Ausschreibungsunterlagen die voraussichtlichen Selbstkosten ermittelt [100]. Jedoch fließen bereits konkrete Informationen über die eingesetzten Geräte sowie Erfahrungswerte aus der Nachkalkulation vergleichbarer Projekte und Fachliteratur ein.

5.2 Transformation: Kalkulation zur Sachbilanz

Die grundsätzliche Überlegung der Transformation ist, aus den bekannten Parametern der Kalkulation die umweltrelevanten Positionen herauszuziehen und die dadurch entstehenden Mengen zu erfassen. Auf Basis der Systematiken der ÖNORM A 2063 [101] für die Gliederung und textliche Beschreibungen der Leistungen und der Aufschlüsselung in die Kostenarten nach der ÖNORM B 2061 [28] für die Mengenermittlung ist daher eine ausreichende Datenstruktur gegeben. Anstatt die Umweltwirkungen eines Bauwerks grob über Pauschalwerte oder rein geometrische Massenermittlungen anhand von Plänen abzuschätzen, greift dieser Ansatz direkt auf die operative Ebene der Preisbildung zu. Dabei wird das K7-Blatt als ein Ressourcen-Inventar verstanden, welches nicht nur Preise generiert, sondern präzise vorgibt, welche Ressourcen für die Erbringung einer Leistungseinheit benötigt bzw. verbraucht werden. Die methodische Verknüpfung von ökonomischen Kalkulationsdaten und ökologischen Sachbilanzen folgt also der Logik, dass jede baubetriebliche Ressource ein physisches Gegenstück hat.

K7 Darstellung der Preisermittlung		Projekt:			Seite:	
Unternehmen		Gz UN:	Gz AG:	Erstellt am:		
				Preisbasis lt. Angebotsunterlagen		
Positionsnummer	Positionsstichwort	Menge	EH	Anteil Lohn	Anteil Sonstiges	
Kosten-/Preisermittlung je EH			Menge/EH	Einheitskosten (EHK)/(Einheitspreis (EHP))		

Abb. 5-1: Vorlage für K7 Blatt [28]

Der entscheidende Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der präzisen Erfassung der Prozess-Emissionen. Während herkömmliche Ökobilanzen oft nur die „graue Energie“ der dauerhaft eingebauten Materialien – also der Baumaterialien – betrachten, ermöglicht die Extraktion aus der Kalkulation die Berücksichtigung des gesamten Baubetriebs in sehr detaillierter Form. Denn sinngemäß nach der ÖNORM B 2061 [28] werden bei der Ermittlung der Materialkosten

allfällige Kosten für Transport, Ladearbeit und Manipulation, Nebenmaterialien oder Materialverluste (z. B. Spritzbetonrückprall) berücksichtigt. So lassen sich beispielsweise die Baugeräte durch die aufgewendeten Betriebsstunden, die für die Bewetterung notwendige elektrische Energie, die Betonmenge der Innenschale oder der Treibstoffverbrauch für das Bohren der Anker aus den jeweiligen Positionen der Kalkulation ableiten. Diese Mengen bilden im Grunde die Sachbilanz, die somit als neutrales Mengengerüst fungiert.

In der praktischen Umsetzung bedeutet dies eine konsequente Trennung der Kalkulationsbestandteile. In einem ersten Schritt werden die Einzelkosten der jeweiligen Teilleistungen in ihre physischen Komponenten zerlegt. Jedoch besitzen nicht alle Bestandteile des K7-Blatts eine ökologische Relevanz im Sinne der Sachbilanz. Während die Lohnkosten in der klassischen Kalkulation den personellen Aufwand in Zeitwerten abbilden, werden sie für die Erstellung der Ökobilanz ausgeklammert. Ebenso verhält es sich mit den definierten Zuschlägen der ÖNORM B 2061 [28] für Geschäftskosten, Wagnis und Gewinn. Diese Aufschläge stellen rein betriebswirtschaftliche Verrechnungswerte dar, um die Gemeinkosten des Unternehmens sowie unternehmerische Risiken auf die einzelnen Positionen umzulegen. Da diesen prozentuellen Zuschlägen kein direkter stofflicher oder energetischer Ressourcenverbrauch auf der Baustelle gegenübersteht, werden sie in der physikalischen Sachbilanz nicht berücksichtigt. Durch dieses Ausklammern der monetären und betriebswirtschaftliche Faktoren wird sichergestellt, dass die resultierende Bilanz frei von preispolitischen Verzerrungen bleibt und ausschließlich die reale ökologische Inanspruchnahme des Bauvorhabens widerspiegelt.

Materialpositionen wie Spritzbeton, Bewehrungsstahl, Anker und Spieße etc. werden als Massenströme identifiziert, wobei die Kalkulation den Vorteil bietet, dass baubetriebliche Parameter wie etwa Rückprall, Überprofil oder Übergreifungslängen und Verschleiß usw. bereits im Leistungswert enthalten sind. Parallel dazu werden die Gerätekosten über die Geräteleistung und den spezifischen Verbrauch in Energiebedarfe umgerechnet. Durch diese Transformation der direkten Kosten von Gerät und Material entsteht ein detailliertes Ressourcen-Inventar pro Position. Die Grundlage der durchschnittlichen Parameter für Vortrieb und Geologie bilden Leistungsansätze/ Erfahrungswerte sowie externe und interne Literaturen für unterschiedliche geologische Verhältnisse aus langjährigen Tunnelbautätigkeiten in Österreich. Die kalkulierten Ansätze repräsentieren dabei je nach Geologie und Querschnitt typische Abschlagslängen, Stützmittelmengen, Vortriebszyklen, Energieaufwendungen, Materialien, Geräte, Innenschalenstärken und ggf. Bewehrungsgrade sowie Geräteausnutzungen etc.

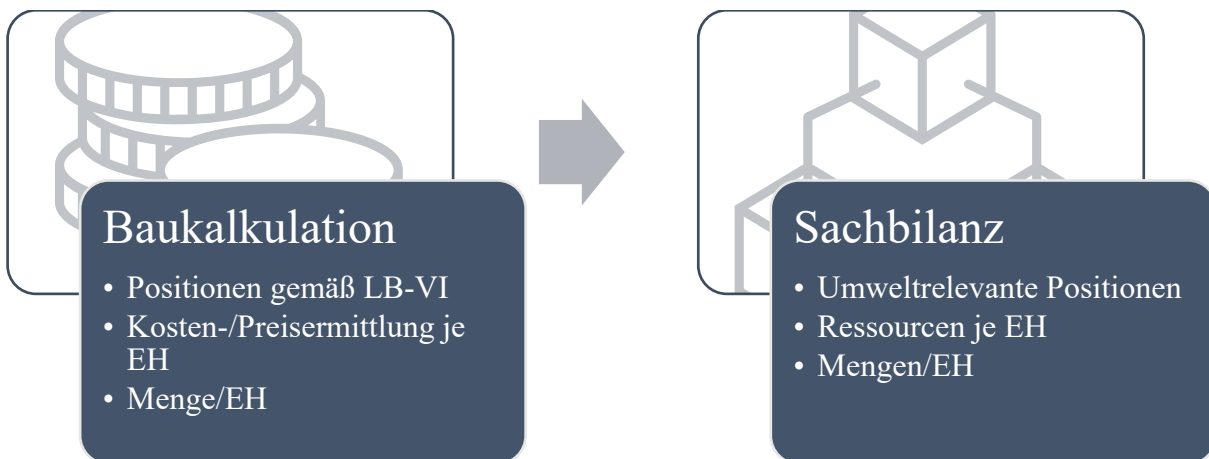


Abb. 5-2: Transformation Baukalkulation zur Sachbilanz [eigene Abbildung]

Dieses Inventar aus Baugeräten, Baumaterialien, Hilfsmaterialien und Betriebsstoffen bildet die Schnittstelle zur Sachbilanz. Die Herausforderung besteht darin, die oft sehr spezifischen Kalkulationspositionen so zu aggregieren, dass sie in späterer Folge mit den Datensätzen der Ökobilanzierung kompatibel sind.

Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich die für die Analyse relevanten Positionen für Ausbruch, Stützmaßnahmen und Innenschale. Diese werden im Folgenden ebenfalls systematisch gegliedert angeführt [94]:

- 62 Ausbrucharbeiten UT
 - 6201 Ausbruch zykl. Vortrieb Tunnel-Matrix/Modell (a)

Die ULG 6021 beinhaltet alle verwendeten Positionen des Ausbruchs mit jeweiliger Abstufung der Ausbruchsquerschnitte (wie etwa Kalotte, Strosse, Sohle oder Strosse & Sohle bzw. tiefe Sohle). Exemplarisch kann hier die Position 620101C „Ausbr. TU-K für 1.OZ=3, VKL 3/X“ für den Ausbruch der Kalotte mit der 1. Ordnungszahl 3 angeführt werden.
- 63 Stützmaßnahmen UT

Die LG 63 enthält alle für die betrachteten Geologien notwendigen Stützmaßnahmen in den ULG für die freie Strecke im ungestörten Vortrieb ohne Sonderlösungen. Exemplarisch kann hier die Position 630201A „M550 bis 4,5 kg/m², bergs. o.Bogen“ für die bergseitigen Bewehrungsmatten in der Laibung angeführt werden.

 - 6301 Anker
 - 6302 Bewehrung
 - 6303 Bögen
 - 6304 Spritzbeton
 - 6305 Spieße
- 64 Entwässerungsarbeiten
 - 6404 Rohrkanäle und Sickerungen

Die LG 64 enthält beispielsweise die Ulmendrainage.

- 65 Abdichtungen UT

Die LG 65 enthält alle relevanten Positionen, welche an der Linie 1b anliegen und den Übergang zwischen Außen- und Innenschale darstellen.

- 6501 Abdichtungsträger UT
- 6503 Schutzschicht UT
- 6504 Kunststoffdichtungsbahn KDB UT

- 66 Betonarbeiten UT

Die LG 66 enthält die quantitativ wirksamen Betonbaupositionen der Innenschale.

- 6601 Widerlager und Sohlbeton
- 6602 Gewölbebeton
- 6606 Sonstiger Beton
- 6608 Bewehrung

Um die theoretische Methodik der Transformation zu verdeutlichen, wird nachfolgend der Übergang vom Kalkulationsblatt zur Sachbilanz am Beispiel der Spritzbetonbewehrung dargestellt. Die gewählte Position der Bewehrungsmatten dient hierbei als Referenz, um den Prozess der Extraktion und Aggregation exemplarisch aufzuzeigen. In der Darstellung wird bewusst auf konkrete Zahlen oder Ansatzwerte verzichtet, um firmeninterne Informationen nicht zu veröffentlichen und um die strukturelle Logik der Datenaufbereitung in den Vordergrund zu rücken.

Dabei wird verdeutlicht, wie aus den ursprünglich für die Preisbildung vorgesehenen Zeilen des K7-Blatts ausschließlich die physikalisch relevanten Mengenströme für die Ökobilanzierung isoliert werden. Die in Tab. 5-1 dargestellte Vorgangsweise ist repräsentativ für das gesamte Leistungsverzeichnis; die Transformation der übrigen Positionen – von den Ausbrucharbeiten der LG 62 bis hin zu den Betonarbeiten der LG 66 – erfolgte nach demselben Prinzip der Entmonetarisierung und stofflichen sowie energetischen Identifikation.

LG 63 Stützmaßnahmen UT				
6302	Bewehrung Spritzbeton			
630201A	M550 bis 4,5 kg/m ² , bergs. o.Bogen		1	t
Material	Bewehrungsmatte			
	Übergriff Matte	Ansatzwert	Zahlenwert	%
	Baustahlmatte M550	Ansatzwert	Zahlenwert	t
	Befestigungshaken	Ansatzwert	Zahlenwert	kg
	Bindedraht	Ansatzwert	Zahlenwert	kg
	Stahl gesamt	Summe	Zahlenwert	t
Gerät	Hebegerät			
	Diesel	Ansatzwert	Zahlenwert	l
	Schmierstoff	Ansatzwert	Zahlenwert	l
	Strom	Ansatzwert	Zahlenwert	kWh

Tab. 5-1: Transformierte Baukalkulation für Bewehrung Spritzbeton

Die Legitimation der theoretischen Überlegung und der Vorgangsweise zur Transformation von Kalkulationsdaten in Sachbilanzen für ökologische Untersuchungen lässt sich durch aktuelle Branchenentwicklungen durchaus bestätigen. Das Referenzprojekt „Öko-Daten zur LB-VI“ des Arbeitsausschusses Straße der Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV) beschäftigt sich ebenfalls mit der Verknüpfung der LB-VI mit klimarelevanten Daten für eine Richtbewertung von Infrastrukturen. Dieses Projekt belegt, dass die methodische Nutzung von Kalkulationsansätzen zur automatisierten Ermittlung von Treibhausgas-Äquivalenten bereits erfolgreich erprobt wurde und den Weg für einen neuen Branchenstandard ebnet. Das Verfahren stützt sich dabei auf „artikelbasierte Kalkulationsansätze“ von Standardkalkulationen, welche direkt aus den Bedarfsmengen je Mengeneinheit einer Leistungsposition unter Einbeziehung baubetrieblicher Parameter abgeleitet werden. Die methodischen Grundlagen bilden einerseits die in den K7-Blättern dokumentierten Ressourcen und andererseits generische Werte aus Datenbanken. Diese Entwicklung unterstreicht die Relevanz der Kalkulationsdaten als Basis für einen neuen Branchenstandard im nachhaltigen Infrastrukturbau. [102]

6 Ökobilanzanalyse des zyklischen Tunnelbaus

6.1 Zieldefinition

Ziel der Studie ist die Untersuchung und Erarbeitung von ökobilanziellen Durchschnittswerten für österreichische Verkehrstunnel unter Berücksichtigung sämtlicher Prozesse und Materialien des zyklischen Tunnelvortriebs. Dabei werden unter anderem der Ausbruch sowie die zugehörigen Sicherungsmaßnahmen (bis Linie 1a nach ÖNORM B 2203-1 [27]), die Innenschale (ab Linie 1b, jedoch ohne Straßen- bzw. Bahnoberbau) und die Deponie des Ausbruchsmaterials sowie der An- und Abtransport der relevanten Geräte (inkl. Schalwägen) in den Lebenszyklusphasen „A1-A3 Herstellung“, „A4 Transport“ und „A5 Errichtung“ nach der ÖNORM EN 17472 [30] berücksichtigt.

6.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit der vorliegenden Untersuchung wird so festgelegt, dass die Bezugsgröße der ökobilanziellen Betrachtung als die Herstellung von 1 m Tunnel ohne Straßen- bzw. Bahnoberbau definiert wird. Im Detail werden somit repräsentative Durchschnittsquerschnitte eines Streckentunnels im ungestörten Vortrieb ohne Sonderlösungen (z. B. geometrische Querschnittsaufweitungen für bspw. Pannenbuchten oder bautechnische Sondermaßnahmen wie vorausseilende Injektionsschirme etc.) für die zuvor beschriebenen Querschnitte aus Kapitel 3.2.3 berücksichtigt.

6.2.1 Hintergründe zur Wahl der funktionellen Einheit

Im Bereich des (Verkehrs-)Infrastrukturbaus wird aufgrund der ausgedehnten Linearität häufig ein Kilometer des jeweiligen Bauwerks/ Bestandteils als funktionelle Einheit herangezogen [24, 32, 35, 47]. Für die gegenwärtige Untersuchung wird dieser Ansatz jedoch auf einen Tunnelmeter (tm) bzw. einen Laufmeter (lfm) heruntergebrochen, was in vergleichbaren Analysen ebenfalls angewandt wird und so einen direkten Vergleich erlaubt [22, 23, 25, 26, 67].

Diese methodische Entscheidung gründet auf dem gewählten Skalierungsverfahren der Primärdaten. Um eine realitätsnahe und für die österreichische Infrastrukturlandschaft repräsentative Sachbilanz zu erhalten, werden die längenunabhängigen Anteile des konventionellen Vortriebs (bspw. An- und Abtransport der Geräte, Herstellung Schalwägen

etc.) vorab auf die typische Gesamtlänge österreichischer Verkehrstunnel skaliert. Anderenfalls würden die prozentuellen Verteilungen der längenvariablen und der für den Bauprozess immer auftretenden Prozesse nicht mehr kongruent übereinstimmen. So fiel bspw. der An- und Abtransport aller notwendigen Geräte für einen 10 m langen Tunnel viel mehr ins Gewicht als bei einem 100 m langen Tunnel und würde so die Ergebnisse verzerren.

Bei der Bestimmung dieser Referenzlänge wurde bewusst nicht der arithmetische Mittelwert gewählt, sondern der Median herangezogen. Hintergrund dieser statistischen Differenzierung war die Analyse der Bestandstunnel im österreichischen Schienen- und Straßennetz. Bei den Daten der Straßentunnel liegt bereits eine Differenzierung zwischen Galerien und Tunnel vor [14]. Bei den Bahntunneln wurde die Tunnellänge manuell anhand von Beispielprojekten von Galerie-ähnlichen Bauwerken abgegrenzt [13]. Die einleitend beschriebenen Großprojekte mit extremen Tunnellängen treten quantitativ zwar deutlich seltener auf, weisen jedoch aufgrund ihrer enormen Dimensionen ein mathematisches Übergewicht auf. Würde der Berechnung ein klassischer Durchschnittswert zugrunde gelegt, würden diese Tunnelbauwerke den Mittelwert unverhältnismäßig stark nach oben verzerren. Würde man beispielsweise den eingangs erwähnten Koralmtunnel in der Statistik berücksichtigen, so wäre der durchschnittliche Bahntunnel etwa 1124 m statt 890 m lang. Der Median hingegen fängt diesen Einfluss der statistischen Ausreißer effektiv ab und repräsentiert jene Länge, die von der Hälfte aller österreichischen Verkehrstunnel über- oder unterschritten wird, wodurch die repräsentative Tunnellänge für die Skalierung letztlich unter einem Kilometer liegt (vgl. Tab. 6-1).

Arten der Verkehrstunnel	Mittelwert der Tunnellänge [m]	Median der Tunnellänge [m]	Anzahl der Tunnel [-]
Straßentunnel Autobahn	1.126	503	58
Straßentunnel Schnellstraße	1.345	745	116
Straßentunnel (gewichtet)	1.266	583	174
Bahntunnel	890	395	261

Tab. 6-1: Ermittlung repräsentative Tunnellängen, basierend auf [13, 14, 17]

Durch das anschließende Herunterbrechen dieses median-skalierten Gesamtwerts auf einen einzelnen Laufmeter wird die funktionelle Einheit geschaffen (vgl. Gleichung 6.1). Diese stellt sicher, dass sowohl die „konstanten“ Anteile als auch die variablen Anteile des Regelvortriebs in einem korrekten Verhältnis auf den Tunnelmeter umgelegt werden. Ebenfalls eignet sich diese Einheit besser für Querschnitte, da diese i. d. R. bei einem üblichen Tunnelprojekt weniger als 1 km an akkumulierter Länge aufweisen.

$$\text{Umweltauswirkungen} \left[\frac{1}{tm} \right] = \frac{\text{Wirkungen}_{\text{konstant}} + \text{Wirkungen}_{\text{variabel}} * \text{repr. Länge}}{\text{repr. Länge}} \quad (6.1)$$

6.3 Systemgrenzen

6.3.1 Allgemein

Die Systemgrenze der Untersuchung wird im Allgemeinen durch den Übergang zwischen der Innenschale und dem Straßen- bzw. Bahnoberbau gekennzeichnet (siehe Abb. 6-1). Da sich dieser Übergang und speziell der geometrische Verlauf aufgrund der verschiedenen geologischen Verhältnisse bzw. der Querschnittsart differenzieren, wird in den technischen Systemgrenzen speziell auf die zugehörigen Arbeitsschritte der Querschnittsbestandteile in Abhängigkeit des betrachteten Tunnels eingegangen.

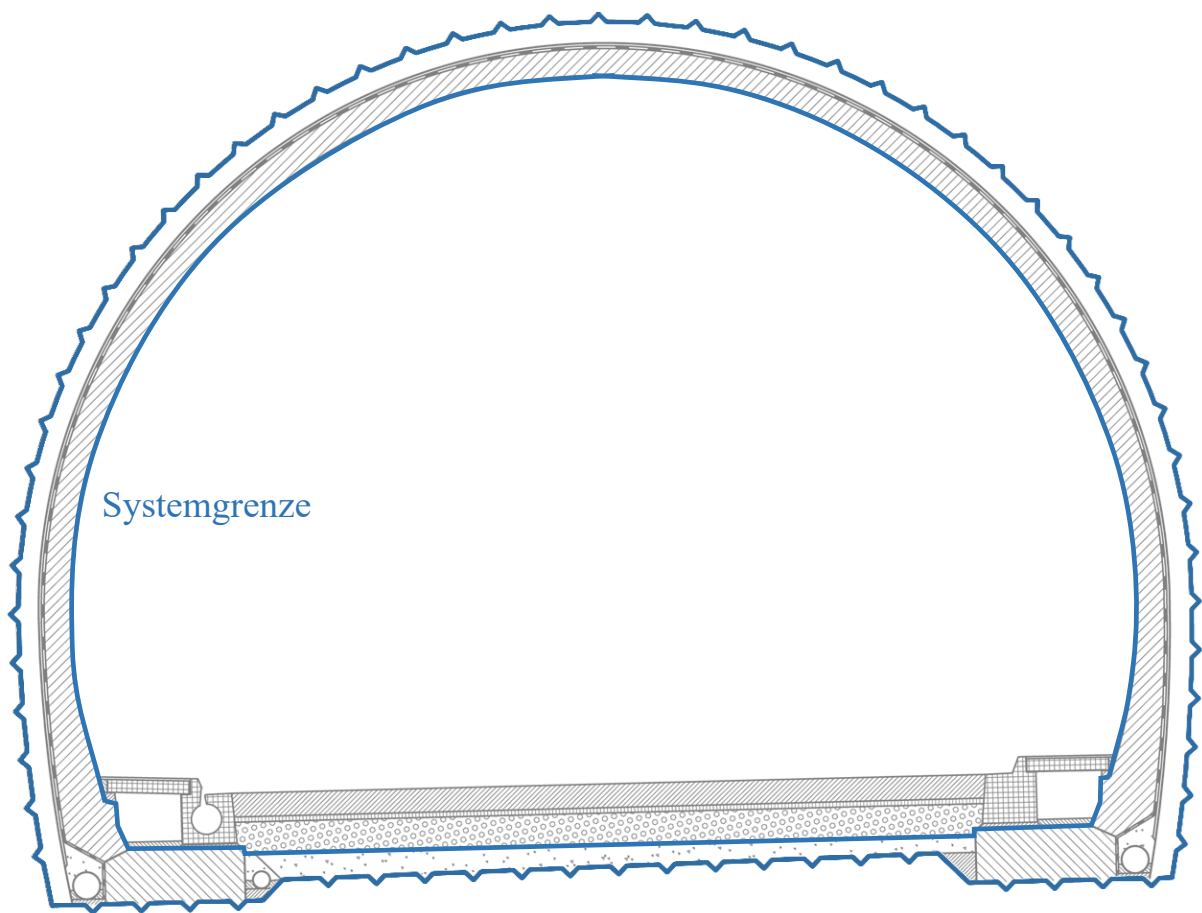


Abb. 6-1: Systemgrenze blau umrahmt, adaptiert nach [93]

6.3.2 Technische Systemgrenze

Welche Material- und Energieströme in die ökologische Bewertung einfließen, wird über eine präzise Abgrenzung des Untersuchungssystems geregelt. Diese Systemgrenzen definieren den methodischen Rahmen, indem sie festlegen, welche Inputs, Outputs und Prozessmodule für die Studie berücksichtigt werden [95, 96]. Im Kontext der vorliegenden Arbeit erstreckt sich dieser Bilanzierungsrahmen konsequent auf alle baubetrieblichen Teilschritte und konstruktiven Leistungen, die für die physische Errichtung der betrachteten Tunnelquerschnitte anfallen. Um

diesen allgemeinen Rahmen in eine standardisierte Struktur zu überführen, orientiert sich die Zuordnung der Elementarströme an den aktuellen europäischen Normvorgaben.

Im Sinne der ÖNORM EN 17472 wird der permanente, dem späteren Bauwerk zugehörige Materialeinsatz den Lebenszyklusphasen (LZ-Phasen) A1-A3 zugeordnet, während temporäre Hilfsstoffe und prozessbedingte Verbräuche in die Errichtungsphase A5 einfließen [30, 53]. D. h., dass der Innenschalenbeton, welcher fester Bestandteil des Tunnels wird, der Herstellungsphase A1-A3 zugewiesen wird (vgl. Abb. 6-2). Der Transport des Betons zum Einbauort auf die Baustelle wird folglich der Transportphase A4 zugeordnet. Die prozessbedingten notwendigen Hilfsstoffe sowie die dazugehörige aufgewendete Energie des Einbaus werden der Phase A5 angerechnet.

Demgegenüber wird etwa der vollständige Lebenszyklus der temporären Spritzbetonsicherung an der Ortsbrust – inklusive Herstellung (A1-A3), Transport (A4), Einbau (A5) und Entsorgung (C1-C4) – innerhalb des Errichtungsmoduls A5 abgebildet, da die Ortsbrustsicherung keinen festen Bestandteil des fertigen Tunnelbauwerks darstellt.

Ergänzend werden in der Phase A5 auch die gesamte Versorgung (Beleuchtung und Bewetterung), die Transportlogistik der eingesetzten Tunnelbaugeräte zu und von der Baustelle sowie die Deponierung des Ausbruchsmaterials modelliert, um ein repräsentatives Abbild der durchschnittlichen Umweltwirkungen zu generieren.

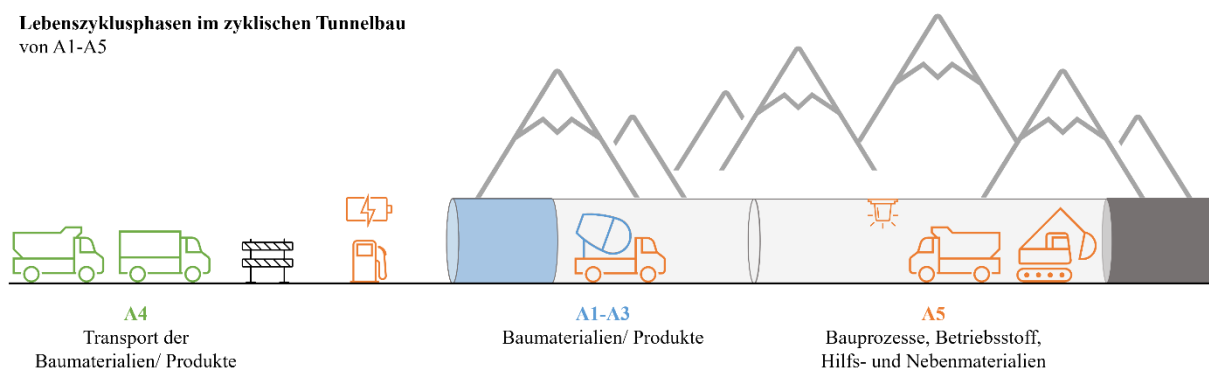


Abb. 6-2: Lebenszyklusphasen im zyklischen Tunnelbau, inspiriert von [103]

Je nach Verkehrsträger des Infrastrukturtunnels und den vorherrschenden geotechnischen Randbedingungen variieren die notwendigen Arbeiten und Materialmengen in Art und Umfang erheblich. Zur Veranschaulichung werden die festgelegten Systemgrenzen in den folgenden Abbildungen schematisch dargestellt. Die Grafiken grenzen die jeweils berücksichtigten Leistungen für die Ökobilanz anhand der zugehörigen Lebenszyklusphasen visuell ab. Eine zusammenfassende Abbildung der gesamten Systemgrenzen für 1 m Tunnel ist im Anhang ersichtlich. Die jeweiligen Mengen sowie eine Beschreibung der Hintergrunddaten und der getroffenen Annahmen werden in der späteren Sachbilanz (Abschnitt 6.4) behandelt. Bezugnehmend auf das Kapitel 2 Zyklischer Tunnelbau und die Gliederung nach der LB-VI werden die folgenden Leistungen/ Arbeitsschritte berücksichtigt.

6.3.2.1 Ausbrucharbeiten

Der Abtransport des Ausbruchmaterials wird lt. ÖNORM EN 17472 innerhalb des Moduls A5 ökobilanziell betrachtet, wobei Gutschriften aus einer etwaigen stofflichen Wiederverwertung aufgrund variierender Projektspezifika im Zuge dieser Analyse ausgeschlossen werden. Die prozesstechnische Differenzierung der Vortriebsarten sieht für den Sprengvortrieb den Ansatz von patronierten Sprengstoffen und nicht-elektrischen Zündern vor. Neben den Materialien werden hierbei auch die detonationsbedingten THG-Emissionen sowie der Verschleiß der Bohrkronen für die Bohrlöcher eingerechnet. Für den Baggervortrieb wird analog dazu der erhöhte Stahlverschleiß der Lösewerkzeuge substituiert. Darüber hinaus fließen die Bohrgestänge, das Wasser für die Bohrlöcher, die notwendigen Schmierstoffe sowie der gesamte Energiebedarf – aufgeteilt in Strom- und Dieselaufwand – in die ökologische Gesamtbetrachtung ein (siehe Abb. 6-3).



Abb. 6-3: Systemgrenze Ausbrucharbeiten

6.3.2.2 Stützmaßnahmen

Als vorausseilende Stützmaßnahmen werden Ortsbrustanker und -spritzbeton sowie Spieße in die Bilanzierung miteinbezogen, wobei analog zum Ausbruch der Verschleiß der Bohrkronen, der Bohrstahl sowie die Spieße/ Anker selbst als Materialpositionen erfasst werden. Ergänzend hierzu umfasst das Modellierungskonzept nachlaufende Anker, wobei zwischen Mörtel-, Selbstbohr- und Rohrreibungsankern differenziert wird. Sowohl die Ankerelemente als auch der zugehörige Ankermörtel bzw. die Injektionen sind im Rechenmodell abgebildet. Für die Stahlbögen in Form von Gitterträgern sowie für die Bewehrung des Spritzbetons mittels Stahlmatten liegen fundierte Hintergrunddaten vor. Der abgebildete Detaillierungsgrad (vgl. Abb. 6-4) ermöglicht zudem eine getrennte Betrachtung des Spritzbetons (z. B. Erstarrungsbeschleuniger als Zusatzmittel).

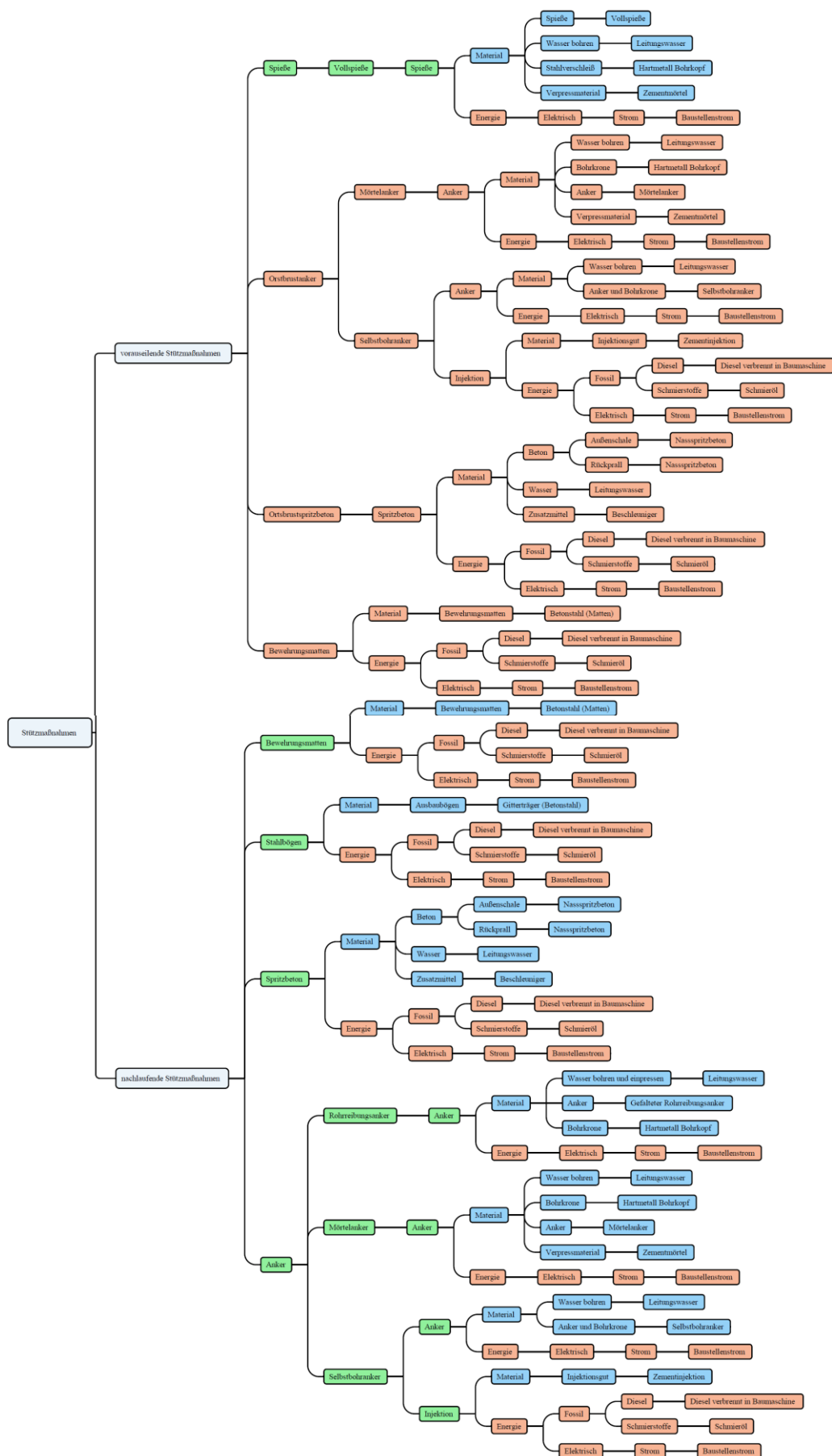
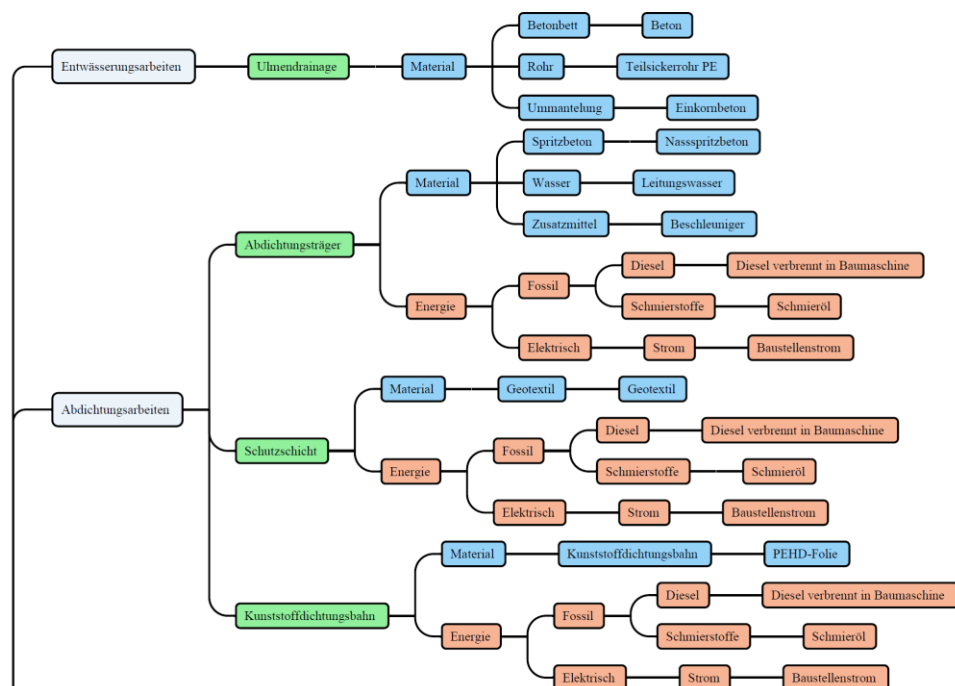


Abb. 6-4: Systemgrenze Stützmaßnahmen

6.3.2.3 Innenschale

Die Bilanzierung der Systemkomponente „Innenschale“ umfasst ganzheitlich alle Maßnahmen von den Entwässerungsarbeiten bis hin zu den Betonarbeiten. Die Entwässerung wird durch die Ulmendrainage abgebildet. Für den Bereich der Abdichtungen basiert das Modell auf detaillierten technischen Daten für den Abdichtungsträger aus Spritzbeton, das Geotextil und die KDB. Der baubetriebliche Errichtungsprozess des tragenden Betonkörpers differenziert präzise zwischen der Sohlplatte bzw. dem Sohlgewölbe bei schlechter Geologie und den Widerlagern. Hierbei wird die temporäre Hilfskonstruktion der Stahlschalung berücksichtigt, wobei die Abschalung bis auf Materialebene – einschließlich Kanthölzern, Schaltafeln, Schalöl, Nägeln und Kleisenen – detailliert im Rechenmodell abgebildet ist. Geometrische Abweichungen und ausbruchsbedingte Mehrmengen werden über separate Positionen für das Auffüllen von Überprofilen im Sohlbereich sowie für den Mehrbeton im Bereich von Kalotte und Strosse erfasst. Der konstruktive Gewölbebeton wird bei ungünstigen, „leicht lösbaaren“ geologischen Verhältnissen zudem um den erforderlichen Betonstahl für bewehrte Blockabschnitte ergänzt. Die schweren Großgeräte – wie der Gewölbeschalwagen, der Sohlchalwagen (bei Ausführung als Sohlgewölbe) sowie der Bewehrungs- und Nachbehandlungswagen für die bewehrten Blöcke – werden anteilig über die Länge in die Analyse einbezogen. Die gesamte Herstellung, der Transport der Tragkonstruktion sowie die zusätzliche Deponierung der anfallenden Verschleißteile (wie etwa der Schalhaut) sind somit anteilig in der Errichtungsphase (Modul A5) berücksichtigt. Die Diesel- und Stromverbräuche werden in Analogie zu den vorherigen Systemgrenzen den einzelnen Arbeitsgängen/Materialien zugeordnet (vgl. Abb. 6-5).



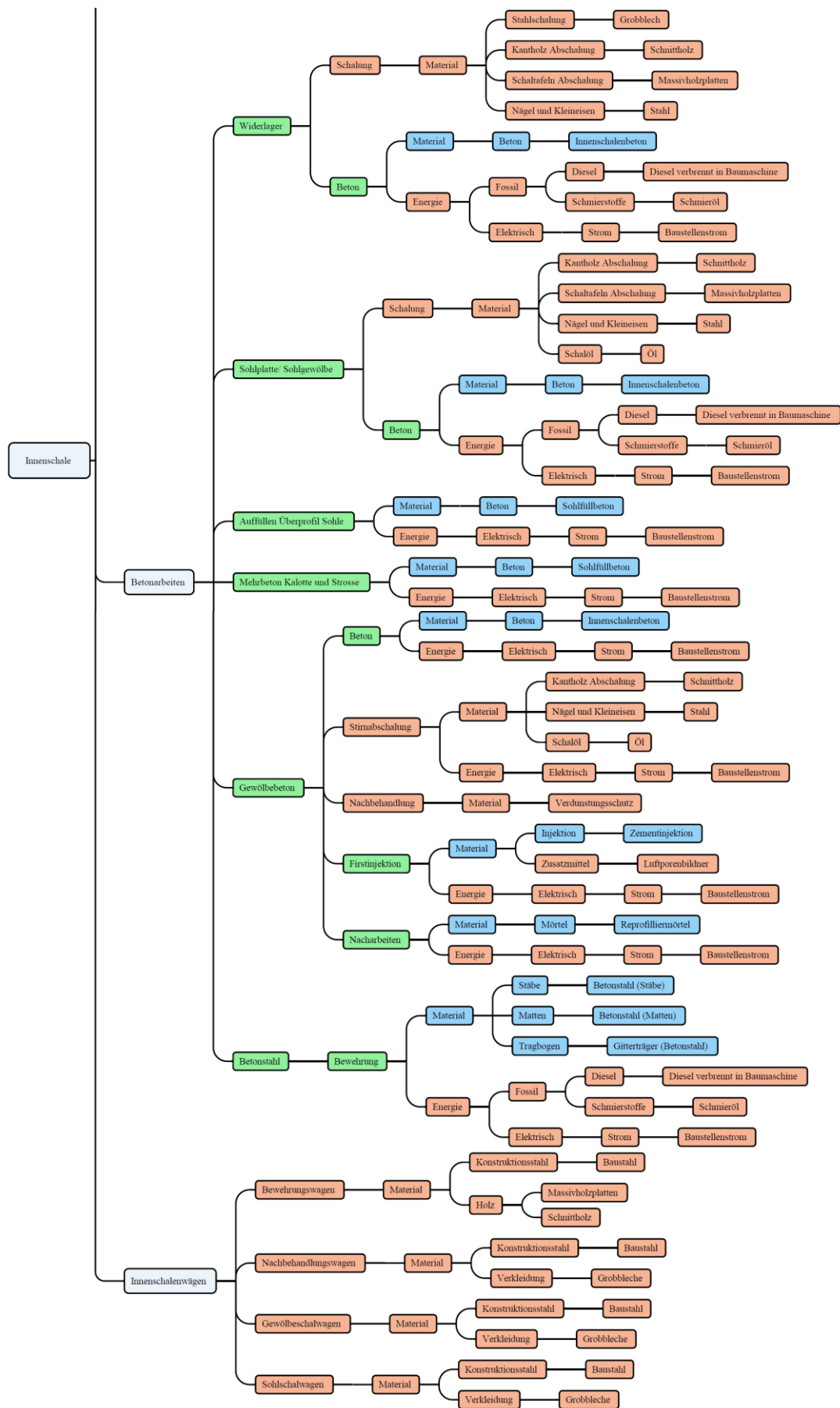


Abb. 6-5: Systemgrenze Innenschale

Aufgrund der stark projektspezifischen hydrogeologischen Gegebenheiten sowie einer mangelnden Datenverfügbarkeit bleiben sämtliche baustellenspezifischen Wasserverbräuche bezüglich Wasserhaltung sowie die Maßnahmen zur Wasseraufbereitung (z. B. Gewässerschutzanlage) im Untersuchungsrahmen unberücksichtigt. Der Antransport von Brauchwasser zur Baustelle bzw. der prozessbedingte Wasserbedarf wird hingegen in die Analysen integriert. Ist die notwendigen Transporte aller Materialien zum Einbauort auf die Baustelle werden adäquat je nach Transportdistanz und Art des Transports einbezogen (siehe Abschnitt 6.4.3). Üblich anfallende Baurestmassen und Bauabfälle wie Bewehrungsverschnitt, Betonrestmassen, Spritzbetonrückprall, Holz für Abschaltungen etc. werden ebenfalls berücksichtigt. Die Herstellung und Verwendung der Maschinen und Geräte findet ebenso Berücksichtigung. Der Transport zur und von der Baustelle dieser Geräte wird ebenfalls berücksichtigt. Die baustellenspezifische Infrastruktur sowie die Baustelleneinrichtung (BE) ist nicht Bestandteil der Ökobilanz. Aufgrund der starken Projektabhängigkeit ist eine Bilanzierung in frühen Planungsstadien nicht verlässlich durchführbar, da weder der genaue Umfang noch die räumliche Disposition der BE-Flächen exakt prognostiziert werden können.

6.3.3 Geografische Systemgrenze

Die Definition der geografischen Systemgrenze orientiert sich primär an der Datenverfügbarkeit und der regionalen Verankerung der untersuchten Bauprozesse. Da sämtliche im Rahmen dieser Arbeit herangezogenen Hintergrunddaten überwiegend für den österreichischen Kontext generiert wurden und im Bereich der Sachbilanz bevorzugterweise produktspezifische Ökobilanzdaten – wie etwa Umweltproduktdeklarationen österreichischer Hersteller – Anwendung finden, beschränkt sich der primäre geografische Rahmen auf das Territorium Österreichs. Für bestimmte Baumaterialien und Produkte, welche außerhalb von Österreich hergestellt werden oder für die keine Ökodaten vorliegen, erfolgt die Abbildung neben Eigenmodellierungen sowie internen Studien über generische Datensätze, welche repräsentativ für die Nachbarländer bzw. den EU-Raum sind. In analoger Weise werden etwaige Lücken in der Datenbasis durch überregionale Ansätze aus der Fachliteratur oder aus Ökobilanz-Datenbanken (z. B. ecoinvent [104] oder ÖKOBAUDAT [105]) kompensiert.

6.3.4 Zeitliche Systemgrenze

Die zeitliche Systemgrenze der vorliegenden LCA-Untersuchung umfasst die Herstellungsphase gemäß den Modulen A1-A5 nach dem aktuellen Stand der Technik. Dies beinhaltet die gesamte Prozesskette von der Rohstoffgewinnung und Produktion der Baustoffe über den Transport bis hin zum eigentlichen Einbau sowie den baustellenspezifischen Prozessen und der Ausbruchdeponie. Das bedeutet, dass neuartige, in der Baupraxis noch nicht flächendeckend etablierte Neuentwicklungen – wie beispielsweise innovative, alternative Antriebstechnologien der Baugeräte – in dieser Analyse unberücksichtigt bleiben, um ein realistisches Abbild der gegenwärtigen Baupraxis (Status Quo) zu gewährleisten.

Da weiterführende Lebenszyklusphasen wie z. B. die Instandsetzung (B4), der Betrieb (B6) oder der Rückbau und die Verwertung (C1-C4) stark von individuellen Standortbedingungen, Erhaltungsstrategien und zukünftigen Technologien – speziell in der Abfallwirtschaft [96] – abhängen, werden diese projektspezifischen Variablen nicht weiter betrachtet. Die zeitliche Systemgrenze wird dementsprechend nach Fertigstellung der Innenschale gezogen und darüberhinausgehende Lebenszyklusabschnitte bzw. lebensdauerabhängige Effekte ausgeklammert. Aus diesem Grund wird kein Betrachtungszeitraum definiert [95].

6.4 Sachbilanz

6.4.1 Hintergrunddaten der tunnelbautechnischen Hintergründe

Wie in Abschnitt 4.2.2 allgemein behandelt, hängen Qualität und Belastbarkeit der finalen Ökobilanz-Ergebnisse maßgeblich von der Präzisierung der Sachbilanz ab. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit der systematischen Recherche, Validierung und Erfassung der Primärdaten höchste Priorität eingeräumt. Der methodische Fokus liegt hierbei auf einer kontinuierlichen Kooperation mit Fachleuten aus der Tunnelbaubranche. Dadurch wird gewährleistet, dass alle Modellparameter auf realitätsnahen baubetrieblichen Abläufen basieren und den aktuellen normativen Standards entsprechen. Diese konsequente Verzahnung von Praxis und Normung stellt sicher, dass die ökologische Bewertung die spezifischen österreichischen Rahmenbedingungen präzise abbildet und die Ergebnisse als repräsentative Benchmark-Werte herangezogen werden können.

Zur Gewährleistung dieser Analyseergebnisse wurden in enger Zusammenarbeit mit Expert:innen aus der Tunnelbaubranche durchschnittliche, für den österreichischen Kontext spezifische Parameter bezüglich des Vortriebs, der Innenschale und der parameterdefinierenden geologischen Randbedingungen erarbeitet. Als methodische Grundlage dienen hierbei bewährte Leistungsansätze und Erfahrungswerte aus langjährigen Tunnelbautätigkeiten sowie bereits realisierten Infrastrukturprojekten unter variierenden geologischen Bedingungen. Die Erhebung und Auswertung dieser Praxisdaten erfolgte sowohl für den zyklischen Vortrieb als auch für die Herstellung der Innenschale auf Basis standardisierter Kalkulationen sowie Leistungsdaten und Zyklusdiagrammen bzw. Vortriebsrädern. [53]

Die daraus abgeleiteten Berechnungsansätze spiegeln die für die jeweilige Geologie und den Querschnitt typischen Energieaufwendungen, Abschlagslängen, Stützmittelmengen, Vortriebszyklen, Innenschalenstärken, notwendigen Arbeitsprozesse sowie Geräteeinsätze und -auslastungen etc. wider. Konzeptionell basieren diese Kennwerte – wie nun bereits mehrfach erwähnt – auf den Grundsätzen der neuen österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT), den ÖBV-Richtlinien Innenschalenbeton und Tunnelabdichtung [85, 106] sowie den normativen Vorgaben der ÖNORM B 2203-1 [27]. Die Geräteleistungen, Ausnutzungsgrade, Treibstoff- und Stromverbräuche werden größtenteils von Datenblättern der Baumaschinenhersteller, aus Erfahrungswerten vorangegangener Projekte herangezogen und mit der standardisierten

Baugeräteliste (BGL) [107] abgeglichen. Für baubetriebliche Parameter, welche nicht ausreichend durch interne Ansätze abgedeckt sind (z. B. Stahlverschleiß beim Bohren), wurde ergänzend einschlägige Fachliteratur herangezogen [82, 108]. Beispielsweise können hierzu die Versorgungskomponenten der Bewetterung und Beleuchtung genannt werden. Erstere werden hierzu entsprechend den einzuhaltenden Regulativen [109, 110] abhängig von der Tunnellänge und der zu versorgenden Querschnittsfläche modelliert. Überdies wird eine entsprechend differenzierte Unterscheidung zwischen dem Verfahren des jeweiligen Geräts (Rüstzeit) und dem nachfolgenden Prozess berücksichtigt (z. B. Bohrwagen positionieren und die Ortsbrust abbohren). Daraus resultieren die erforderlichen Energieaufwände (Dieselverbräuche bzw. Strom-Kilowattstunden) aus dem Rüstvorgang und dem Prozess selbst. [53]

Da in den frühen Projektphasen eines Untertagebauwerks häufig noch keine detaillierten und flächendeckenden geologischen Informationen, geschweige denn Erkundungen vorliegen, wird für diese Analyse eine vereinfachte Kategorisierung der geotechnischen Verhältnisse durchgeführt. Um die Ergebnisse dieser Analyse für zukünftige Untersuchungen sowie Nachhaltigkeitsanalysen vergleichbar und nachvollziehbar zu gestalten, wurde eine Einteilung der geotechnischen Verhältnisse in die drei Kategorien „schwer lösbar“, „mittel lösbar“ und „leicht lösbar“ vorgenommen. Diese Kategorisierung basiert auf der matrixbasierten Einteilung der Vortriebsklassen nach der ÖNORM B 2203-1 [27]. Die Kategorien „schwer lösbar“ und „mittel lösbar“ entsprechen dabei den Sprengvortriebsklassen mit der 1. Ordnungszahl 3 & 4 bzw. 5. Hingegen sind die Vortriebsklassen mit der 1. Ordnungszahl 6 & 7 einem Baggervortrieb der Kategorie „leicht lösbar“ gleichzusetzen. [53]

Im Fokus der Untersuchung stehen die Löseverfahren Sprengvortrieb sowie der mechanische Baggervortrieb (vgl. Kapitel 2.2), welche auf Basis der Leistungsbeschreibung LB-VI [94] in Kombination mit praxisüblichen Querschnittsabmessungen analysiert werden. Um den realen Bauablauf des Streckentunnels modelltechnisch praxisnah abzubilden, wird die gesamte Ausbruchsfläche differenziert betrachtet und in die baubetrieblich relevanten Teilquerschnitte Kalotte, Strosse und Sohle unterteilt [27, 53].

Die Wahl der Geräte wird je Lösemethodik (Spreng- oder Baggervortrieb) und in Abhängigkeit der geometrischen Platzverhältnisse sowie baubetrieblichen Überlegungen getroffen. Die detaillierte Evaluation des Geräteparks erfolgt differenziert nach den jeweiligen Tunnelquerschnitten und den einzelnen baubetrieblichen Arbeitsschritten. Für die großräumigen Querschnitte – den zweispurigen Straßentunnel sowie den zweigleisigen Bahntunnel – umfasst die Analyse im Zuge von Ausbruch und Versorgung einen 3-armigen Bohrwagen bzw. einen Tunnelbagger, ein Versorgungsfahrzeug für Hilfs- und Sprengmittel sowie die Luttenlüftung und die Tunnelbeleuchtung. Der darauffolgende Schutterprozess wird standardmäßig über Radlader und Muldenkipper abgebildet, während für die Hohlraumsicherung ein Spritzbetonmanipulator sowie Fahrmischer und der Bohrwagen für das

Ankern eingesetzt werden. Bei leicht lösbaren geologischen Verhältnissen kommt ein Tunnelbagger zum Einsatz. In der Errichtungsphase der Innenschale werden wiederum ein Steiger, ein Teleskoplader, eine Betonpumpe sowie die nötigen Fahrmischer berücksichtigt. Die verfahrenstechnische Ausstattung für die Innenschale wird darüber hinaus um die erforderlichen Großgeräte und Schalungssysteme ergänzt. Neben dem standardmäßig eingesetzten Gewölbeschalwagen umfasst dies – beschränkt auf Vortriebsabschnitte in leicht lösbarer Geologie – den Sohlschalwagen sowie die entsprechenden Bewehrungs- und Nachbehandlungswagen für die bewehrten Blocksegmente.

Bei den kleineren Querschnitten des einspurigen Straßentunnels, des eingleisigen Bahntunnels sowie bei begehbaren und befahrbaren Querschlägen bleibt die gerätetechnische Strukturierung der Arbeitsgänge Schuttern, Sichern und Innenschale im Grunde ident. Eine Anpassung der Maschinenkonfiguration erfolgt hier primär im Ausbruchs- und Versorgungszyklus durch die Skalierung auf einen kompakteren 2-armigen Bohrwagen bzw. den Einsatz eines Tunnelladebaggers. Somit wird der Schutterprozess dahingehend modifiziert, dass der Radlader entfällt.

Diese querschnitts- und verfahrensspezifische Gerätekonfiguration bildet die baubetriebliche Basis für die Abwicklung der einzelnen Vortriebszyklen. Um die daraus resultierenden Energie- und Stoffströme quantifizieren zu können, müssen die gerätetechnischen Ansätze mit realen geometrischen Vortriebsparametern gekoppelt werden. Die geometrische Dimensionierung der Abschlüge und der damit einhergehenden Öffnungslänge wird dabei maßgeblich von den vorherrschenden Gebirgsverhältnissen bestimmt, da die Geologie die zulässigen Ausbruchsvolumina und die Quantität der Stützmaßnahmen direkt vorgibt.

Die tunnelbautechnisch unterschiedlichen Abschlagslängen, Abwicklungen (Linie 1a) und Flächen der Teilquerschnitte (Linie 2) werden je o. g. geologischer Kategorie für den entsprechenden Tunnel (vgl. Abschnitt 3.2.3) durchschnittlich definiert und erstrecken sich bspw. für den zweispurigen bzw. zweigleisigen Tunnel im Bereich der Kalotte von 1,3 m bis 2,2 m (siehe Tab. 6-2). Die verschiedenen Querschnittsflächen ergeben sich aufgrund der zunehmenden Ausdehnung der Ausbruchslinie sowie der Abwicklung, welche auf tunnelbautechnische Anforderungen (bspw. Sohlgewölbe und dickere Spritzbetonaußenschale usw.) zurückzuführen sind. Bei den einspurigen bzw. eingleisigen Tunneln sowie den Querschlägen wird aufgrund der kleineren Ausbruchsfläche nur zwischen Kalotte + Strosse und Sohle unterschieden. Beim Baggervortrieb („leicht lösbar“) wird in der Quantifizierung aufgrund von geologischen Anforderungen von einem Sohlgewölbe [27] (tiefe Sohle) ausgegangen.

Arten der Verkehrstunnel	Geologie	Teilquerschnitt	Teilquerschnittsflächen [m²]	Abwicklung [m]	Abschlagslängen [m]
Straßentunnel zweispurig bzw. Bahntunnel zweigleisig	schwer lösbar	Kalotte	50	17	2,2
		Strosse	36	6	4,4
		Sohle	5	0	8,8
	mittel lösbar	Kalotte	54	18	1,7
		Strosse	37,5	6	3,4
		Sohle	18	12	4,4
	leicht lösbar	Kalotte	56	18	1,3
		Strosse	38	6	2,6
		tiefe Sohle	28	13	2,2
Straßentunnel einspurig bzw. Bahntunnel eingleisig	schwer lösbar	Kalotte und Strosse	62	20	3
		Sohle	3	0,5	7,7
	mittel lösbar	Kalotte und Strosse	65	20	2,3
		Sohle	12	9	4,4
	leicht lösbar	Kalotte und Strosse	67	20	1,7
		tiefe Sohle	17	10	3,3
befahrbare Querschläge	schwer lösbar	Kalotte und Strosse	38	16	2,2
		Sohle	1,5	1	6,6
	mittel lösbar	Kalotte und Strosse	39	16	1,7
		Sohle	6	6,5	4,4
	leicht lösbar	Kalotte und Strosse	41	16	1,3
		tiefe Sohle	6	6,5	4,4
begehbare Querschläge	schwer lösbar	Kalotte und Strosse	19	11	2,2
		Sohle	1,5	0	4,4
	mittel lösbar	Kalotte und Strosse	20	11	1,7
		Sohle	4	4,5	2,2
	leicht lösbar	Kalotte und Strosse	21	11,5	1,3
		tiefe Sohle	4	4,5	1

Tab. 6-2: Durchschnittliche Abschlagslängen, Abwicklungen und Querschnittsflächen

6.4.2 Herstellung (A1-A3)

Die Datensätze der Sachbilanz werden in Analogie zu den Lebenszyklusphasen in Anlehnung an die Bauprozessabfolge angeführt. So wird zuerst auf die Herstellung und die Materialien selbst näher eingegangen. Die Energie für den Einbau sowie Hilfsstoffe werden in Abschnitt 6.4.4 behandelt.

Bauprozess	Spezifikationen und Annahmen	Ressource und Quelle
Stützmaßnahmen	Bei den (im Tunnel verbleibenden) Stützmaßnahmen wird wesentlich zwischen Stahlprodukten und zementösen/ mineralischen Produkten unterschieden.	
Bewehrungsmatten	Der Massenansatz umfasst neben dem reinen Konstruktionsgewicht der Stahlmatten für den Spritzbeton auch den materialbedingten Mehrbedarf durch die Übergreifungslängen der Matten. Zudem sind Kleinkomponenten wie die benötigten Befestigungsmittel und der Bindedraht zur Fixierung der Mattenlagen in der Tonnage berücksichtigt.	Die Bewehrungsmatten des Spritzbetons werden über einen Mittelwert aus den Matten-EPDs von Riva Stahl und Pittini [111, 112] miteinbezogen.
Stahlbögen	Die Modellierung der Gitterträger bildet den Umfang der Linie 1a ab. Hierbei fließen die konstruktiven Übergriffe an den Stoßstellen sowie sämtliche einzelnen Gitterträgerteile für die Zusammensetzung zum vollständigen Tragquerschnitt in die Berechnung ein. Nicht berücksichtigt werden konstruktive Kleinteile und Montagehilfen, deren massenbezogener Einfluss auf das Gesamtergebnis als vernachlässigbar eingestuft wird (z. B. Muttern und Verbindungsschrauben sowie die Fußplatten der Stahlbögen).	Die Stahlbögen werden über einen Mittelwert aus den Betonstahl-EPDs von der Marienhütte und Pittini [113, 114] in die Ökobilanz mit einbezogen.
Spritzbeton	Für die Spritzbetonsicherung wird der reale baubetriebliche Mehrverbrauch anstelle der theoretischen Mindestdicke angesetzt. Daher fließen sowohl das geologisch bedingte Überprofil als auch der verfahrenstypische Rückprall in die Mengenermittlung ein. Stofflich wird die Zusammensetzung detailliert aufgeteilt, sodass das erforderliche Wasser und die Zusatzmittel als separate Positionen ausgewiesen werden (siehe Tab. 6-6).	Die Ökobilanzdaten zum Spritzbeton werden aus einer Studie zu österreichischen Frischbetonen [59] entnommen (SpC25/30(56)/ÜK3/J2/XC4/G K8/XA1/RV0,70).
Anker	Für die Bilanzierung der Anker und der zugehörigen Injektionen wird ebenfalls der reale, baubetriebliche Materialeinsatz zugrunde gelegt. Der Massenansatz der Ankerelemente berücksichtigt dabei neben den geplanten Ankerlängen auch die	Die Modellierung der verschiedenen Ankertypen basiert auf produktspezifischen Herstellerdaten, wobei für die Rohrreibungsanker ein Mittelwert aus Sandvik-

	verfahrensbedingten Überstände sowie je nach Datensatz das konstruktive Zubehör wie bspw. Ankerkopfplatten etc. Zudem werden die verschiedenen Ankertypen (wie Mörtel-, Selbstbohr- oder Rohrreibungsanker) stofflich differenziert erfasst, um sowohl das Ankermaterial als auch das spezifische Injektionsgut (z. B. Ankermörtel oder Zementinjektionen) als separate Positionen in der Sachbilanz abzubilden. Berücksichtigt werden dabei zudem der spezifische Injektionsverbrauch sowie die Injektionsleistung der Pumpen. Beim Arbeitsschritt des Bohrens variieren die Prozesszeiten für das Ausblasen des Bohrlochs, das Versetzen der Ankerstangen und das Umsetzen des Bohrgeräts maßgeblich je nach Ankertyp.	Produkten [115, 116] gebildet, die Mörtelanker über eine EPD von DSI Underground Austria [117] abgebildet und die Selbstbohranker als Mittelwert der Deklarationen von Pretec Norge und Minova [118, 119] erfasst werden. Die Modellierung des Injektionsmaterials basiert auf einer Zusammensetzung aus Zement, (Leitungs-)Wasser und Luftporenbildner [104, 120, 121], während für den Ankermörtel ein Mittelwert vom Hersteller Mapei [122, 123] herangezogen wird.
Spieße	Analog zu den Ankern wird der reale, baubetriebliche Materialeinsatz zugrunde gelegt.	Die Spieße werden in der Ökobilanzanalyse durch Stahl als Basismaterial bzw. spezielle EPDs und zusätzlich die jeweiligen Injektionen analog zur Modellierung der Anker abgebildet. Für die Spieße wurde ein gemeinsamer Mittelwert aus den Spezifikationen von Pretec Norge [124, 125] und klassischen Bewehrungsstäben gebildet, da die Spieße bautechnisch als Vollspieße ausgeführt sind.
Entwässerungsarbeiten	Die Modellierung der Entwässerungsmaßnahmen beinhaltet lediglich die Ulmendrainage.	
Ulmendrainage	Die Datengrundlage für die beidseitige Ulmendrainage setzt sich aus dem Teilsickerrohr, einer Betonummantelung und einem Einkornbeton zusammen.	Für die verwendeten Datensätze der Ulmendrainage werden spezifische Rohrdaten [126] herangezogen, während die Betonummantelung sowie der Einkornbeton über die o. g. Betonstudie [59] abgedeckt werden.

Abdichtungsarbeiten	Die Modellierung der Abdichtungsarbeiten beinhaltet den Abdichtungsträger, die Schutzschicht als Geotextil und die Kunststoffdichtungsbahn.	
Abdichtungsträger	In Analogie zum Spritzbeton werden der gesamte baubetriebliche Verbrauch sowie die aufgeteilte Betonzusammensetzung berücksichtigt, wobei hierbei die Linie 1b die Menge quantifiziert.	Hierfür wird ebenfalls die Betonstudie [59] herangezogen.
Schutzschicht	Da für das Schutz- und Filtervlies oftmals ausschlaggebende Minstdichten (z. B. mindestens 1 kg/m ²) vorgeschrieben sind, wird die Position des Geotextils im Berechnungsmodell durch die Linie 1b und über einen mehrlagigen Aufbau realisiert.	Der Datensatz basiert auf Produktspezifikationen des Herstellers Naue [127].
KDB	Für den Massenansatz der KDB wird die Abrechnungslinie 1b zugrunde gelegt und um einen Zuschlag ergänzt, welcher sich aus der Rondellenbefestigung und dem Übergangsbereich der Blockfugen ergibt.	Der Datensatz basiert ebenfalls auf Produktspezifikationen des Herstellers Naue [128].
Betonarbeiten	Die Betonarbeiten der Innenschale stellen aufgrund ihrer enormen Massenanteile die quantitativ dominanteste Position der Sachbilanz dar und umfassen verschiedene Bestandteile wie die Widerlager, den Gewölbebeton, den Sohl(gewölbe)beton sowie den Mehrbeton zum Ausgleich von Überprofilen.	
Auffüllen Überprofil Sohle	Zur Vorbereitung des Sohlbetons oder Sohlgewölbes ist nach dem Ausbruch ein Ausgleich des Überprofils erforderlich. Dieser Materialmehrverbrauch wird im Modell über die Abwicklung der Sohle entlang der Linie 1b quantifiziert und ist dadurch mit der Geologie und der Querschnittsgröße gekoppelt.	Die ökologische Modellierung des Profilausgleichs im Sohlbereich stützt sich – so wie alle weiteren Betonbauteile der Innenschale – auf die Ergebnisse der internen Betonstudie [59], wobei dafür die Betonsorte C25/30/B7 verwendet wird.
Sohlplatte/ Sohlgewölbe	Die mengenmäßige Erfassung von Sohlplatte bzw. Sohlgewölbe basiert auf der repräsentativen Querschnittsfläche pro Laufmeter, welche je nach Geologie stark variiert. Zweiteres kommt, wie bereits erwähnt, nur bei schlechter Geologie zum Einsatz. Trotz der in der Praxis teilweise angewandten Abweichung hin zu Doppelblock-Betonagen wird für die Modellierung ein Betonierabschnitt von 12 Metern definiert.	Der jeweilige Beton für die Sohlplatte bzw. das Sohlgewölbe wird durch die Betonsorte IS/C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L abgebildet [59].

Widerlager	Die Massenberechnung wird über die repräsentative Widerlagerhöhe und die jeweiligen Querschnittsflächen pro Laufmeter mit der übergeordneten Tunnelart gekoppelt. Für die logistische und baubetriebliche Taktung wird die Blocklänge ebenfalls auf 12 m festgelegt, was in etwa den Erfahrungswerten vergleichbarer Projekte entspricht.	Die ökobilanzielle Ermittlung des Widerlagers basiert ebenfalls auf der Betonstudie [59]. Der modellierte Innenschalenbeton wird wieder über die Betonsorte IS/C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L abgebildet.
Mehrbeton Kalotte und Strosse	Der Mehrbeton für das Gewölbe (Kalotte und Strosse) wird ebenfalls über die Abwicklung der Linie 1b ermittelt, wobei die Ausprägung des Überprofils je nach geologischer Randbedingung und der jeweiligen Lösemethode – Sprengvortrieb oder lösen mittels Bagger – variiert.	Der Mehrbeton wird durch den Datensatz für die Betonsorte IG/C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L abgebildet [59].
Gewölbebeton	Die Dimensionierung des Gewölbebetons hängt maßgeblich von den statischen Erfordernissen ab, welche wesentlich durch den jeweiligen Tunnelquerschnitt und die vorherrschenden geologischen Verhältnisse determiniert werden. Da die Tunnelstatik sehr projektspezifisch und in frühen Projektphasen schwer abzuschätzen ist, werden Bandbreiten herangezogen. Die Stärken reichen bspw. von einer Mindeststärke von 15 cm bei günstigen geologischen Verhältnissen im Querschlag bis hin zu über 40 cm bei großen Querschnitten mit ungünstiger Geologie. Ergänzend werden in der Sachbilanz auch die Nacharbeiten im Firstbereich über entsprechende baubetriebliche Ansätze für die Firstinjektion (Zementsuspension) und den Reprofiliermörtel berücksichtigt.	Die ökologische Bilanzierung des Gewölbebetons stützt sich auf die spezifische Betonsorte IG/C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L [59], während die Firstinjektion über spezifische Datensätze für die zementgebundene Injektion [120] und die Nacharbeiten über einen Reprofiliermörtel [129] abgebildet werden.
Betonstahl	Die quantitative Erfassung des Bewehrungsstahls ist mit der ermittelten Betonmenge und den geologischen Rahmenbedingungen verknüpft, wobei ein statisch relevanter Bewehrungseinbau nur bei ungünstigen Gebirgsverhältnissen – also leicht lösbar und somit nur beim Baggervortrieb – berücksichtigt wird. Da	Analog zur Vorgehensweise bei den Stützmaßnahmen wird auch für den Bewehrungsstahl der Innenschale – Matten- und Stabstahl sowie die dazugehörigen Tragbogen – ein Durchschnittswert gebildet, welcher auf den Datensätzen

	die exakten statischen Anforderungen im Vorfeld schwer abzuschätzen sind, werden für die freie Strecke repräsentative Bewehrungsgrade von etwa 120 kg/m³ für das Gewölbe und das Widerlager sowie 150 kg/m³ für das statisch stärker beanspruchte Sohlgewölbe angenommen. Die Verteilung dieser Bewehrungsmengen wird im Berechnungsmodell mit einem Anteil von 80 % Mattenstahl und 20 % Stabstahl abgebildet. Baubetrieblich notwendige Tragbogen der Bewehrung werden über prozentuelle Aufschläge der respektiven Mengen berücksichtigt.	spezifischer Umweltprodukt-deklarationen marktgängiger Hersteller basiert [111–114].
--	---	---

Tab. 6-3: Sachbilanz Herstellungsphase A1-A3

6.4.3 Transport

Für den Transport der Baugeräte an bzw. von der Baustelle, den Einbau der Baumaterialien, aber auch für den vorübergehenden Einbau der Hilfsmaterialien sowie der anschließenden Entsorgung dieser, müssen die Güter erst an die gewünschte Einbaustelle transportiert werden. Dieser Umstand erfordert eine komplexe Logistikkette, welche durch eine hohe Intensität an Transportvorgängen und eine Vielzahl an zusammenhängenden Transporten gekennzeichnet ist. Je nach Material umfasst dieser Prozess die gesamte Spanne von der Beschaffung der Vorprodukte über die Fertigung beim Hersteller bis hin zur finalen Distribution. Diese logistischen Abläufe sind speziell im Tunnelbau essenziell für die Steuerung des Materialflusses und bilden somit das logistische Rückgrat der Herstellung. [130]

In der Ökobilanz müssen die dadurch auftretenden Emissionen und Energieverbräuche in der Transportphase jedenfalls adäquat berücksichtigt werden. Aufgrund der Komplexität der Güterlogistik fließt der Transport über repräsentative Distanzen je Materialgruppe in die Analyse mit ein. Da Tunnelbaustellen sehr projektspezifisch sind und diese oftmals örtlich abgelegen ohne direkten Gleisanschluss liegen bzw. dafür sogar teilweise eigene Baustraßen gebaut werden müssen, werden die Transportstrecken aus Gründen der Flexibilität straßengebunden mittels Diesel-Lkw modelliert. Dazu erfolgt eine nuancierte Betrachtung der Transportdistanzen für den Lieferweg vom Hersteller der Baumaterialien (A4) sowie der Hilfsmaterialien zum Einbauort (A5), der Transport der Baugeräte (A5) und die dazugehörige Wegstrecke von der Baustelle zur Abfallbehandlung (C2 vom Material). Letzteres ist wie des Öfteren erwähnt zutreffend, sofern Ausbruchsmaterial, Hilfsstoffe (z. B. Ortsbruststützung mittels Spritzbeton oder Anker) oder Materialverluste bzw. Verschleißteile (z. B. Spritzbetonrückprall bzw. verschlissene Bohrkronen oder Baggerzähne) entsorgt werden. Zwar werden der An- und Abtransport der Baugeräte, der Transportprozess der Hilfsmaterialien sowie die Entsorgung dieser und des Ausbruchsmaterials lt. der ÖNORM EN 17472 [30]

sinngemäß der Errichtungsphase (A5) des gesamten Bauwerks zugeordnet. Allerdings werden die jeweiligen Transportaspekte aufgrund der notwendigen Herleitung der Transportdistanzen in diesem Kapitel angeführt. Eine detaillierte Beschreibung der Prozesse über den Transport hinaus erfolgt im folgenden Kapitel 6.4.4. [53]

Bei der Ermittlung der durchschnittlichen Transportdistanzen wurde im ersten Schritt das Transportaufkommen der beförderten Güter nach den übergeordneten Güterabteilungen gemäß dem europäischen Güterverzeichnis NST-2007⁵ in Abhängigkeit der Verkehrsträger in Österreich statistisch ausgewertet [132]. Die für die Analyse relevanten NST-Codes der Güter sind in Tab. 6-4 ersichtlich. Dabei ist die explizite Zuordnung zu der jeweiligen Güterklasse nicht immer eindeutig, jedoch bietet ein Blick auf die veraltete NST/R-Klassifikation diversifiziertere Untergruppen und diese lassen sich somit in die neueren Klassen übertragen – so zählt bspw. Sprengstoff zu den „parachemischen Erzeugnissen“ und Baugeräte zu den „sonstigen Maschinen“ [131]. Die Fokussierung auf den straßengebundenen Verkehr zeigt, dass etwa 90 % bei der Güterklasse 03, 70 % bei der Güterklasse 08, 98 % bei der Güterklasse 09, 75 % bei der Güterklasse 10, 60 % bei der Güterklasse 11 und 87 % bei der Güterklasse 14 durch inländische und ausländische Straßenfahrzeuge addiert transportiert werden [132]. Diese prozentuelle Verteilung bestätigt die Modellierung durch den Lkw-Verkehr.

NST-2007 Code	Element	Elementbeispiel für Analyse
03	Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	
03.5	Natursteine, Sand, Kies, Ton, Torf, Steine und Erden a.n.g.; sonstige Bergbauerzeugnisse	Ausbruchsmaterial, Drainagekies
06	Holzwaren	
06.1	Holz-, Kork- und Flechtwaren (ohne Möbel)	Kantholz, Schaltafeln
08	Chemische Erzeugnisse und Chemiefasern; Gummi- und Kunststoffwaren	
08.5	Pharmazeutische und parachemische Erzeugnisse	Sprengstoff, Schalöl, Zusatzmittel
08.6	Gummi- oder Kunststoffwaren	Abdichtungsbahn, Geotextil, Drainagerohr, Zünder,
09	Sonstige Mineralerzeugnisse	
09.2	Zement, Kalk, gebrannter Gips	Zement für Injektionen
09.3	Sonstige Baumaterialien und -erzeugnisse	Mörtel für Injektionen, (Spritz-) Beton
10	Metalle und Halbzeug daraus; Metallerzeugnisse, ohne Maschinen und Geräte	
10.1	Roheisen und Stahl; Ferrolegerungen und Erzeugnisse der ersten Bearbeitung von Eisen und Stahl (ohne Rohre)	Bewehrungsmatten, Bögen, Anker, Spieße, Nägel, Kleineisen
11	Maschinen und Ausrüstungen	
11.8	Sonstige Maschinen, Werkzeugmaschinen und Teile dafür	Baugeräte
14	Sekundärrohstoffe; kommunale Abfälle und sonstige Abfälle	
14.2	Sonstige Abfälle und Sekundärrohstoffe	Spritzbetonrückprall, Anker und sonstige Bauabfälle

Tab. 6-4: Klassifizierung der Elemente nach NST Codes [133]

⁵ NST-2007 (*Nomenclature de marchandises pour les statistiques des transports*) ist ein einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik in der EU, welches seit 2008 zur Klassifizierung beförderter Güter verwendet wird. Es ersetzt die vorangegangene NST/R-Klassifikation und ordnet Waren basierend auf dem verursachenden Wirtschaftszweig zu. [131].

Anschließend konnte auf Basis des Transportaufkommens nach den Entfernungsstufen für österreichische Güterkraftfahrzeuge die durchschnittlich gefahrene Transportentfernung für inländische Transporte zu 75,25 km bzw. für ausländische Transporte 414,5 km berechnet werden [132]. Die zementösen bzw. mineralischen Produkte Beton, Mörtel etc. – respektive der Code 09 – wird in Österreich durchschnittlich etwa 20 km transportiert [59]. Darüber hinaus wird entsprechend gängiger Annahmen für Ökobilanzen von einer Distanz von 25 km für den Transport zur Wiederaufbereitung bzw. Entsorgung/ Deponierung (C2) ausgegangen (bspw. für die Entsorgung vom Spritzbetonrückprall oder die Deponierung des Ausbruchsmaterials). Der An- und Abtransport für die benötigten Baugeräte, also Güterklasse 11, beinhaltet sowohl neue als auch alte Geräte und ist mit den 317 km konservativ quantifiziert, da die wenigsten Baugeräte für ein Bauprojekt komplett neu angeschafft werden, sondern i. d. R. vom nächsten Bauhof antransportiert werden.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und Annahmen ergeben sich folgend die berücksichtigten Transportdistanzen (gerundet auf ganze Zahlen):

NST-2007 Code	Transportdistanz in km
03	87
06	236
08	280
09	20
10	226
11	317
14	25

Tab. 6-5: Transportdistanzen der Güterklassen für die Transportphase A4

Um aus den zuvor berechneten Transportdistanzen die Umweltwirkungen zu bestimmen, wurde die Tonnage der jeweiligen Materialien mit einem Diesel-Lkw Euro-6 >32t-Datensatz [134], welcher in Tonnenkilometern (tkm) angegeben ist, multipliziert.

Alle Transporte, welche über den eigentlichen Herstellungsprozess sowie den dazugehörigen Transportprozess hinausgehen und den Vorprodukten/ Betriebsstoffen (z. B. Schmierstoffe für die Baugeräte) zuzuordnen sind, werden über entsprechende „market-Datensätze“ aus der ecoinvent-Datenbank (v3.10) [104] bereits berücksichtigt und nicht gesondert betrachtet.

6.4.4 Errichtungsphase (A5)

Die Datensätze der Sachbilanz werden ebenfalls in Analogie zu den Lebenszyklusphasen in Anlehnung an die Bauprozessabfolge angeführt, wobei in der Phase alle Bestandteile behandelt werden, welche nicht Teil des verbleibenden Materials (A1-A3) sowie des zugehörigen Transports (A4) sind. Bevor die Sachbilanz in tabellarischer Form zusammengefasst wird, werden nachfolgend die zugrunde liegenden Berechnungslogiken und Parameter insbesondere

der gerätebedingte Diesel- und Stromverbrauch, der An- und Abtransport der Maschinen sowie die *End-of-Life*-Szenarien mit Fokus auf die deponieseitige Modellierung detailliert erläutert.

Die prozessgebundenen Energie- und Stoffströme der Haupt- und Hilfsgeräte werden aus den kalkulatorischen Leistungs- und Verbrauchsansätzen (l/m^3 oder l/h bzw. kWh/h oder kWh/m^3) abgeleitet und direkt auf das funktionelle Bezugsmaß umgelegt. Für die treibstoffbasierten Prozesse wird der durchschnittliche Verbrauch von Baumaschinen – dabei werden verschiedene Gerätetypen wie Raupenbagger, Mobilbagger, Radlader, Muldenkipper etc. berücksichtigt – über den spezifischen Heizwert von $9,8 \text{ kWh/l}$ in die thermische Verbrennungsenergie (in kWh) konvertiert. Dies ermöglicht eine Verknüpfung mit den entsprechenden ökologischen Daten für die Treibstoffverbrennung in den Baumaschinen [135]. Der Schmierstoffbedarf wird analog über eine angenommene Dichte von $0,9 \text{ kg/l}$ sowie einen prozentuellen Anteil des Dieseltreibstoffs in die Masseneinheit überführt und wie bereits erwähnt mit einem generischen ecoinvent-Datensatz gekoppelt. Hingegen wird der elektrische Strombedarf der Maschinen und der Geräte für den Bau sowie die Versorgung direkt als elektrische Energie (in kWh) unter Anrechnung der Umweltwirkungen eines in Österreich typischen (Baustellen-)Strommixes bilanziert [135].

Der An- und Abtransport der Baugeräte wird als eigenständige logistische Position erfasst, da es sich um Leistungsgeräte handelt, deren Zuordnung direkt über die baubetriebliche Kalkulation erfolgt. Die zu transportierende Gesamttonnage wird hierbei in Abhängigkeit von der jeweiligen Geologie und dem gewählten Tunnelquerschnitt variabel definiert (z. B. kein Tunnelladebagger beim Sprengvortrieb). Für die ökobilanzielle Bewertung der Transportaufwendungen wird die im vorhergehenden Abschnitt 6.4.3 hergeleitete, durchschnittliche Transportdistanz der Maschinen von 317 km als Berechnungsgrundlage herangezogen.

Für die *End-of-Life*-Szenarien wie Recycling bzw. Deponierung der Hilfsmaterialien (z. B. Spritzbetonrückprall und Stahlverschleiß) werden größtenteils die prozentuellen Verteilungen des ÖBV-Merkblatts [136], welche im Einklang mit dem Bundes-Abfallwirtschaftsplan (2023) stehen, herangezogen und die Umweltwirkungen über entsprechende ecoinvent-Datensätze [104] berücksichtigt [53]. Dabei wird der Großteil der jeweiligen Materialien stofflich verwertet (z. B. 99% bei Beton und Baustahl) und nur ein kleiner Anteil deponiert. Beim Holz – etwa für Kanthölzer, Schaltafeln und Abschalungen usw. – wird angenommen, dass es zu 100% verbrannt wird. Die Umweltwirkungen der thermischen Verwertung werden über die Addition der Module A1-A3 und C3 abgebildet.

Da die Weiter- bzw. Wiederverwertung in frühen Planungsphasen schwer abschätzbar ist, wird die Verwertung des Ausbruchsmaterials, wie bereits erwähnt, explizit ausgeklammert. Für diese ökobilanzielle Betrachtung wird somit das gesamte Ausbruchsmaterial deponiert.

Die mathematische Ermittlung des deponierelevanten Volumens basiert auf dem theoretischen Festmaß, welches sich aus dem Produkt der Ausbruchslinie und der Vortriebslänge ergibt. Zur Berücksichtigung baubetrieblicher und geotechnischer Kennwerte sowie verfahrensbedingter Mehrausbrüche wird ein Zuschlagsfaktor für das Überprofil implementiert. Die in Österreich vorwiegend auftretende Geologie bestehend aus Zentralalpen, Schieferzone, (nördliche und südliche) Kalkalpen, Sandsteinzone, Becken- und Talzonen für Lockergesteine usw. wird den zuvor definierten geologischen Kategorien zugeordnet [137]. Weiters wird eine durchschnittliche Dichte je Kategorie anhand von Literaturwerten gewählt [138], um so die zu deponierende Ausbruchsmasse zu modellieren. Die Transformation des Festmaßes in das lose Schüttvolumen erfolgt über einen Lösefaktor von etwa 0,6 welcher sich mit Erfahrungswerten sowie der Fachliteratur deckt, in der für gelösten Fels standardmäßig Bandbreiten zwischen 0,55 und 0,67 ausgewiesen werden [139]. Der Berechnung der Transportemissionen wird schließlich die bereits hergeleitete Deponiedistanz von 25 km zugrunde gelegt, welche mittels generischem ecoinvent-Datensatz [104] für den Deponieprozess selbst kombiniert wird. Dieser Datensatz enthält bereits die notwendigen Energieaufwendungen für Manipulation usw. Neben dem bereits erwähnten ÖBV-Merkblatt, welches die rechtlichen Vorgaben des Bundes-Abfallwirtschaftsplans praxistauglich übersetzt, bietet die weitere Literatur Empfehlungen oder auch wissenschaftliche Vorarbeiten zur Verwertung von Tunnelausbruchmaterial, welche für eine in späteren Projektphasen ökobilanzielle Modellierung dienen könnten [61, 140].

Bauprozess	Spezifikationen und Annahmen	Ressource und Quelle
Ausbrucharbeiten	Im Gegensatz zu den permanenten Tragelementen hinterlassen die reinen Ausbrucharbeiten keine materiellen Bestandteile im fertigen Bauwerk, sondern dienen ausschließlich der Schaffung des untertägigen Hohlraums, weshalb die Bestandteile über die prozessspezifischen Verbrauchsgüter und Energieströme in der Phase A5 abgebildet werden.	
Vortrieb	Beim Sprengvortrieb umfasst diese energetische und stoffliche Bilanzierung den Sprengstoff- und Zündermitteleinsatz, den gerätebedingten Diesel- und Schmierstoffbedarf, den elektrischen Strom sowie den Stahlverschleiß und den Wasserbedarf beim Bohren der Sprenglöcher. Demgegenüber reduziert sich die Sachbilanz beim Baggervortrieb verfahrensbedingt auf die Positionen Diesel, Schmieröl, Strom und Verschleiß der Grabwerkzeuge, wobei ein Mehrverbrauch für das Lösen berücksichtigt wird. Der Tunnelladebagger (kleine Querschnitte) wird im	Die ökobilanzielle Verknüpfung der Ausbruchprozesse erfolgt über eine Kombination aus herstellerspezifischen, internen und generischen Datensätzen. Im Sprengvortrieb wird das Bohren über eine EPD für Bohrkronen [141] und der Wasserbedarf über den generischen ecoinvent-Datensatz [104] modelliert. Der Verschleiß beim Baggervortrieb wird prozentuell über die generische Stahlentsorgung aus der ecoinvent-Datenbank

	Berechnungsmodell als bivalentes Gerät geführt und somit wird für das Umsetzen und Manövrieren der Dieserverbrauch herangezogen. Der eigentliche Löse und Ladevorgang erfolgt über einen Elektromotor. Der Schutterprozess wird über den Diesel- und Schmierstoffverbrauch der Gerätekette abgebildet. Die Versorgung wird durch die Bewetterung und die Tunnelbeleuchtung über den laufenden Strombedarf quantifiziert. Wobei zweiteilung längenabhängig skaliert wird. Die Ermittlung der Ausbrucharbeiten erfolgt spezifisch pro Kubikmeter (m³) Ausbruchsvolumen und wird in Abhängigkeit von der Geometrie und Geologie differenziert nach den Teilquerschnitten Kalotte, Strosse und Sohle bzw. tiefe Sohle aufgeteilt. Das zugrunde gelegte Berechnungsmodell integriert dabei baubetriebliche Annahmen zu Rüstzeiten, Bohrlochzahl, reine Bohrzeiten, Überbohrtiefe, Löseleistung Bagger, Ausnutzungsgrade der Geräte, sowie Zykluszeiten etc. Für den anschließenden Abtransport des Ausbruchmaterials werden spezifische Parameter wie der von der jeweiligen Geologie abhängige Auflockerungsfaktor, die Ladeleistung und Anzahl der Schuttergeräte berücksichtigt.	abgebildet⁶. Die Betriebsstoffe Wasser und Schmieröl werden ebenfalls über generische Daten abgebildet. Diesel und Strom für Maschinen sowie Geräte werden aus der o. g. Studie [135] bezogen. Die Sprengstoffe und Zündmittel werden über (österreichische) Produktdatensätze erfasst [142, 143], wobei die Emissionen aus der Explosion den Phasen A5-1 und A5-2 zugewiesen sind.
Stützmaßnahmen	Beim Prozess des Stützmitteleinbaus werden die verfahrensspezifischen Hilfsstoffe sowie die gerätetechnischen Aufwendungen über kalkulatorische Ansätze analog zu den Baumaterialien aus A1-A3 im Berechnungsmodell berücksichtigt.	
Bewehrungsmatten Stahlbögen	Neben den eigentlichen Materialien in A1 bis A3 äußert sich die Sachbilanzierung in A5 am Beispiel des Spritzbetonauftrags	Der energetische Aufwand (Diesel, Strom) sowie die Versorgung während des

⁶ Für den stofflich verwertbaren Anteil des Stahlverschleißes werden im Rahmen des angewendeten Cut-off-Ansatzes gemäß ÖNORM EN 15804 [99] keine direkten Aufwendungen für das thermische Recycling im Systemraum bilanziert. Das Ende der Abfalleigenschaft wird mit der Übergabe des Stahlschrotts an den Verwertungsbetrieb definiert [104]. Folglich werden die energetischen Lasten des Umschmelzprozesses vollumfänglich dem nachfolgenden Produktlebenszyklus zugewiesen. Diese Verwertung gilt ebenfalls für mineralische Bauabfälle wie Spritzbetonrückprall etc. und wird somit auch dem Folgeprodukt zugeordnet.

Spritzbeton Anker	durch die Koppelung der theoretischen Menge mit verfahrensbedingten Verlusten (Rückprall) und energetischen Positionen. Die energetische Komponente erfasst neben der reinen Spritzleistung des Spritzbetonmanipulators auch die betrieblichen Stehzeiten der Fahrmischer sowie den stofflichen Bedarf an Wasser und Erstarrungsbeschleuniger für den Spritzbeton. Bei den Ankern wird der Verschleiß der Bohrkronen in Abhängigkeit der angetroffenen Geologie modelliert. Positionen wie beispielsweise Ortsbrustanker fallen, wie einleitend bereits erwähnt, hier vollumfänglich in die Phase A5. Die logistische Erfassung der Schuttergeräte, welche für den Abtransport und das Laden des anfallenden Rückprallmaterials erforderlich sind, komplettiert die betrachteten Prozesse.	Stützmitteleinbaus werden analog zu den Kennwerten der Ausbruchphase bilanziert [135]. Der Erstarrungsbeschleuniger wird über eine EPD abgedeckt [144]. Gleich wie bei der Stahldeponie, wird der Spritzbetonrückprall über den Deponiepfad für Inertabfälle abgewickelt und der anfallende Stahlverlust der Ortsbrustanker sowie die Bewehrung des Ortsbrustspritzbetons fließt über den Deponieprozess für Stahlschrott in die Sachbilanz ein [104].
Entwässerungs- arbeiten	Die gesamte Ulmendrainage wird über die Phasen A1-A3 abgedeckt, da angenommen wird, dass die notwendigen Manipulations- und Einbauarbeiten als Nebenarbeiten zu anderen Positionen durchgeführt werden	
Ulmendrainage	-	-
Abdichtungs- arbeiten	Die Sachbilanzierung der Abdichtungsarbeiten in der Errichtungsphase erfasst alle prozessualen Hilfsstoffe und Geräteaufwendungen analog zur Herstellungsphase.	
Abdichtungsträger	Die Bilanzierung des Abdichtungsträgers erfolgt deckungsgleich zum Prozess des Spritzbetons.	Dies umfasst den geräteseitigen Aufwand (Diesel, Schmieröl und Strom) und die materiellen Bestandteile des Spritzbetons (Wasser, Beschleuniger) ebenso wie die Entsorgung des anfallenden Rückprallmaterials als Inertabfall.
Schutzschicht	Bei der Installation des Geotextils werden die verfahrensbedingten Hilfsprozesse spezifisch bilanziert. Dies umfasst einerseits den treibstoffbasierten Aufwand (Diesel und Schmieröl) des Hebegeräts für die Materialmanipulation und den Einbau im Firstbereich sowie andererseits den elektrischen Strombedarf für die	Die Energieaufwände (Diesel, Schmieröl und Strom) werden in Analogie zu den vorherigen Prozessen berücksichtigt.

	Tunnelbeleuchtung während des Arbeitsvorgangs.	
KDB	Die Installation der KDB wird analog zum Geotextil modelliert. Der geräteseitige Strombezug der eingesetzten Heißluft-Schweißautomaten für die thermische Verschweißung der Kunststoffbahnen wird dabei über den Grundlaststrom der Tunnelbeleuchtung miterfasst.	Die Energieaufwände (Diesel, Schmieröl und Strom) werden in Analogie zu den vorherigen Arbeitsschritten berücksichtigt.
Betonarbeiten	Die Sachbilanzierung der Betonarbeiten in der Errichtungsphase erfasst alle prozessualen Hilfsstoffe und Geräteaufwendungen analog zur Herstellungsphase.	
Auffüllen Überprofil Sohle	Das Berechnungsmodell erfolgt ebenfalls auf Basis der Abwicklungslinie 1b in Abhängigkeit von der angetroffenen Geologie. Die Energieaufwendungen für den Einbauprozess (Rüttler etc.) und die Tunnelbeleuchtung werden in Analogie zum Materialvolumen ermittelt.	Die Energieaufwände werden in Analogie zu den vorherigen (Strom-)Positionen ökobilanziell berücksichtigt.
Sohlplatte/ Sohlgewölbe	Die Sachbilanzierung des Sohlgewölbes bzw. der Sohlplatte erfolgt linearisiert auf Basis der Tunnel-Laufmeter sowie der geologischen Verhältnisse und wird in enger Analogie zu der Herstellungsphase berechnet. Die Stirnabschalungen und temporären Randschalungen werden über ein hölzernes System aus Kanthölzern, Schaltafeln sowie Kleineisen (inkl. Nägeln) und Schalöl modelliert. Um eine Überbilanzierung zu vermeiden, fließen materialspezifische Einsatzzyklen (z. B. zehnmalige Wiederverwendung der Kanthölzer vor der Entsorgung) direkt in die Mengenermittlung ein. Die Position des Betoneinbaus wiederum enthält die verfahrenstechnische Prozessenergie. Dies umfasst einerseits den elektrischen Strombedarf für das Einbringen und Verdichten des Betons sowie andererseits den diesel- und schmierstoffbasierten Aufwand des Hebegeräts (Teleskoplader) für das Manipulieren und Umsetzen der Schalungselemente. Wird ein Sohlgewölbe	Für eine hohe ökobilanzielle Datenqualität werden für die Schalungsmaterialien vorrangig österreichische Datensätze und verifizierte EPDs allokiert. Der Holzbedarf der Abschalungen wird differenziert über Binderholz-Massivholzplatten für Schaltafeln [145] und Egger-Schnittholz für Kanthölzer [146] modelliert. Da für die spezielle Melaminharz-Beschichtung der Schaltafeln keine Ökodaten vorliegen, wird dieser Stoffstrom gemäß den Relevanzkriterien vernachlässigt. Die metallischen Verbindungsmittel der Schalung (Nägel, Kleineisen) sowie das Schalöl als Trennmittel fließen über produktspezifische EPD-Datensätze in das LCA-Modell ein [147, 148]. Konsistent zu den vorigen Positionen werden

	ausgeführt, kommt zudem ein Sohlschalwagen zum Einsatz, welcher Gegenstand einer eigenständigen, nachfolgenden Betrachtung ist.	die energetischen Verbräuche der Bau- und Hebegeräte erfasst.
Widerlager	Der erforderliche Schalungsaufwand der Widerlager wird differenziert über ein hybrides System abgebildet. Für die wiederverwendbare Stahlschalung wird überschlägig eine Masse von 500 kg Stahlblech angesetzt. Alle weiteren Komponenten bezüglich Schalung, Material und Einbau werden hierbei in vollständiger Analogie zur Sohlplatte bzw. zum Sohlgewölbe modelliert.	Für die wiederverwendbare Stahlschalung wird – um erneut den österreichischen Kontext abzubilden – diese Position über den spezifischen EPD-Datensatz für Grobbleche der voestalpine hinterlegt [149]. Die Verwertung davon orientiert sich in Anlehnung an die bereits erwähnte Vorgangsweise für den Baustahl. Weitere Schalungs- und Einbaukomponenten werden deckungsgleich zur Struktur der Sohlplatte bzw. des Sohlgewölbes übernommen.
Mehrbeton Kalotte und Strosse	Der Mehrbeton für das Überprofil in Kalotte und Strosse wird im Berechnungsmodell analog zu jenem der Sohle geführt. Die kalkulatorischen Ansätze für das Materialvolumen und die zugehörige Prozessenergie (elektrischer Strom für Betonpumpe, Rüttler und Beleuchtung) differenzieren jedoch strikt nach der Vortriebsart, um den systembedingten Unterschieden zwischen Bagger- und Sprengvortrieb ökobilanziell Rechnung zu tragen.	Die Energieaufwände werden in Analogie zu den vorherigen (Strom-)Positionen ökobilanziell berücksichtigt.
Gewölbebeton	Das Berechnungsmodell für den Gewölbebeton differenziert zwischen den Haupt-, Neben- und Nacharbeitsprozessen. Die Komponente der Betonage allokiert den elektrischen Prozessstrom für die Schalungsrüttler, die Betonpumpe und die Ausleuchtung des Blockbereichs. Das Schalungsmodell der Blockfugen (Stirnabschalung) stützt sich stofflich auf Kanthölzer und Kleineisen sowie Nägel, während der Trennmittleinsatz aufgrund der signifikanten Oberflächenabwicklung	Der Verdunstungsschutz wird über eine Umweltproduktdeklaration berücksichtigt [150]. Alle weiteren Hilfsmaterialien und Energieaufwände werden respektiv zu den vorherigen Positionen in der Ökobilanz berücksichtigt.

	der Gewölbeschalung mit einem erhöhten Flächenansatz kalibriert wird. Die Sachbilanzierung der bewehrten Blöcke integriert zudem den Verdunstungsschutz als stoffliche Nachbehandlungsposition. Es ist festzuhalten, dass die physische Struktur und die graue Energie des Gewölbeschalwagens und situativ des Nachbehandlungswagens ebenfalls in einer separaten Position bilanziert werden. Die verfahrenstechnisch erforderliche Firstinjektion wird energetisch über den Strombedarf der Verpressanlage bilanziert.	
Betonstahl	Die zugehörige Sachbilanz der Errichtungsphase des Betonstahls greift ebenfalls nur bei schlechter Geologie und erfasst den Manipulationsaufwand (Diesel und Schmieröl) sowie den elektrischen Strombedarf für die Beleuchtung des Arbeitsbereiches. Der für das Verlegen genutzte Bewehrungswagen wird als eigenständiges Großgerät eingestuft und analog zum Schalwagen in einer separaten Position geführt.	Die Energieaufwände (Diesel, Schmieröl und Strom) werden in Analogie zu den anderen Positionen berücksichtigt.
Innenschalenwägen	Während die Material- und Energieverbräuche direkt den jeweiligen Ausbaupositionen allokiert sind, erfolgt die ökobilanzielle Erfassung der System- und Schalwagen separat in den folgenden Positionen. Die Allokation erfolgt jedoch übergeordnet für die Innenschale.	
Sohlschalwagen	Die sachbilanzielle Erfassung des Sohlschalwagens erfolgt als investives Großgerät, dessen Aktivierung im Berechnungsmodell an Abschnitte mit schlechter Geologie gekoppelt ist. Methodisch wird davon ausgegangen, dass die tragende Stahlkonstruktion über mehrere Tunnelprojekte hinweg wiederverwendet wird, während die Schalhaut aus Stahlblechen für das spezifische Vorhaben und die spezielle Geometrie neu hergestellt werden muss. Die Tonnagen des Schalwagens werden dabei über angenommene Skalierungsfaktoren an die unterschiedlichen Querschnittsarten	Die ökologische Modellierung der Tragkonstruktion stützt sich auf eine EPD für lackierten Baustahl [153]. Demgegenüber wird die stählerne Schalhaut in systemischer Analogie zu den Widerlagern über den Datensatz für Grobbleche der voestalpine abgebildet. Die Verwertung der Schalhaut wird wiederum durch die bereits erwähnte Deponierung des Stahls abgebildet.

	angepasst, wobei für den großen Querschnitt ein Gesamtgewicht von rund 60 Tonnen als Referenzwert dient. Dieser Ansatz wurde durch den Abgleich mit realen Tonnagedaten vergleichbarer Tunnelbauprojekte validiert [151, 152]. Die Bilanzstruktur der primären Stahlkonstruktion integriert zudem einen prozentualen Aufschlag für die integrierte Elektronik, Hydraulik sowie komplementäre Systemaufbauten. Die Allokation der ökologischen Auswirkungen auf das Tunnelprojekt folgt einer baubetrieblichen Berechnungskette, die auf den kalkulatorischen Einsatzzeiten basiert. Ausgehend vom Aufwandswert (h/m^3) und der Geometrie der Querschnittsfläche (m^3/m) wird zunächst die reine Einsatzzeit pro Betonierabschnitt (h/Block) ermittelt. Über die Anzahl der Blöcke pro Tunnelbauwerk wird diese auf die repräsentative Gesamttunnellänge (h/Tunnel) hochgerechnet. Die finale Zuordnung der grauen Energie erfolgt über das Verhältnis dieser effektiven Projekteinsatzzeit zur technischen Gesamtlebensdauer des Großgeräts, welche konservativ mit etwa 30 Jahren angesetzt wird. Um der realen Baustellenpraxis Rechnung zu tragen, wird hierbei strikt zwischen der reinen, Schalzeit und der Vorhaltezeit auf der Baustelle differenziert. Da die Inanspruchnahme nur einen Bruchteil der Gesamtbauzeit ausmacht, wird der anteilige Abschreibungsfaktor für dieses Großgerät mit ca. 1 % angenommen.	
Bewehrungswagen	Der Bewehrungswagen kommt ebenfalls nur bei schlechter Geologie zum Einsatz und wird mit einem Basisgewicht von ca. 35 Tonnen für den großen Querschnitt separat geführt, was durch recherchierte Projektreferenzen gestützt wird [154]. Da	Die ökologische Modellierung der Tragkonstruktion basiert – analog zum Sohlenschalwagen – auf der EPD für beschichteten Baustahl [153]. Die hölzerne Plattform wird hingegen durch

	das Gerät weniger massiv ausgeführt ist als ein Schalwagen, wird ein Abschreibungsanteil von etwa 5 % angenommen. Die Skalierung der Tonnagen auf die Querschnittsarten erfolgt wieder über integrierte Größenfaktoren. In der Sachbilanz wird das Gerät in die Tragstruktur (80 % Massenanteil) und eine hölzerne Plattformkonstruktion (20 % Massenanteil) aufgeteilt.	den Mittelwert der Datensätze der zuvor genannten Kanthölzer und Massivholzplatten abgebildet. Die Weiterverwertung der Holzbestandteile erfolgt in Analogie zu jener der Abschalung.
Gewölbeschalwagen	Der Gewölbeschalwagen folgt der material- und datenbankseitigen Logik des Sohlschalwagens. Verbindungsmittel wie Nägel und Kleiseisen werden aufgrund ihrer geringen Masse im Vergleich zum gesamten Großgerät vernachlässigt. Da das reale Eigengewicht des Wagens äußert projektspezifisch ist, werden grobe Tonnageansätze aus der Fachliteratur als Referenz herangezogen [155, 156]. Daraus ergeben sich etwa 100 t für den großen Querschnitt. Die Ermittlung des Nutzungsanteils am Gesamtlebenszyklus des Wagens erfolgt analog zum Sohlschalwagen. Darüber hinaus wird dieser Anteil über eine kalkulatorische Abschätzung ausgehend von einem Baufortschritt von einem Block/Tag und somit der Gesamtzahl der Tage für den repräsentativen Tunnel im Verhältnis zur theoretischen Lebensdauer kontrolliert. Diese ist ebenfalls in der Größenordnung von ca. 1 % und wird somit übernommen.	Die ökologischen Auswirkungen und die Ansätze der <i>End-of-Life</i>-Prozesse des Gewölbeschalwagens werden gleich wie beim Sohlschalwagen über die Datensätze der Tragkonstruktion aus Stahl und der Schalhaut sowie der Stahldeponie ermittelt.
Nachbehandlungswagen	Der Nachbehandlungswagen wird unter denselben baubetrieblichen, geologischen und geometrischen Bedingungen wie der Bewehrungswagen geführt. Aufgrund der rein schützenden Funktion als Abdeckung nach der Betonage reduzieren sich die schweren statischen Tragkomponenten. Das Modell basiert daher auf einer leichteren Stahlblechhaut, deren Gewicht	Die Modellierung erfolgt über die Datensätze zum Baustahl und den Grobblechen sowie der Stahldeponie.

mit 20 % der Masse der Tragkonstruktion geschätzt wird.

Tab. 6-6: Sachbilanz Errichtungsphase A5

6.4.5 Sachbilanz nach Tunnelquerschnitt

Auf Basis der kalkulierten und tunnelbautechnischen Parameter sowie der zuvor erläuterten Annahmen und Spezifikationen werden die verbauten Mengen je Meter Tunnelbauwerk mit dem Kehrwert der deklarierten Einheit des entsprechenden Prozesses multipliziert, um die Sachbilanz je Tunnelquerschnitt abzubilden.

Die Ergebnisse der sachbilanziellen Analyse der betrachteten Tunnelquerschnitte respektive den jeweiligen geologischen Verhältnissen verdeutlichen vor allem Unterschiede der notwendigen Materialien und Mengen (bspw. Bewehrung, Sprengstoff, Anker usw.). Logischerweise besteht ein direktes Verhältnis der Elementarströme zu der jeweiligen Querschnittsgröße, welches je nach Material bzw. Energie verschieden stark ausgeprägt ist (vgl. Abb. 6-6 und Abb. 6-9). Etwa äußert sich dieser Zusammenhang bei den unmittelbaren Flächen- sowie Kubikmeter-Positionen wie Sprengstoff oder Spritzbeton etc. stark. Hingegen sind die Unterschiede bei längenabhängigen Positionen oder bei pauschalen sowie zeitabhängigen Ansätzen weniger ausgeprägt (z. B. Teilsickerrohr Ulmendrainage).

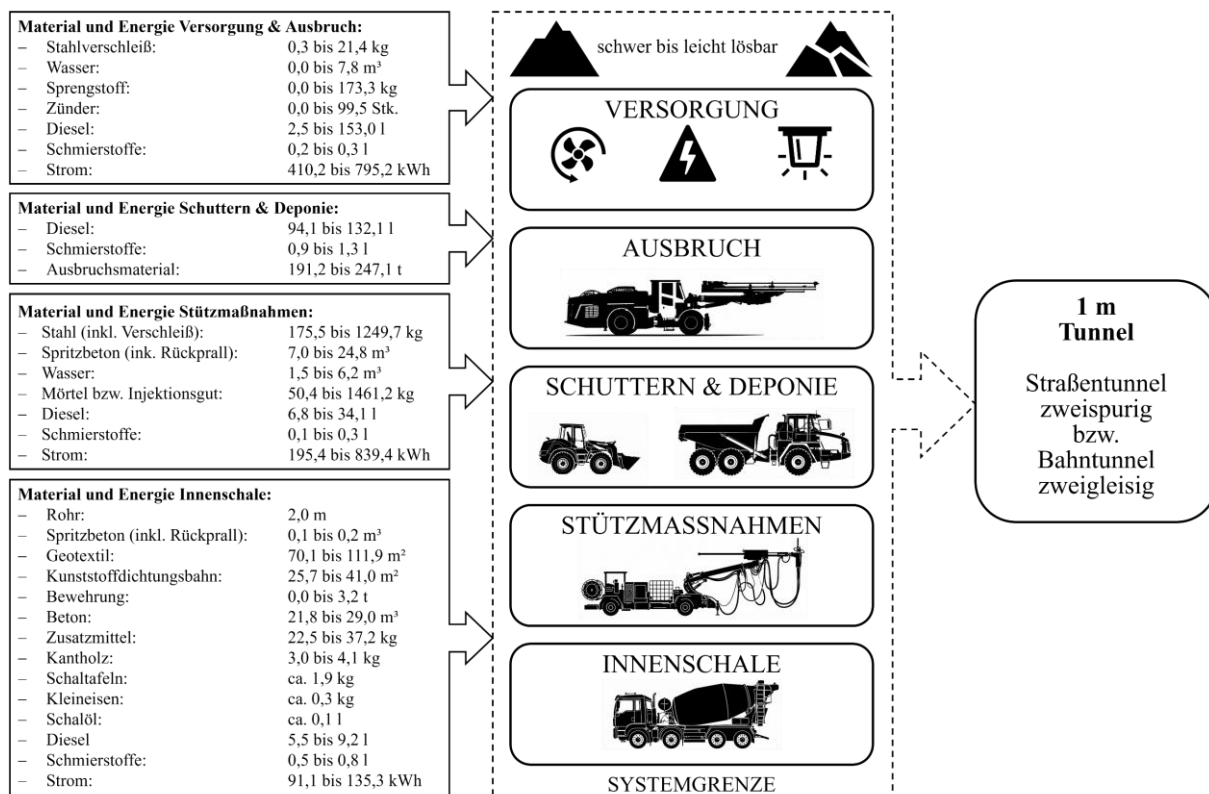


Abb. 6-6: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für zweispurigen bzw. zweigleisigen Querschnitt

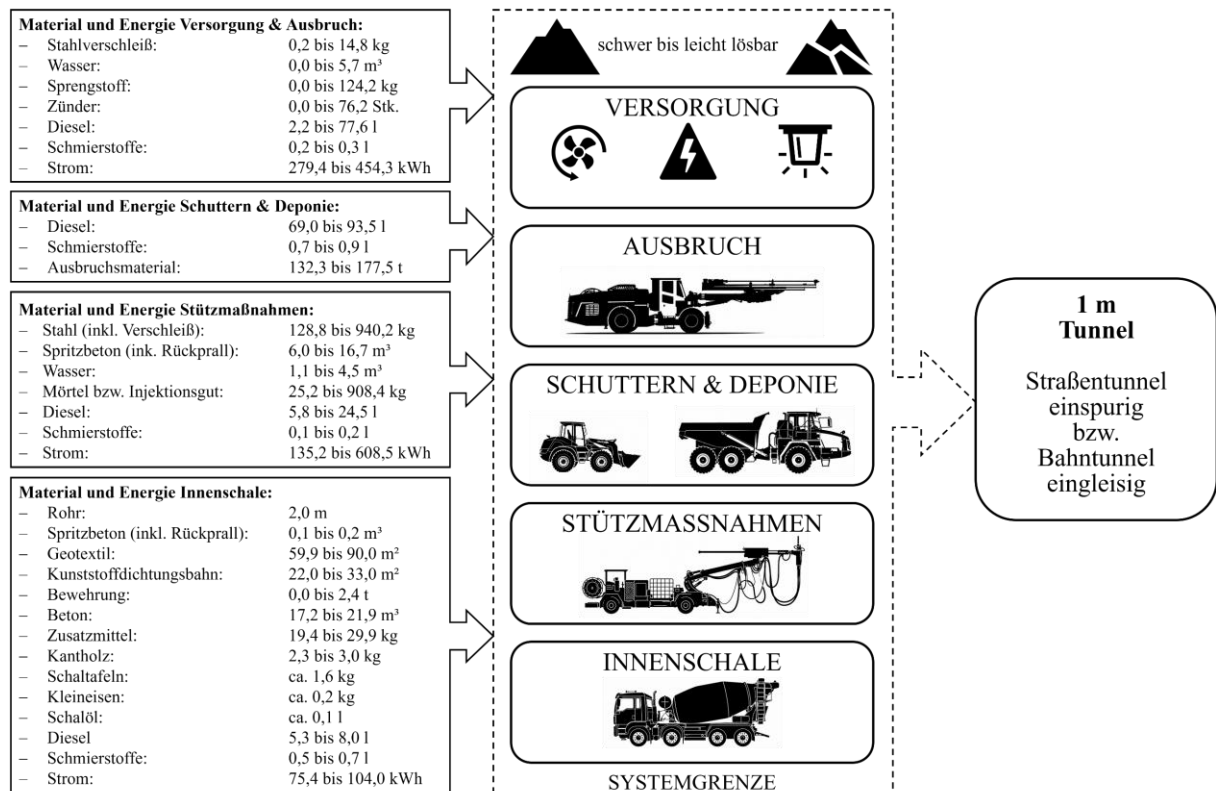


Abb. 6-7: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für einspurigen bzw. eingleisigen Querschnitt

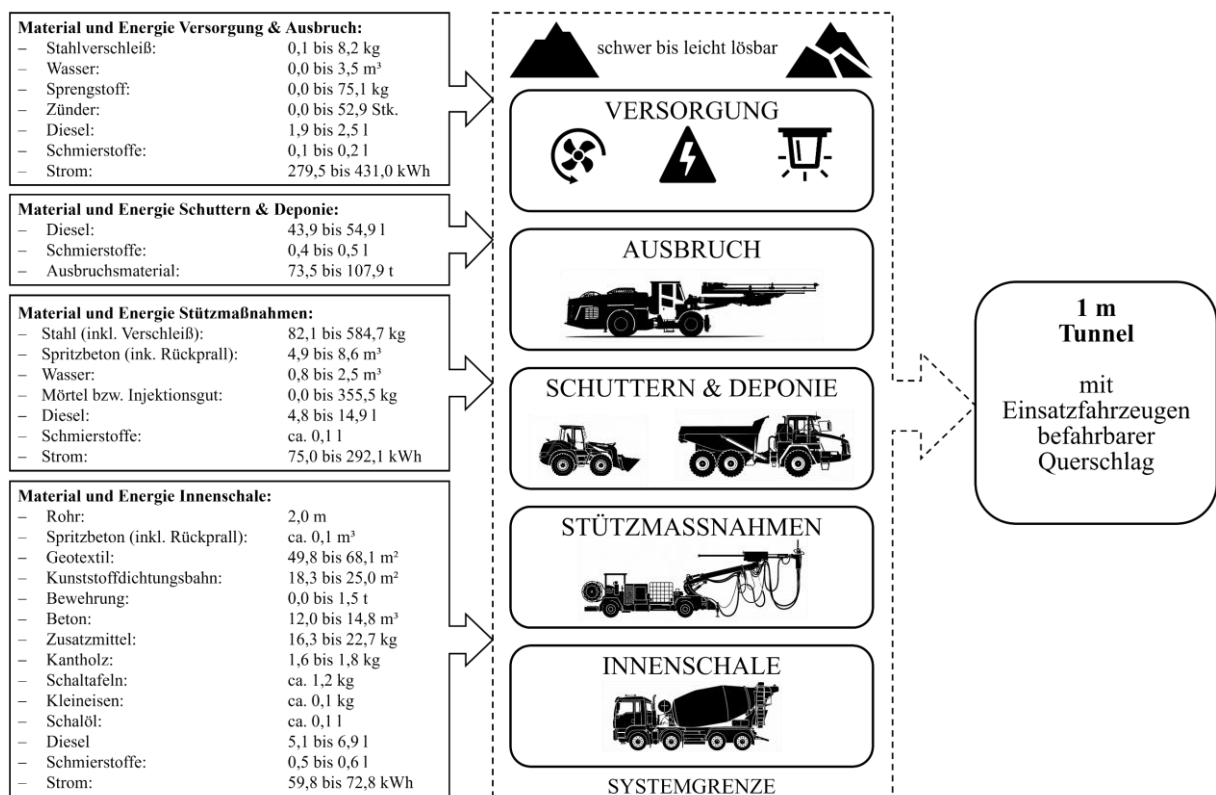


Abb. 6-8: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für mit Einsatzfahrzeugen befahrbaren Querschlag

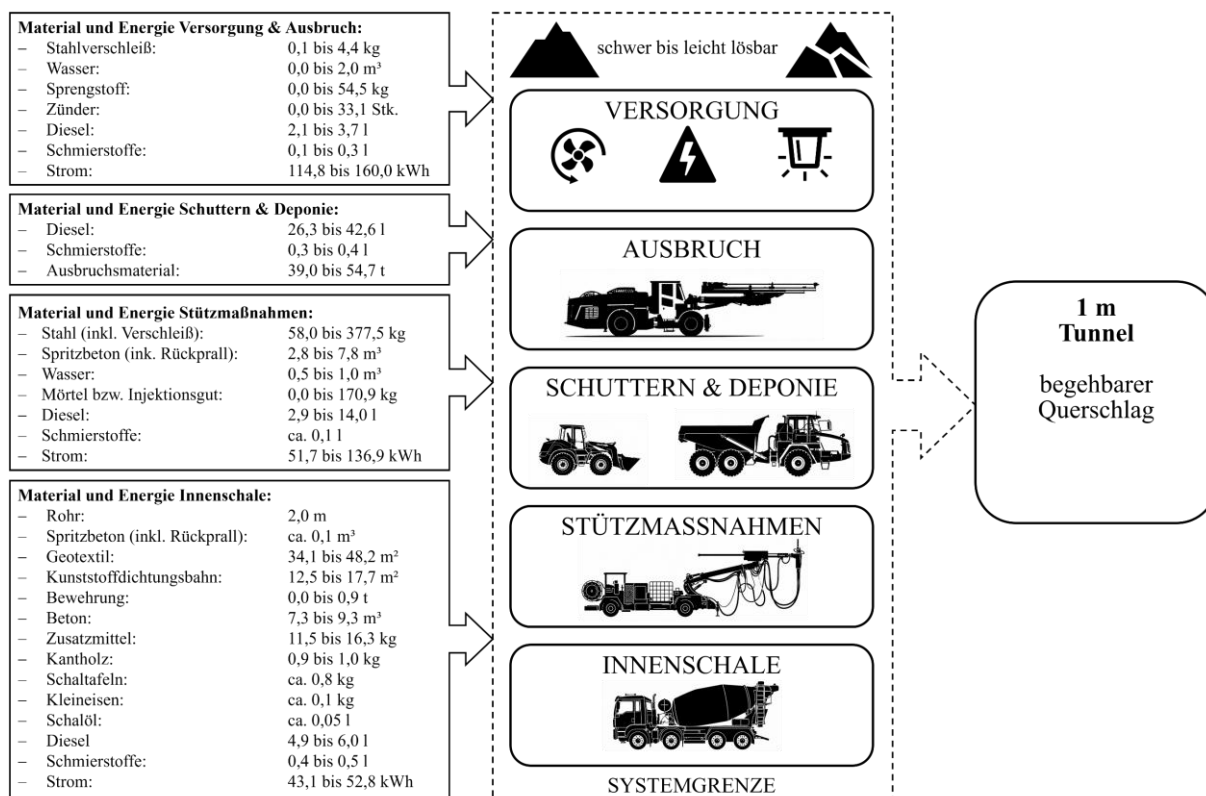


Abb. 6-9: Berücksichtigte Inputs/ Outputs und Systemgrenze; ermittelte Mengen pro Tunnelmeter für begehbaren Querschlag

6.5 Wirkungsabschätzung

Die Quantifikation und Berechnung der Umweltwirkungen erfolgt größtenteils mittels der Software Microsoft Excel und für die Auswertung der generischen Datensätze mittels der Software Sima-Pro 9.6.0.1 [157].

Die Methode nach der ÖNORM EN 15804 + A2 [99] ermöglicht die Quantifizierung verschiedener Wirkungsindikatoren. Um die Übersichtlichkeit der Umweltwirkungen dieser Untersuchung und der daraus resultierenden Ergebnisse gewährleisten zu können, werden 11 bedeutende Indikatoren aus oben genannter Methode gewählt und prinzipiell präsentiert. Diese sind in Tab. 6-7 aufgelistet. Nachfolgend werden drei Indikatoren näher beschrieben, welche in nachfolgenden Abbildungen detailliert diskutiert werden.

Ein zentraler Fokus liegt dabei auf dem Indikator des gesamten Treibhauspotenzials, dem GWP-gesamt (eng. *Global Warming Potential total*), welcher die Fähigkeit von emittierten Luftschadstoffen beschreibt, thermische Energie zu absorbieren und dadurch die Wärmeabstrahlung der Erde zu verlangsamen [32, 96]. In der Bilanzierungspraxis wird hierbei der vom Menschen verursachte (anthropogene) Treibhauseffekt vom natürlichen abgegrenzt [96]. Das spezifische Potenzial eines Treibhausgases wird durch seine Infrarot-Absorptionskoeffizienten, seine atmosphärische Residenzzeit und die prognostizierte Immissionsentwicklung determiniert [32]. Wegen der variierenden troposphärischen

Verweildauern hat sich in Ökobilanzen ein fixer Betrachtungszeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}) etabliert [32, 95, 96]. Um die rechnerische Komplexität einer Einzelstoffbewertung zu umgehen, aggregiert die Methodik die Wirkungen verschiedener Gase (z. B. Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas, Fluorchlorkohlenwasserstoffe etc.) mittels Gewichtungsfaktoren, den sogenannten Charakterisierungsfaktoren. Die Darstellung erfolgt vereinheitlicht in der Dimension $kg\ CO_2$ -Äquivalente, welche die Klimawirkung eines Gases direkt mit der schadensäquivalenten Masse an Kohlenstoffdioxid gleichsetzt [95, 96]. So belaufen sich die Charakterisierungsfaktoren von Kohlenstoffdioxid logischerweise auf 1,0 und bspw. jene von (fossilem) Methangas auf etwa 30, von Distickstoffmonoxid (Lachgas) auf etwa 273 und jene von dem Kältemittel Trichlormonofluormethan auf etwa 6226 [158].

Weiters wird der Ressourcenindikator des gesamten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs, dem PENRT (eng. *Primary Energy Non-Renewable Total*), näher erläutert. Dieser beschreibt die Gesamtsumme der energetisch und stofflich beanspruchten fossilen sowie nuklearen Ressourcen über den Lebenszyklus hinweg und grenzt endliche Primärenergieträger streng von regenerativen Quellen ab. Das spezifische Potenzial des Indikators wird durch den kumulierten Energieaufwand (KEA) für Rohstoffgewinnung, Verarbeitung, Transport und Entsorgung determiniert [95, 96]. Wegen der Begrenztheit fossiler Ressourcen gilt dieser Parameter im schweren Infrastrukturbau als Kernindikator für die Ressourceneffizienz [159]. Zur Reduktion der Komplexität aggregiert die ökobilanzielle Methodik die Energieformen über stoffspezifische Heizwerte (eng. *net calorific value*). Normativ setzt sich der Gesamtindikator mathematisch aus dem reinen energetischen Verbrauch (PENRE) und dem stoffgebundenen, im Produkt fixierten Energieinhalt (PENRM) zusammen [95]. Als einheitliche Bezugsgröße dient die physikalische Einheit Megajoule (MJ).

Ein weiterer Schwerpunkt der Analyse liegt auf dem Indikator des Versauerungspotenzials, dem AP (eng. *Acidification Potential*), welcher das Vermögen saurer Emissionen beschreibt, Protonen in der Biosphäre freizusetzen und dadurch den pH-Wert saurer Milieus zu verschieben [96, 160]. Die Ökobilanz-Modellierung grenzt hierbei anthropogene Schadgase aus Industrie und Wirtschaft – im Wesentlichen Schwefeldioxid, Stickoxide und Ammoniak – von natürlichen Ursachen ab [96]. Die Charakteristik eines Gases wird durch seine Depositionsrate und die resultierende Toxizität auf Pflanzen und Gewässerlebewesen determiniert, was sich im Wald- und Fischsterben niederschlägt [161]. Um eine komplexe Einzelstoffbetrachtung zu vermeiden, normiert die Methodik die ungleichen Gase über Charakterisierungsfaktoren, welche auf einem kumulierten Überschreitungsansatz basieren. Hierbei wird als einheitliche Bezugsgröße die Anzahl der pro Substanz produzierbaren H^+ -Protonen-Äquivalente verwendet, wodurch sämtliche Schadwirkungen direkt mit dem schadensäquivalenten Potential der Protonenfreisetzung gleichgesetzt werden [160].

Insbesondere werden bei den Ergebnissen, Detailbetrachtungen, Sensitivitätsanalysen und Verbesserungspotenzialen der LCA-Studie diese Indikatoren herangezogen. Eine detaillierte

Analyse aller (teilweise relativ neuen und unbekannten) Indikatoren würde den Rahmen der Untersuchung überschreiten. Zudem beschränkt sich der Großteil der bereits erwähnten Fachliteratur im Tunnel- und Infrastrukturbau vorwiegend auf die Ausweisung von GWP-gesamt. Die Fokussierung auf das Treibhauspotenzial gewährleistet folglich eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit bestehenden Forschungsarbeiten und Referenzstudien.

Wirkungskategorie	Wirkungsindikator	Einheit
Klimawandel – gesamt	Treibhauspotenzial insgesamt (GWP-gesamt) eng. <i>Global Warming Potential</i>	kg CO ₂ -Äq.
Wassernutzung	Wasser-Entzugspotenzial (Benutzer), entzugsgewichteter Wasserverbrauch (WDP) eng. <i>Water Deprivation Potential</i>	m ³ Welt-Äq. entzogen
Ressourceneinsatz	Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT) eng. <i>Primary Energy Non-Renewable Total</i>	MJ
Ressourceneinsatz	Totale erneuerbare Primärenergie (PERT) eng. <i>Primary Energy Renewable Total</i>	MJ
Ressourcenbeanspruchung	Einsatz von Sekundärstoffen (SM) eng. <i>Secondary Materials</i>	kg
Output-Flüsse	Stoffe zum Recycling (MFR) eng. <i>Materials For Recycling</i>	kg
Humantoxizität, kanzerogene Wirkung	potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (HTP-c) eng. <i>Potential Comparative Toxic Unit for humans – cancer effects</i>	CTUh ⁷
Humantoxizität, nicht kanzerogene Wirkung	potenzielle Toxizitätsvergleichseinheit für den Menschen (HTP-nc) eng. <i>Potential Comparative Toxic Unit for humans – non cancer effects</i>	CTUh
Versauerung	Versauerungspotenzial, kumulierte Überschreitung (AP) eng. <i>Acidification Potential</i>	mol H ⁺ -Äq.
Feinstaubemissionen	potenzielles Auftreten von Krankheiten aufgrund von Feinstaubemissionen (PM) eng. <i>Particulate Matter emission</i>	Auftreten von Krankheiten
mit der Landnutzung verbundene Wirkungen/ Bodenqualität	potenzieller Bodenqualitätsindex (SQP) eng. <i>Potential Soil Quality Index</i>	dimensionslos

Tab. 6-7: Betrachtete Wirkungsindikatoren nach ÖNORM EN 15804 [99]

⁷ CTUh (*Comparative Toxic Unit for humans*) die potenzielle gesundheitliche Wirkung toxischer Emissionen auf den Menschen und gibt die geschätzte Zunahme von Krankheitsfällen pro emittierter Stoffmenge an [162].

6.6 Ergebnisse

In den nachfolgenden Tabellen sind die aggregierten Summen der Prozesse, differenziert nach den jeweiligen Lebenszyklusphasen je Tunnelquerschnitt und Geologie, pro Tunnelmeter dargestellt. Die vollständige, detaillierte Auswertung ist im Anhang dieser Arbeit zu finden. Aufgrund der vielen umweltrelevanten Prozesse und Materialströme in der Herstellungs- und Errichtungsphase A5 konzentriert sich die nachfolgende Detailanalyse primär auf diese Phase. Darüber hinaus werden die Haupttreiber des Ausbruchs (ebenfalls nur A5-Bestandteile) sowie jene der Stützmaßnahmen und der Innenschale über alle untersuchten Lebenszyklusphasen (A1–A3, A4 und A5) hinweg einer vertieften Betrachtung unterzogen. Diese Ergebnisse werden wiederum für die gesamte repräsentative Tunnellänge präsentiert. Die prozentuellen Verteilungen bleiben aber aufgrund der gewählten Skalierung gleich (vgl. Abschnitt 6.2.1).

6.6.1 Bahntunnel

6.6.1.1 Bahntunnel zweigleisig

Schwer lösbar

Ein durchschnittlicher zweigleisiger Bahntunnel ruft in schwer lösbarer Geologie etwa 5,5 Tonnen CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,16 t CO₂-Äq. während der Transportphase und 4,1 t CO₂-Äq. in der Bau-/ Errichtungsphase pro Tunnelmeter hervor (siehe Tab. 6-8). Betrachtet man den gesamten zyklischen Tunnelbau für diesen Meter resultiert ein CO₂-Äq.-Fußabdruck von 9,7 Tonnen.

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	disease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,64E+03	3,89E+02	9,81E+03	1,82E+03	1,33E+02	1,36E+01	1,26E-06	1,73E-05	1,27E+02	9,02E-04	4,13E+03
Innenschale	3,82E+03	3,25E+03	2,35E+04	3,32E+03	5,06E+01	5,57E-01	4,88E-07	1,01E-05	3,22E+02	2,28E-03	8,53E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	5,46E+03	3,64E+03	3,33E+04	5,14E+03	1,84E+02	1,42E+01	1,75E-06	2,74E-05	4,50E+02	3,18E-03	1,27E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,73E+01	7,56E-01	3,81E+02	2,85E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,23E-07	2,62E-06	4,60E-02	1,87E-06	2,68E+01
Innenschale	1,32E+02	3,65E+00	1,84E+03	1,38E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,95E-07	1,27E-05	2,22E-01	9,01E-06	1,30E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,59E+02	4,40E+00	2,22E+03	1,66E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,19E-07	1,53E-05	2,68E-01	1,09E-05	1,56E+02
A5											
Ausbruch	7,23E+02	8,71E+01	9,71E+03	2,24E+03	4,11E+00	7,46E+00	1,80E-05	1,63E-03	4,17E+00	9,33E-05	1,31E+03
Stützmaßnahmen	4,69E+02	5,09E+01	6,01E+03	1,40E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-06	1,16E-04	1,95E+01	1,32E-04	7,27E+02
Innenschale	5,11E+02	2,67E+01	4,74E+03	6,25E+02	4,05E+01	3,03E-01	7,10E-05	9,33E-05	3,61E+00	2,33E-05	1,10E+03
Deponie	2,35E+03	1,68E+03	4,91E+04	4,21E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-05	8,33E-05	1,23E+01	3,04E-04	7,53E+04
Gerätetransport	2,88E+01	7,94E-01	4,00E+02	3,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-07	2,76E-06	4,84E-02	1,96E-06	2,82E+01
Summe A5	4,08E+03	1,84E+03	6,99E+04	4,69E+03	4,46E+01	7,76E+00	1,01E-04	1,93E-03	3,97E+01	5,54E-04	7,85E+04
A1-A5											
Summe	9,70E+03	5,49E+03	1,05E+05	9,85E+03	2,28E+02	2,19E+01	1,04E-04	1,97E-03	4,90E+02	3,75E-03	9,13E+04

Tab. 6-8: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, schwer lösbar pro Tunnelmeter

Das Versauerungspotential beläuft sich dabei auf $4,9\text{E}+02$ mol H^+ -Äq. und die „Totale nicht erneuerbare Primärenergie“ kann mit $1,05\text{E}+05$ MJ je tm beziffert werden. Aufgrund der Zuordnung der Lebenszyklusphasen zeigt sich, dass manche Prozesse nur in A5 enthalten sind.

Die Auswertung der Prozesse in A5 (vgl. Abb. 6-10) zeigt, dass die Deponie des Ausbruchmaterials den dominanten Einflussfaktor beim Treibhauspotenzial (etwa 60 %) und dem Primärenergiebedarf (70 %) darstellt, während sie beim Versauerungspotenzial (31 %) auf den zweiten Platz zurückfällt. Hier übernehmen die Stützmaßnahmen aufgrund des Spritzbetons mit signifikanten 49 % die Hauptverantwortung, spielen jedoch beim GWP (12 %) und PENRT (9 %) eine kleinere Rolle. Das Schuttern sowie die Innenschale liefern über weite Teile moderate Minderheitsbeiträge (etwa $2 \div 10$ %). Alle übrigen Prozesse (Ausbruch, Versorgung während der Vortriebsarbeiten, Abdichtung, Betonarbeiten und Gerätetransport) bewegen sich im niedrigen einstelligen Prozentbereich und sind für die Gesamtbilanz von untergeordneter Bedeutung.

Bei detaillierterer Betrachtung des Ausbruchs zeigen die Daten aus Abb. 6-11, dass der Dieserverbrauch der dominierende Treiber über alle drei Indikatoren ist. Er verursacht mehr als die Hälfte des Treibhauspotenzials (57 %) und des Primärenergiebedarfs (51 %) sowie annähernd 80 % des Versauerungspotenzials. Der Sprengstoff bildet die zweite wesentliche Kernkomponente mit erheblichen Anteilen von etwa 30 % beim GWP und 32 % beim PENRT, während der Einfluss beim AP auf 14 % zurückfällt. Strom und Zünder liefern mit Werten unter 10 % lediglich moderate Minderheitsbeiträge, während Stahlverschleiß, Wasser und Schmierstoffe ökobilanziell sehr untergeordnet sind.

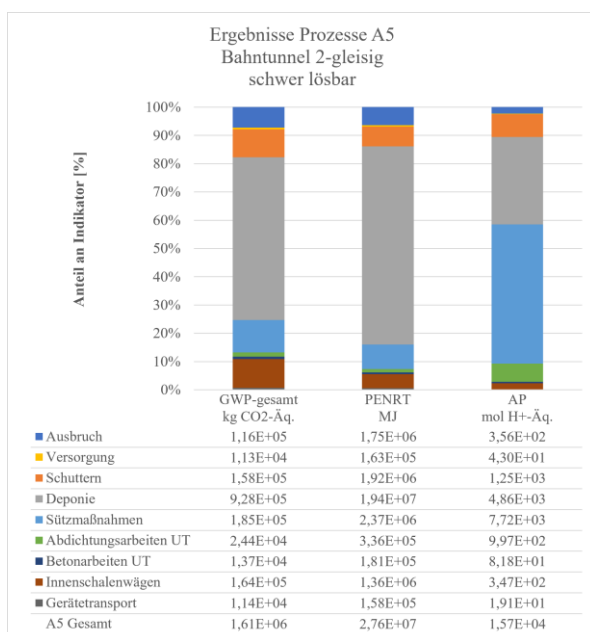


Abb. 6-10: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar

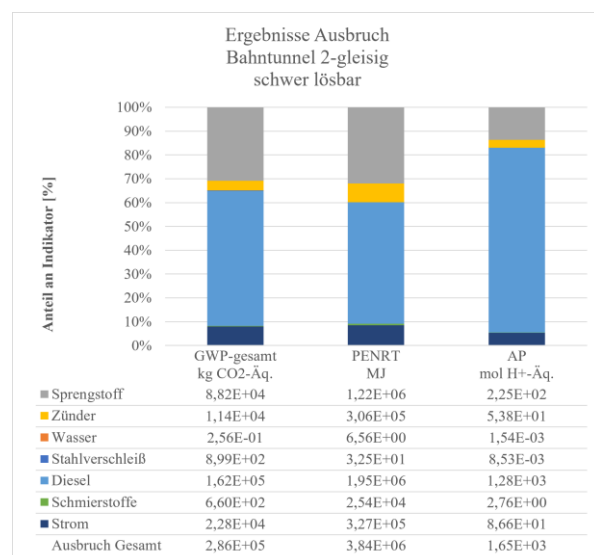


Abb. 6-11: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar

Bei den Stützmaßnahmen selbst dominieren – aufgrund der geringen Stützmittelanzahl – die Aufwendungen des Spritzbetons mit ca. 70 ÷ 99 % den ökologischen Fußabdruck der Stützmaßnahmen über alle drei Indikatoren und Phasen hinweg. Da alle Stützmaßnahmen der schwer lösbaren Geologie im Bauwerk verbleiben, macht diese Phase etwa 61 ÷ 87% der gesamten Phasen A1-A5 je Indikator aus. Bei den restlichen Parametern zeigt sich dieser Zusammenhang vor allem für die Anker mit nur etwa 13 % (GWP) bis 21 % (PENRT) auf die Phasen A1-A5 gesehen. Die Bedeutung der Bewehrung tritt mit ca. 3 ÷ 6 % nur im Bereich des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs moderat in Erscheinung. Die Aufwendungen der übrigen Positionen fallen für die schwer lösbare Geologie weg.

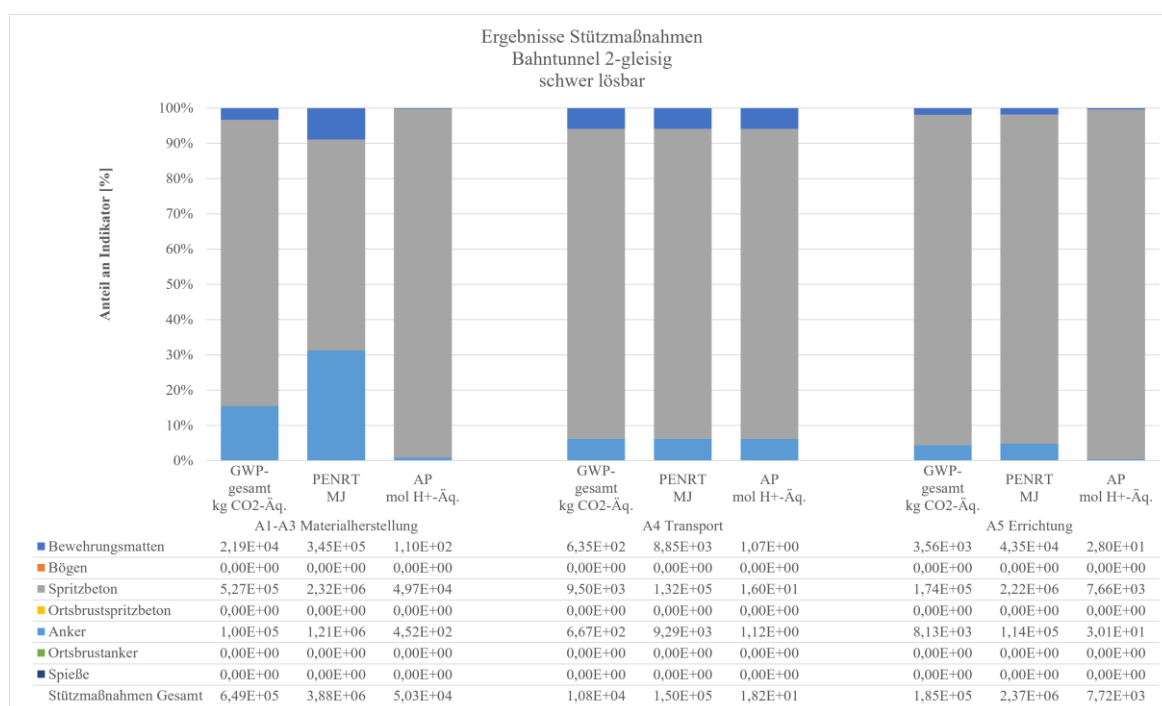


Abb. 6-12: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar

Im konkreten Fall der Innenschale verteilen sich die ökobilanziellen Auswirkungen von Gewölbebeton und der Sohlplatte auf ca. 25 ÷ 37 % der Gesamtsumme über alle drei Umweltindikatoren, wobei diese gemeinsam aufgrund der enormen Betonkubaturen die Haupttreiber der Betrachtung bilden (vgl. Abb. 6-13). Da diese Betonmengen im Tunnel verbleiben, dominiert die Phase A1-A3 mit ca. 88 ÷ 99 % der gesamten Wirkungen über alle Phasen hinweg. Bei den restlichen Arbeitsschritten zeigen sich vor allem für den Mehrbeton relevante Beiträge von etwa 11 % (PENRT) bis 15 % (AP), während der Einfluss der Kunststoffdichtungsbahn mit ca. 12 % nur im Bereich des Primärenergiebedarfs – aufgrund der fossilen Ausgangsstoffe der Folie – spürbar in Erscheinung tritt. Die Bedeutung der Ulmendrainage, des Abdichtungsstollens, des Geotextils und des Widerlagers bleibt mit Werten von etwa 1 ÷ 7 % über die meisten Indikatoren hinweg moderat bis gering. Durch die modellierte Geologie sind keine Bewehrung und kein Auffüllen der Sohle notwendig. In der Errichtungsphase kristallisiert sich der Abdichtungsträger aufgrund der Spritzbetonzusätze als

zentraler Treiber heraus, da die aufgetragene Fläche beim zweigleisigen Tunnelquerschnitt die Auswirkungen erheblich skaliert. Darüber hinaus fällt die Entsorgung des anfallenden Spritzbetonrückpralls ebenfalls in diese Phase. Die notwendige Stahlschalung der Widerlager spiegelt sich in dieser Phase ebenfalls wider. Die Ulmendrainage wirkt sich in der Phase A4 mehr aus, da sie als Nebenleistung behandelt wird und somit der Transport maßgebend ist.

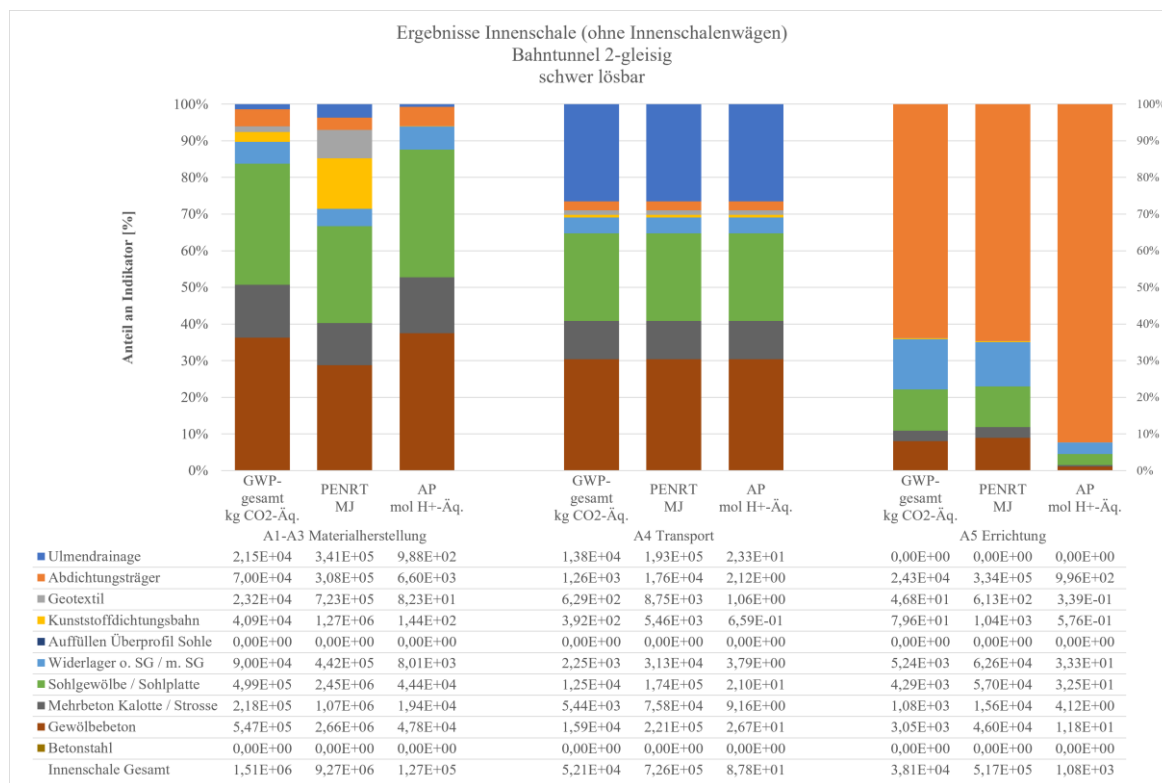


Abb. 6-13: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, schwer lösbar

Mittel lösbar

In der mittel lösbaren Geologie ruft ein durchschnittlicher zweigleisiger Bahntunnel etwa 9,0 Tonnen CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,23 t CO₂-Äq. während der Transportphase und 4,7 t CO₂-Äq. in der Bau-/Errichtungsphase pro Tunnelmeter hervor (vgl. Tab. 6-9). Betrachtet man den gesamten zyklischen Tunnelbau für diesen Meter, resultiert ein CO₂-Äq.-Fußabdruck von 14,0 Tonnen. Im Grunde zeigen sich hierbei ähnliche Tendenzen und Verteilungsmuster wie bei der schwer lösbaren Geologie. Ein maßgeblicher Unterschied liegt jedoch in der relativen Gewichtung, da sich aufgrund der veränderten geotechnischen Rahmenbedingungen die Relevanz im System abschnittsweise verschiebt, sodass die Stützmaßnahmen eine höhere ökologische Wirkung und damit einen größeren Anteil am Gesamtergebnis einnehmen.

Die Auswertung in Abb. 6-14 zeigt die erwähnte Relevanzverschiebung zwischen den beiden Haupttreibern. Der relative Einfluss der Deponie sinkt spürbar auf 47 % (GWP) und 60 % (PENRT), bleibt jedoch eine dominante Größe. Im Gegenzug gewinnen die Stützmaßnahmen in dieser Geologiekategorie signifikant an Bedeutung und steigen auf 22 % beim GWP, 17 % beim PENRT und dominierende 66 % beim AP. Die Anteile für das Schuttern und die

Innenschale verbleiben auf einem ähnlich moderaten Niveau, während alle übrigen Prozesse weiterhin eine untergeordnete Rolle unterhalb der 2-%-Marke einnehmen.

Die prozentuellen Verteilungen des Ausbruchs bleiben in etwa gleich, da die Querschnittsgröße und die baubetrieblichen Abläufe der Lösemethode unverändert bleiben (vgl. Abb. 6-15).

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	desease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	3,79E+03	1,69E+03	2,42E+04	4,23E+03	6,79E+02	3,86E+01	3,26E-06	4,69E-05	2,74E+02	1,95E-03	9,91E+03
Innenschale	5,24E+03	4,94E+03	3,25E+04	4,50E+03	5,20E+01	8,59E-01	6,51E-07	1,36E-05	4,44E+02	3,14E-03	1,14E+04
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	9,03E+03	6,63E+03	5,67E+04	8,73E+03	7,31E+02	3,95E+01	3,91E-06	6,05E-05	7,18E+02	5,09E-03	2,13E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	6,36E+01	1,76E+00	8,86E+02	6,64E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,87E-07	6,10E-06	1,07E-01	4,34E-06	6,24E+01
Innenschale	1,63E+02	4,51E+00	2,27E+03	1,70E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,36E-07	1,56E-05	2,75E-01	1,11E-05	1,60E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	2,27E+02	6,27E+00	3,16E+03	2,37E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,02E-06	2,17E-05	3,82E-01	1,55E-05	2,23E+02
A5											
Ausbruch	9,02E+02	1,10E+02	1,21E+04	2,90E+03	5,20E+00	9,31E+00	2,23E-05	2,02E-03	5,18E+00	1,15E-04	1,68E+03
Stützmaßnahmen	1,03E+03	1,10E+02	1,32E+04	2,83E+03	3,13E-02	9,42E-04	4,15E-06	3,68E-04	4,21E+01	2,89E-04	1,50E+03
Innenschale	5,48E+02	3,14E+01	5,26E+03	7,87E+02	4,15E+01	3,03E-01	8,45E-05	1,04E-04	4,99E+00	3,33E-05	1,33E+03
Deponie	2,19E+03	1,57E+03	4,58E+04	3,94E+02	0,00E+00	0,00E+00	9,89E-06	7,78E-05	1,15E+01	2,84E-04	7,04E+04
Gerätetransport	2,88E+01	7,94E-01	4,00E+02	3,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,30E-07	2,76E-06	4,84E-02	1,96E-06	2,82E+01
Summe A5	4,70E+03	1,82E+03	7,68E+04	6,92E+03	4,67E+01	9,61E+00	1,21E-04	2,57E-03	6,38E+01	7,23E-04	7,49E+04
A1-A5											
Summe	1,40E+04	8,46E+03	1,37E+05	1,57E+04	7,78E+02	4,91E+01	1,26E-04	2,65E-03	7,83E+02	5,83E-03	9,64E+04

Tab. 6-9: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, mittel lösbar pro Tunnelmeter

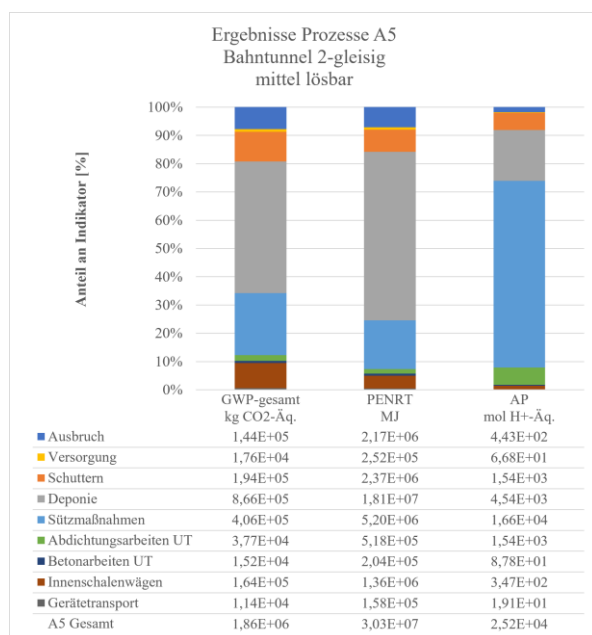


Abb. 6-14: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar

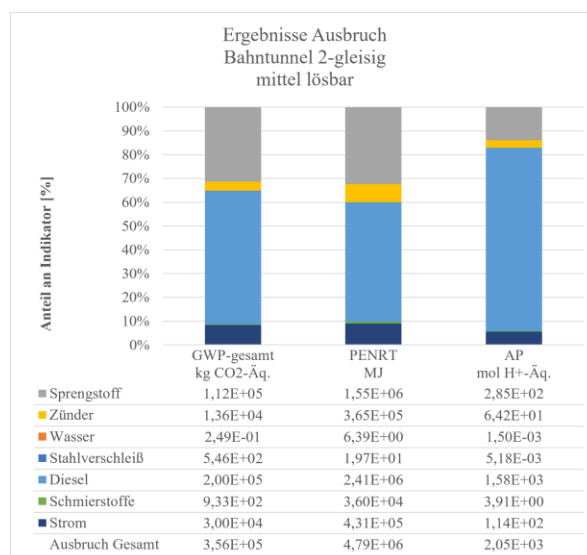


Abb. 6-15: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar

Bei den Stützmaßnahmen bleibt der Spritzbeton trotz der größeren Anzahl an Ankern und der verwendeten Stahlbögen in dieser Geologie der dominierende Faktor (vgl. Abb. 6-16).

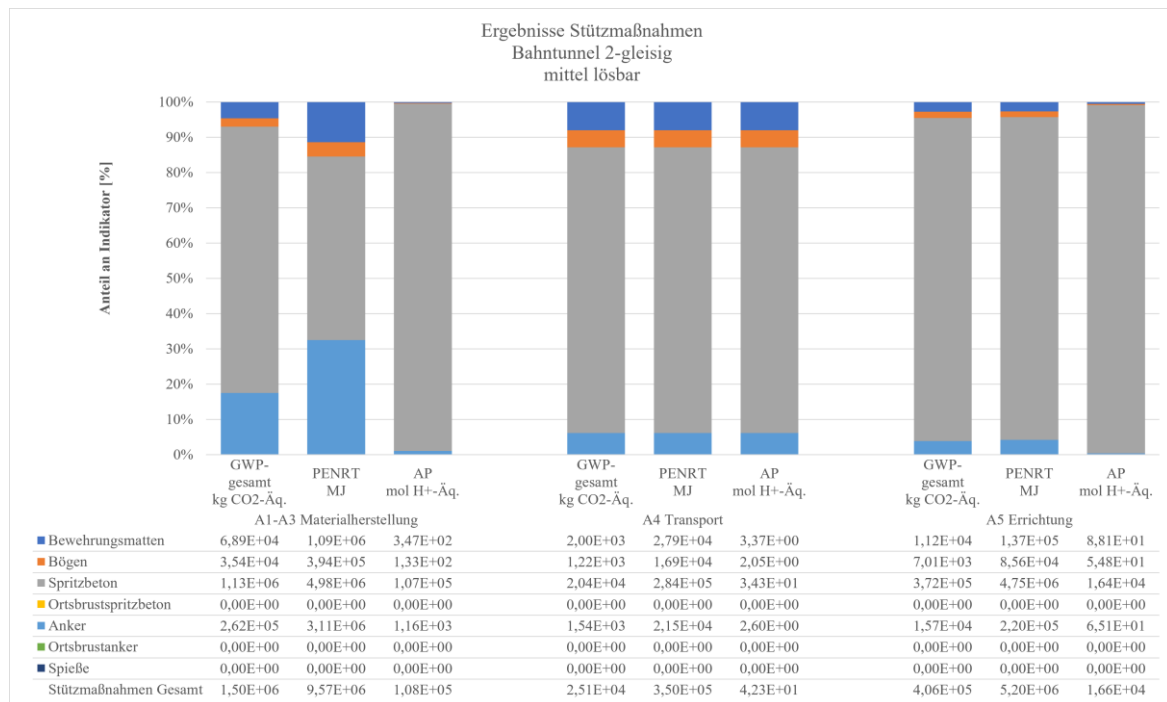


Abb. 6-16: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar

Im konkreten Fall der Innenschalenarbeiten ergibt sich ein ähnliches Bild wie zuvor, jedoch bewirkt das Auffüllen des Überprofils in der Sohle etwa 6 ÷ 10 % je Indikator, wobei wiederum die Herstellungsphase den größten Anteil der Lebenszyklusphasen ausmacht (vgl. Abb. 6-17).

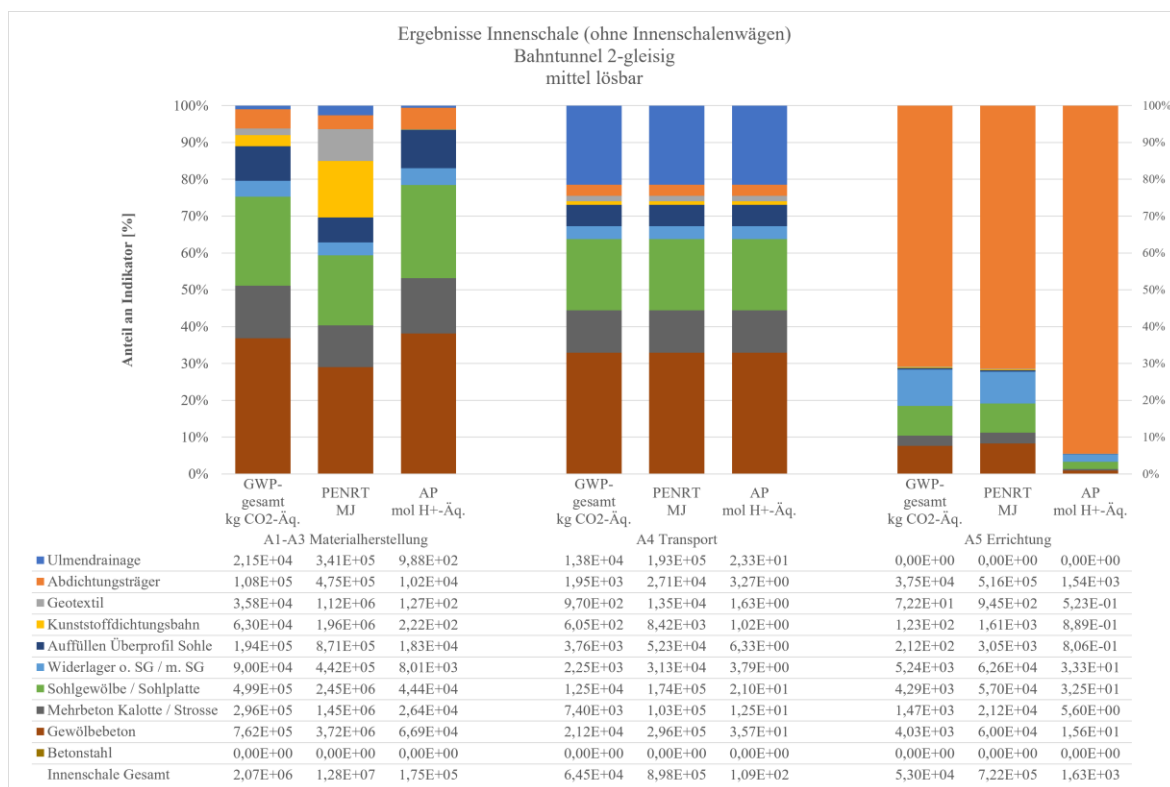


Abb. 6-17: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, mittel lösbar

Leicht lösbar

In der leicht lösbaren Geologie ruft ein durchschnittlicher zweigleisiger Bahntunnel etwa 11,9 Tonnen CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,24 t CO₂-Äq. während der Transportphase und 7,4 t CO₂-Äq. in der Bau-/ Errichtungsphase pro Tunnelmeter hervor. Betrachtet man den gesamten zyklischen Tunnelbau für diesen Meter, resultiert ein größerer CO₂-Äq.-Fußabdruck von 19,6 Tonnen. Ein fundamentaler technologischer Unterschied zu den anderen beiden Geologieklassen liegt darin, dass in diesem modellierten Lockergestein nun der mechanische Baggervortrieb zum Greifen kommt. Dadurch entfallen die material- und prozessbedingten Aufwendungen für Sprengstoffe sowie Zünder vollständig, und auch der Wasserverbrauch für das Bohren der Sprenglöcher ist nicht mehr erforderlich. Demgegenüber steht jedoch ein veränderter bautechnischer Sicherungsaufwand und aufgrund der geringeren Standfestigkeit des Gebirges sind die Stützmaßnahmen deutlich ausgeprägter dimensioniert. Dies schlägt sich insbesondere durch den systematischen Einsatz von Spießen zur vorausseilenden Sicherung sowie durch Stützmittel direkt an der Ortsbrust (wie Ortsbrustanker oder Ortsbrustspritzbeton) ökobilanziell im Gesamtergebnis nieder (vgl. Tab. 6-10).

	 GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	disease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	5,07E+03	1,03E+04	3,61E+04	7,86E+03	1,68E+03	1,87E+02	5,48E-06	1,46E-04	2,99E+02	2,14E-03	1,01E+04
Innenschale	6,84E+03	5,71E+03	5,34E+04	1,00E+04	3,48E+03	5,57E+01	2,67E-06	2,17E-05	4,34E+02	3,17E-03	1,84E+04
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	1,19E+04	1,60E+04	8,95E+04	1,79E+04	5,16E+03	2,42E+02	8,15E-06	1,68E-04	7,34E+02	5,31E-03	2,85E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	8,03E+01	2,22E+00	1,12E+03	8,39E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,62E-07	7,70E-06	1,35E-01	5,48E-06	7,88E+01
Innenschale	1,59E+02	4,40E+00	2,22E+03	1,66E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,19E-07	1,53E-05	2,68E-01	1,09E-05	1,56E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	2,40E+02	6,62E+00	3,34E+03	2,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,08E-06	2,30E-05	4,03E-01	1,64E-05	2,35E+02
A5											
Ausbruch	1,32E+03	8,72E+01	1,63E+04	3,07E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,31E-05	4,82E-03	9,99E+00	2,70E-04	2,70E+03
Stützmaßnahmen	3,41E+03	6,06E+02	3,03E+04	5,81E+03	3,03E+01	1,79E+00	7,23E-06	5,99E-04	2,21E+02	1,55E-03	5,49E+03
Innenschale	8,49E+02	4,32E+01	7,92E+03	1,09E+03	6,21E+01	1,32E+00	9,17E-05	1,58E-04	5,85E+00	3,83E-05	3,68E+03
Deponie	1,82E+03	1,30E+03	3,80E+04	3,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	8,20E-06	6,45E-05	9,52E+00	2,35E-04	5,83E+04
Gerätetransport	3,29E+01	9,09E-01	4,58E+02	3,44E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,48E-07	3,15E-06	5,54E-02	2,25E-06	3,23E+01
Summe A5	7,43E+03	2,04E+03	9,30E+04	1,03E+04	9,24E+01	3,11E+00	1,60E-04	5,64E-03	2,46E+02	2,09E-03	7,02E+04
A1-A5											
Summe	1,96E+04	1,80E+04	1,86E+05	2,82E+04	5,25E+03	2,45E+02	1,70E-04	5,83E-03	9,80E+02	7,41E-03	9,89E+04

Tab. 6-10: Ergebnisse Bahntunnel 2-gleisig, leicht lösbar pro Tunnelmeter

Für den Systemabschnitt der leicht lösbaren Geologie bestimmen die Stützmaßnahmen sowie die Deponielogistik mit kumulierten Anteilen von ca. 4 ÷ 90 % maßgeblich das ökologische Gesamtprofil über alle drei Indikatoren hinweg. Bei den übrigen Parametern liefert der Ausbruch mit Werten zwischen 2 % (AP) und 9 % (GWP) noch nennenswerte Beiträge, wohingegen die Innenschalung mit etwa 9 % ausschließlich beim Treibhauspotenzial eine spürbare Relevanz besitzt (siehe Abb. 6-18).

Im Vergleich zur schwer- und mittel lösbaren Geologie, bei welcher der Sprengvortrieb maßgeblich durch das Zusammenspiel von Diesel und Sprengstoff inkl. Zünder geprägt ist, zeigt die Abb. 6-19 für die leicht lösbare Geologie die technologische Umstellung auf den reinen Baggervortrieb. Hierbei konzentrieren sich die ökobilanziellen Auswirkungen fast vollständig auf den Dieserverbrauch des Lösegeräts, welcher mit ca. $90 \div 96\%$ der Gesamtsumme über alle drei untersuchten Indikatoren hinweg die absolute quantitative Dominanz übernimmt. Da durch den Entfall des Sprengens keine materiellen und prozessualen Aufwendungen für das Abbohren und Laden der Ortsbrust mit Sprengstoff und Zünder anfallen, verbleiben diese Positionen konstant bei 0% . Bei den restlichen Parametern liefert lediglich der Strom weiterhin moderate Beiträge von etwa 4% (AP) bis 10% (PENRT), während die Einflüsse von Stahlverschleiß und Schmierstoffen mit maximal 1% im Vergleich zur Energie ökobilanziell vernachlässigbar bleiben.

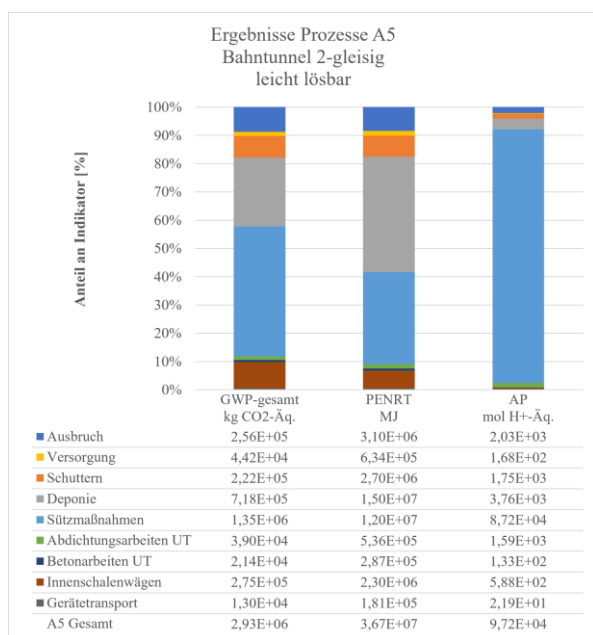


Abb. 6-18: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel
zweigleisig, leicht lösbar

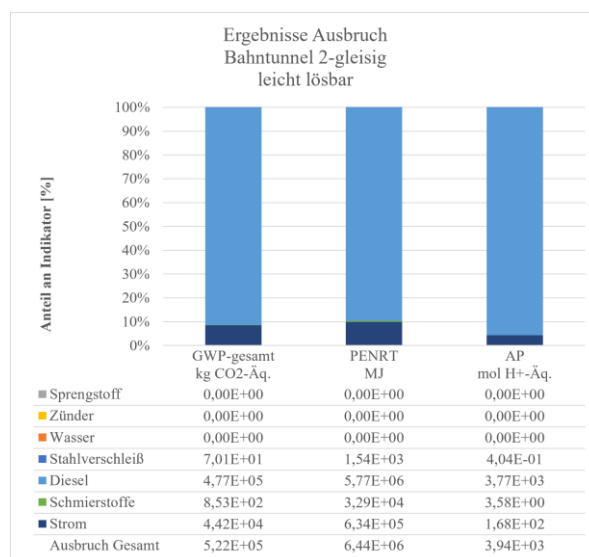


Abb. 6-19: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel
zweigleisig, leicht lösbar

In diesem Fall verteilen sich die ökobilanziellen Auswirkungen der Stützmaßnahmen bei dieser Geologiekategorie primär auf den Spritzbeton und den Ortsbrustspritzbeton, die mit zusammen ca. $63 \div 99\%$ der Gesamtsumme über alle drei untersuchten Umweltindikatoren und Phasen hinweg die Haupttreiber der Betrachtung bilden. Bei den restlichen Parametern zeigen sich vor allem für die (radialen) Anker relevante Beiträge von etwa 14% (GWP) bis 19% (PENRT), während sie beim AP mit lediglich 1% kaum ins Gewicht fallen. Die Bedeutung der Spieße tritt mit ca. $7 \div 10\%$ im Bereich des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs spürbar in Erscheinung, wohingegen die Bewehrung sowie die Bögen nur untergeordnete Wirkungen erzielen (hauptsächlich in A1-A3 und A4). Die Stützmittel an der Ortsbrust bewirken im Fall der Ortsbrustanker nur etwa 1% , jedoch bewirkt der Ortsbrustspritzbeton aufgrund der gesamten Allokation in der Errichtungsphase dort prozentuell den größten Anteil mit ca. 70%

für das Treibhauspotenzial. Durch die temporären Sicherungen verschiebt sich ebenfalls die Verteilung der Lebenszyklusphasen. So steigen Auswirkungen in der Phase A5 auf etwa 40 ÷ 45 % an und dementsprechend sinken die verbleibenden Anteile in A1-A3 sowie in A4.

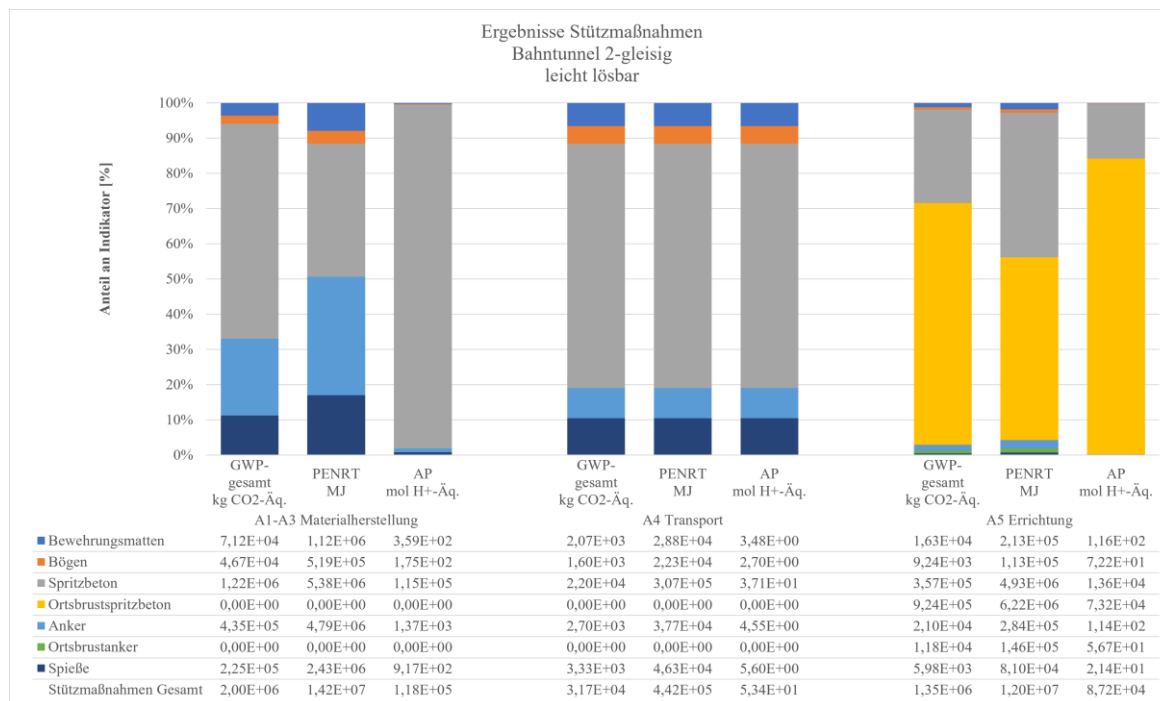


Abb. 6-20: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar

Die ökobilanziellen Auswirkungen der Innenschale (vgl. Abb. 6-21) stützen sich primär auf den Gewölbebeton, den in dieser Geologie eingesetzten Betonstahl für die Innenschale und das bewehrte Sohlgewölbe, die zusammen etwa 20 ÷ 44 % der Gesamtsumme über alle drei untersuchten Umweltindikatoren und Lebenszyklusphasen darstellen. Bei den restlichen Parametern zeigen sich vor allem für die weiteren Betonpositionen relevante Beiträge von bis zu 9 % (AP), während der Einfluss der Kunststoffdichtungsbahn mit ca. 9 % erneut vorwiegend im Bereich des Primärenergiebedarfs spürbar in Erscheinung tritt. Durch die erhöhten Auswirkungen aufgrund der Bewehrung steigen die prozentuellen Gewichtungen in den verbleibenden sowie transportierenden Phasen A1-A3 und A4, wobei speziell der Primärenergiebedarf in der Herstellungsphase sehr energieintensiv ausgeprägt ist. Lediglich in der Errichtungsphase erreicht der Abdichtungsträger erneut die höchsten Anteile aufgrund des aufwendigen Einbaus und der Zusatzmittel.

Die Herstellung, der Transport und die Deponierung der notwendigen Innenschalenwägen – im konkreten Fall der Bewehrungswägen, der Sohlgewölbe- und Gewölbeschalwägen, sowie der Nachbehandlungswägen – erreichen ca. 10 % der gesamten Innenschalenprozesse (A1-A5), obwohl diese wiederholend nur 1 bzw. 5 % an das Tunnelprojekt angerechnet werden.

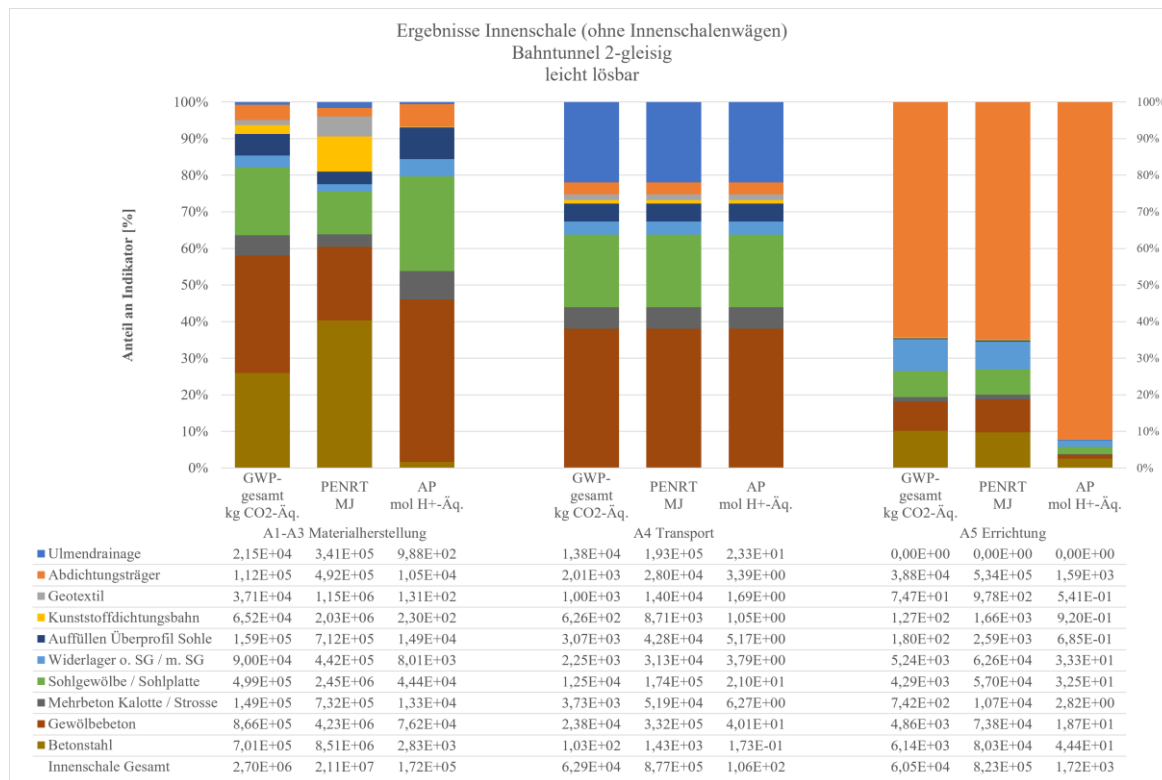


Abb. 6-21: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel zweigleisig, leicht lösbar

6.6.1.2 Bahntunnel eingleisig

Schwer lösbar

In der schwer lösaren Geologie ruft ein durchschnittlicher eingleisiger Bahntunnel etwa 4,37 Tonnen CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,14 t CO₂-Äq. während der Transportphase und 3,0 t CO₂-Äq. in der Bau-/ Errichtungsphase pro Tunnelmeter hervor. Betrachtet man den gesamten zyklischen Tunnelbau für diesen Meter, resultiert ein CO₂-Äq.-Fußabdruck von 7,5 Tonnen (vgl. Tab. 6-11). Wie bereits an früherer Stelle erwähnt, resultiert dieser Querschnitt methodisch aus der Mittelwertbildung des Regelquerschnitts (RQ) und des mit Einsatzfahrzeugen befahrbaren Querschlags (EQ). Infolgedessen weist dieses System über die einzelnen Phasen hinweg naturgemäß geringere absolute Kennwerte als der größere, zweigleisige Querschnitt auf, jedoch bestehen dadurch leichte Abweichungen in den zugrundeliegenden Parametern, Annahmen und Stützmaßnahmen etc.

Im Vergleich zum schwer lösaren Querschnitt des zweisepurigen Bahntunnels zeigt die Auswertung für den eingleisigen Bahntunnel in dieser Geologiekategorie ein grundsätzlich ähnliches, in Nuancen jedoch verschobenes ökologisches Ergebnis. Die Deponie bleibt auch beim kleineren Querschnitt der dominierende Haupttreiber, gewinnt jedoch beim Treibhauspotenzial und beim Primärenergiebedarf nochmals an relativem Gewicht. Der jeweilige Anteil steigt von 47 % auf 56 % bzw. von 60 % auf 69 %. Im Gegenzug verzeichnen die Stützmaßnahmen beim eingleisigen Tunnel einen leichten Rückgang der relativen Relevanz und sinken von vorher 22 % auf 13 % sowie von 17 % auf 10 %. Dies ist der geringeren

Stützmittelanzahl des Querschlags zuzuordnen, da jener aufgrund der geringeren Ausbruchsfläche das umliegende Gebirge weniger stört. Beim Versauerungspotenzial behaupten die Stützmaßnahmen mit ca. 52 % weiterhin die quantitative Dominanz, wenngleich sie auch hier unter dem Wert des zweispurigen Tunnels (66 %) verbleiben. Die verbleibenden Arbeitsschritte wie das Schuttern (max. 10 % beim GWP), der Ausbruch (max. 7 %) und die Innenschalung (max. 10 %) bewegen sich auf einem nahezu identischen, moderaten Niveau wie beim größeren Querschnitt (vgl. Abb. 6-22).

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	disease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,32E+03	2,50E+02	7,46E+03	1,43E+03	1,03E+02	9,60E+00	7,20E-07	9,89E-06	1,08E+02	7,62E-04	3,08E+03
Innenschale	3,04E+03	2,76E+03	1,90E+04	2,65E+03	5,02E+01	4,76E-01	3,88E-07	8,05E-06	2,55E+02	1,81E-03	6,77E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	4,37E+03	3,01E+03	2,65E+04	4,08E+03	1,53E+02	1,01E+01	1,11E-06	1,79E-05	3,63E+02	2,57E-03	9,85E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,28E+01	6,31E-01	3,18E+02	2,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-07	2,19E-06	3,84E-02	1,56E-06	2,24E+01
Innenschale	1,13E+02	3,12E+00	1,57E+03	1,18E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,09E-07	1,08E-05	1,90E-01	7,71E-06	1,11E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,36E+02	3,75E+00	1,89E+03	1,42E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,12E-07	1,30E-05	2,29E-01	9,27E-06	1,33E+02
A5											
Ausbruch	5,28E+02	6,35E+01	7,11E+03	1,57E+03	2,98E+00	5,51E+00	1,33E-05	1,20E-03	3,06E+00	6,87E-05	9,31E+02
Stützmaßnahmen	3,93E+02	4,21E+01	5,04E+03	1,08E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-06	9,86E-05	1,65E+01	1,11E-04	5,59E+02
Innenschale	3,75E+02	2,08E+01	3,56E+03	4,93E+02	3,04E+01	2,49E-01	5,50E-05	9,03E-05	2,97E+00	2,04E-05	8,75E+02
Deponie	1,69E+03	1,21E+03	3,52E+04	3,03E+02	0,00E+00	0,00E+00	7,61E-06	5,98E-05	8,84E+00	2,18E-04	5,41E+04
Gerätetransport	2,84E+01	7,85E-01	3,96E+02	2,97E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,28E-07	2,72E-06	4,78E-02	1,94E-06	2,79E+01
Summe A5	3,01E+03	1,33E+03	5,14E+04	3,45E+03	3,34E+01	5,76E+00	7,72E-05	1,46E-03	3,14E+01	4,20E-04	5,65E+04
A1-A5											
Summe	7,52E+03	4,34E+03	7,97E+04	7,54E+03	1,86E+02	1,58E+01	7,89E-05	1,49E-03	3,95E+02	3,00E-03	6,65E+04

Tab. 6-11: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, schwer lösbar pro Tunnelmeter

Die primären Treiberstrukturen des Sprengvortriebs bleiben nahezu unverändert. Das energetische und ökologische Profil wird weiterhin durch die Kombination aus Diesel und Sprengstoff dominiert, welche zusammen das System maßgeblich bestimmen (vgl. Abb. 6-23). Der Dieselmotorkraftstoff verzeichnet beim eingleisigen Querschnitt Werte von 51 % beim PENRT, bis zu 78 % beim Versauerungspotenzial und liegt damit auf einem fast identischen Niveau wie beim zweigleisigen Tunnel (dort ca. 50 ÷ 77 %). Auch der Sprengstoff behauptet seine Position als zweitstärkste Kraft mit etwa 30 % für GWP und PENRT. Geringfügige Verschiebungen im Bereich einzelner Prozentpunkte zeigen sich lediglich bei den restlichen Bestandteilen. Der Strombedarf trägt hier mit 5 ÷ 8 % (zweigleisig: 6 ÷ 9 %) bei, während die Zünder insbesondere beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf mit 8 % zu Buche schlagen. Die verbleibenden Positionen wie Stahlverschleiß, Wasser und Schmierstoffe verharren auch beim kleineren Querschnitt konstant an oder unter der Relevanzgrenze von 1 %. Daraus lässt sich schließen, dass die geometrische Verkleinerung des Ausbruchsquerschnitts im harten Fels zwar die absoluten Verbrauchsmengen reduziert, die verhältnismäßige Zusammensetzung der

spezifischen Aufwendungen pro Kubikmeter bzw. Tunnelmeter jedoch annähernd analog skaliert.

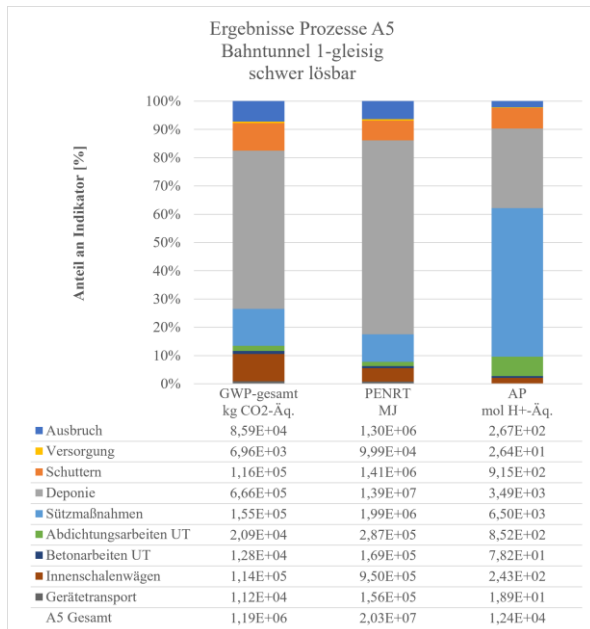


Abb. 6-22: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar

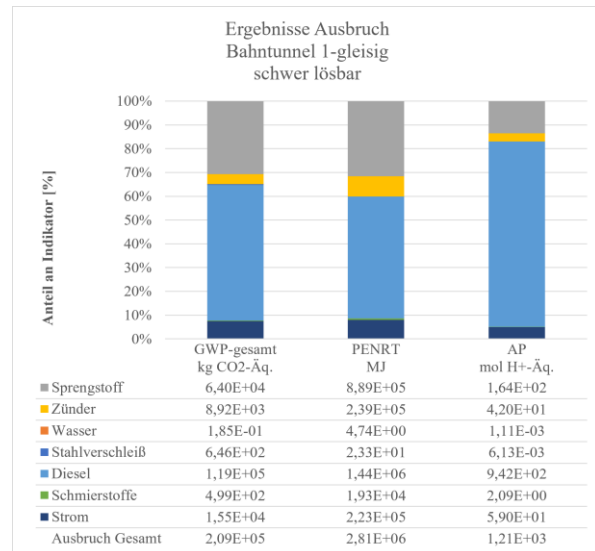


Abb. 6-23: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar

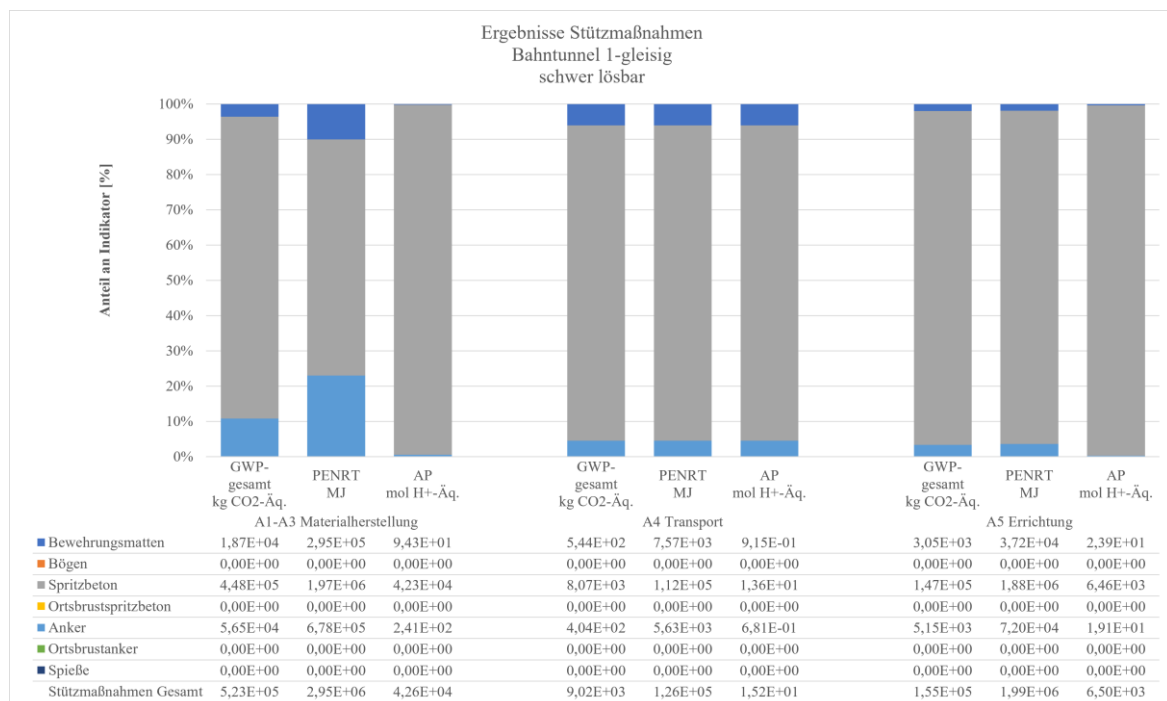


Abb. 6-24: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, schwerlösbar

Hinsichtlich der Stützmaßnahmen im Festgestein zeigt der direkte Vergleich zwischen dem eingleisigen Tunnelquerschnitt in Abb. 6-24 und dem größeren, zweigleisigen Pendant eine noch ausgeprägtere quantitative Konzentration auf die Hauptkomponenten. Während beim

zweigleisigen Tunnel der Spritzbeton bereits die dominierende Rolle einnimmt, verschärft sich diese Tendenz beim kleineren Querschnitt. Der ökologische Anteil steigt, über alle Phasen betrachtet, auf etwa 90 % beim GWP, 80 % beim PENRT und erreicht beim AP nahezu 99 %. Der Spritzbeton festigt seine Rolle als Haupttreiber und steigt beim kleineren Querschnitt auf signifikante 88 % beim GWP, 78 % beim PENRT und erreicht beim AP dominierende 99 %. Im Gegenzug geht die relative Bedeutung der Anker leicht auf 9 % (GWP) bzw. 15 % (PENRT) zurück. Die geringere Fläche des eingleisigen Tunnels verlangt nach weniger Verankerungen, wodurch sich der relative Fokus fast ausschließlich auf die flächige Spritzbetonsicherung verschiebt. Die übrigen Komponenten wie die Bewehrung (max. 7 % beim PENRT) verbleiben auf einem gewohnt untergeordneten Niveau.

Während beim großen Querschnitt der Gewölbebeton aufgrund der stärkeren Ausführung und der höheren Firsthöhe die ökobilanzielle Hauptlast mit deutlichem Abstand anführt, verschiebt sich das Verhältnis beim kleineren, eingleisigen Querschnitt hin zu einer fast exakten Gleichverteilung der Betonpositionen. Hier teilen sich der Gewölbebeton (33 % GWP) und die Sohlplatte (32 % GWP) die Umweltwirkungen zu nahezu gleichen Teilen auf, da das geometrische Verhältnis zwischen Ulmen- bzw. Gewölbebereich und der Sohle bei diesem kompakteren Querschnitt wesentlich ausgewogener ausfällt (vgl. Abb. 6-25).

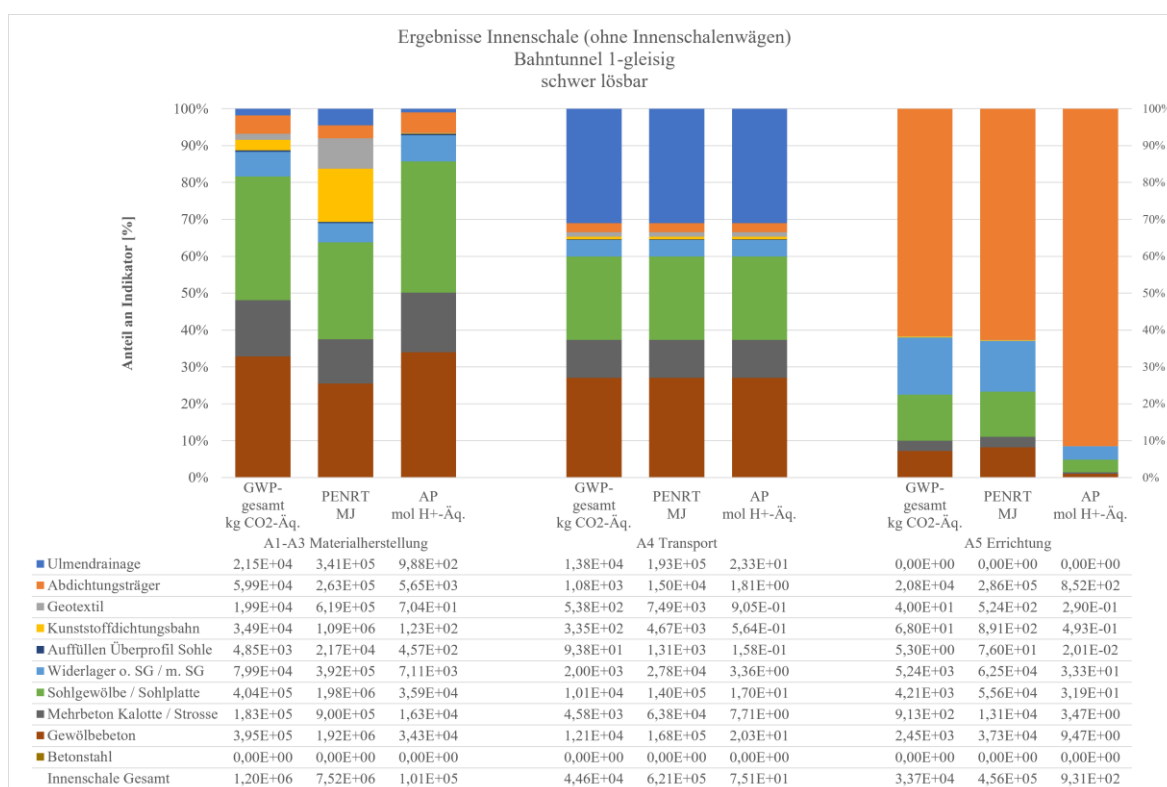


Abb. 6-25: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, schwer lösbar

Mittel lösbar

Die mittel lösbare Geologie bewirkt etwa 6,8 t CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,18 während der Transportphase und 3,4 in der Errichtungsphase pro tm. Der gesamte zyklische Tunnelbau für diesen Meter bewirkt einen CO₂-Äq.-Fußabdruck von 10,3 Tonnen (vgl. Tab. 6-12).

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM desease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,75E+03	1,02E+03	1,74E+04	3,04E+03	5,15E+02	2,94E+01	2,26E-06	3,14E-05	2,02E+02	1,44E-03	7,28E+03
Innenschale	4,00E+03	3,99E+03	2,53E+04	3,45E+03	5,13E+01	6,99E-01	4,96E-07	1,04E-05	3,37E+02	2,38E-03	8,68E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	6,75E+03	5,02E+03	4,27E+04	6,49E+03	5,66E+02	3,01E+01	2,76E-06	4,17E-05	5,39E+02	3,82E-03	1,60E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	4,73E+01	1,31E+00	6,58E+02	4,93E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E-07	4,53E-06	7,96E-02	3,23E-06	4,64E+01
Innenschale	1,34E+02	3,69E+00	1,86E+03	1,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,03E-07	1,28E-05	2,25E-01	9,13E-06	1,31E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,81E+02	5,00E+00	2,52E+03	1,89E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,16E-07	1,73E-05	3,05E-01	1,24E-05	1,78E+02
A5											
Ausbruch	6,48E+02	7,84E+01	8,74E+03	1,98E+03	3,73E+00	6,78E+00	1,62E-05	1,46E-03	3,74E+00	8,36E-05	1,16E+03
Stützmaßnahmen	7,41E+02	7,88E+01	9,62E+03	2,01E+03	1,57E-02	4,71E-04	3,20E-06	2,84E-04	2,93E+01	2,02E-04	1,04E+03
Innenschale	4,03E+02	2,42E+01	3,94E+03	6,00E+02	3,09E+01	2,49E-01	6,23E-05	9,80E-05	3,99E+00	2,78E-05	1,01E+03
Deponie	1,54E+03	1,10E+03	3,23E+04	2,77E+02	0,00E+00	0,00E+00	6,97E-06	5,48E-05	8,09E+00	2,00E-04	4,96E+04
Gerätetransport	2,84E+01	7,85E-01	3,96E+02	2,97E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,28E-07	2,72E-06	4,78E-02	1,94E-06	2,79E+01
Summe A5	3,37E+03	1,29E+03	5,50E+04	4,87E+03	3,47E+01	7,03E+00	8,87E-05	1,90E-03	4,52E+01	5,15E-04	5,28E+04
A1-A5											
Summe	1,03E+04	6,31E+03	1,00E+05	1,14E+04	6,00E+02	3,71E+01	9,23E-05	1,96E-03	5,85E+02	4,35E-03	6,90E+04

Tab. 6-12: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, mittel lösbar pro Tunnelmeter

Die Betrachtung der Prozesse in der Errichtungsphase liefert ein ähnliches Bild wie zuvor (vgl. Abb. 6-26). Die Deponielogistik bildet mit fast der Hälfte des Treibhauspotenzials und etwa 60 % beim Primärenergiebedarf fast exakt dieselben relativen Anteile wie beim zweigleisigen Tunnel. Die Stützmaßnahmen schlagen mit 22 % (GWP) und 18 % (PENRT) zu Buche und beim Versauerungspotenzial tragen diese mit 65 % die Hauptlast – auch diese Werte korrespondieren nahezu deckungsgleich mit den Resultaten des größeren Querschnitts. Die verbleibenden Prozessschritte wie das Schuttern, das Herstellen der Innenschale sowie der reine nehmen bei beiden Querschnittsgrößen eine gleichwertig moderate Nebenrolle ein, während die restlichen Hilfsprozesse kollektiv um oder unter der Schwelle von 2 % verbleiben.

Die ökobilanzielle Analyse für den Vortrieb des eingleisigen Tunnelquerschnitts (vgl. Abb. 6-27) präsentiert eine ausgeprägte Kontinuität zum zweigleisigen Pendant. Das ökologische Profil wird weiterhin primär durch den Dieselkraftstoff als dominierenden Haupttreiber bestimmt, dicht gefolgt vom Sprengstoff. Erneut bilden die Zünder und der Strom die restlichen relevanten Beiträge.

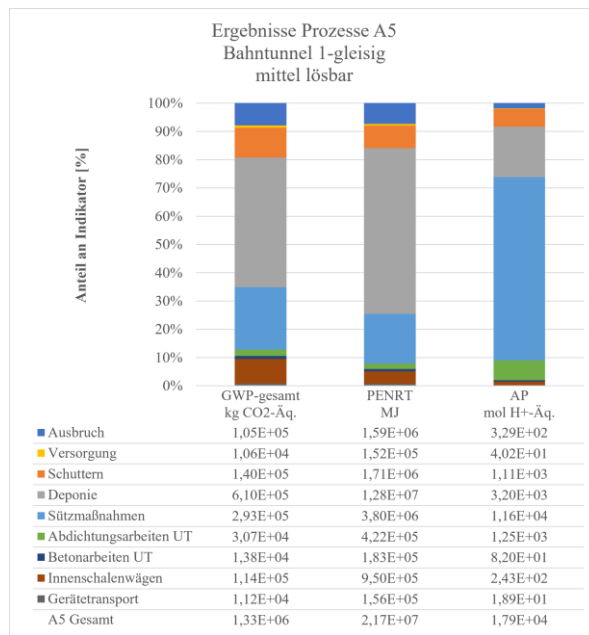


Abb. 6-26: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar

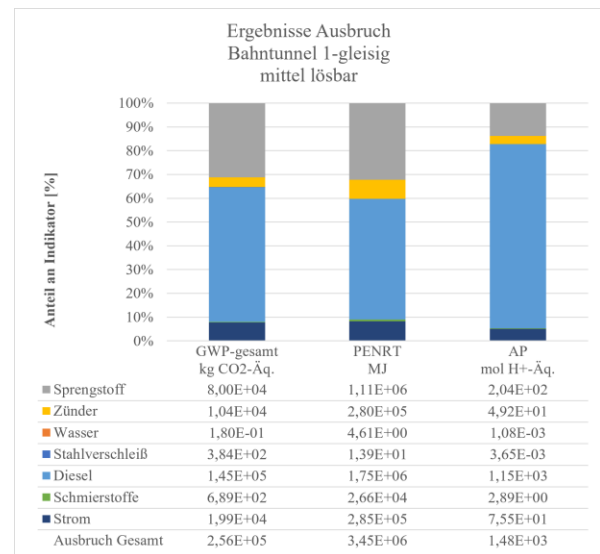


Abb. 6-27: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar

Der Spritzbeton dominiert das ökologische Profil der Stützmaßnahmen mit signifikanten 80 % beim GWP, 67 % beim PENRT und ca. 99 % beim AP. Im Gegensatz zum zweigleisigen Tunnel, bei dem die Anker aufgrund der größeren zu sichernden Fläche eine wesentlich ausgeprägtere relative Relevanz besitzen, geht ihr Anteil beim kleineren, kompakteren Querschnitt spürbar auf 13 % (GWP) bzw. 20 % (PENRT) zurück. Ein weiterer technologischer Unterschied zeigt sich bei den Bögen, die beim eingleisigen Querschnitt mit maximal 4 % (PENRT) nur noch eine marginale Nebenrolle einnehmen (vgl. Abb. 6-28).

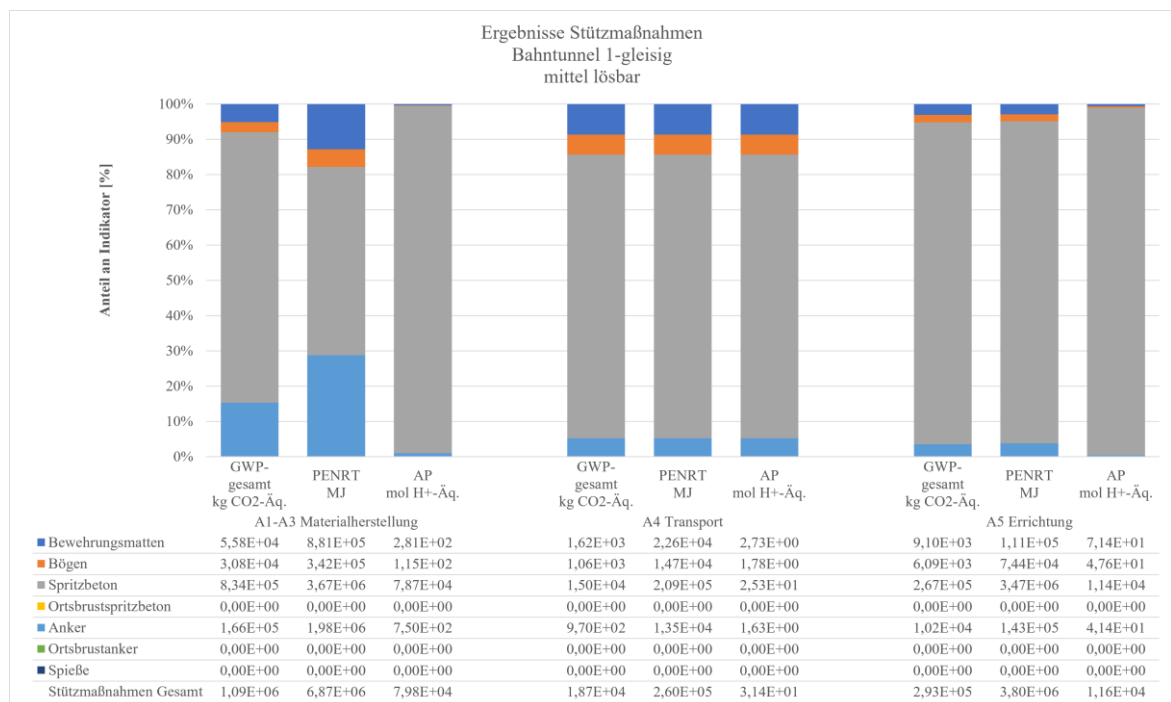


Abb. 6-28: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar

Die Innenschale des eingleisigen Tunnels ist fast ausschließlich durch die unbewehrten Betonkomponenten geprägt (vgl. Abb. 6-29). Anders als beim zweigleisigen Tunnel, wo der Gewölbebeton aufgrund der großen Mengen dominiert, zeigt sich hier ein ausgewogenes Verhältnis. Der Gewölbebeton (31 % GWP, 24 % PENRT) und das Sohlgewölbe (25 % GWP, 19 % PENRT) tragen die Umweltwirkungen zu fast gleichen Teilen. Zusammen mit dem Mehrbeton (15 % GWP) diktieren die reinen Betonmassen die Ökobilanz. Als einziger nennenswerter, polymerbasierter Faktor tritt die Kunststoffdichtungsbahn mit 14 % beim PENRT hervor, während alle übrigen Elemente eine untergeordnete Rolle einnehmen.

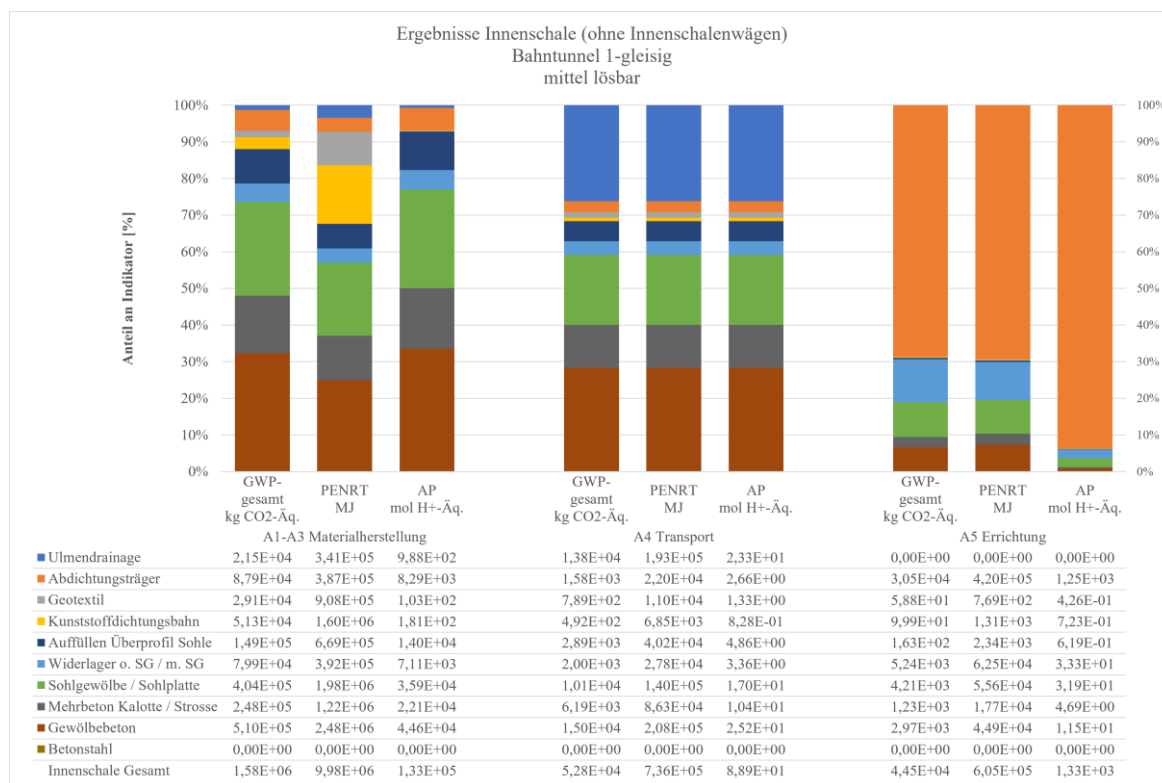


Abb. 6-29: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, mittel lösbar

Leicht lösbar

Für den zyklischen Tunnelvortrieb in der leicht lösbaren Geologie beläuft sich der ökologische Gesamtfußabdruck pro Tunnelmeter auf insgesamt 13,7 Tonnen CO₂-Äq. (vgl. Tab. 6-13). Während die Herstellungsphase mit etwa 8,8 t CO₂-Äq. zu Buche schlägt, steuern die transportlogistischen Prozesse einen Anteil von 0,19 t CO₂-Äq. bei. Die gesamte Bau- und Errichtungsphase vor Ort vervollständigt die Bilanz mit weiteren 4,7 t CO₂-Äq. pro Laufmeter.

Die prozessuale Verteilung der Phase A5 zeigt markante Abweichungen zum zweigleisigen Querschnitt, die primär aus dem veränderten Verhältnis von Ausbruchmasse zu baulicher Sicherung resultieren (vgl. Abb. 6-30). Im Gegensatz zum zweigleisigen Tunnel dominieren hier die Stützmaßnahmen mit signifikanten 43 % beim GWP und 87 % beim AP. Während der eigentliche Ausbruch und das Schuttern mit jeweils maximal 8 % bei beiden Größen auf einem

ähnlich moderaten Niveau verbleiben, nimmt die Innenschale beim eingleisigen Querschnitt mit bis zu 10 % (GWP) einen leicht höheren relativen Stellenwert ein.

		GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
		kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	desease inc.	-
A1-A3												
Ausbruch		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen		3,69E+03	6,80E+03	2,55E+04	5,56E+03	1,19E+03	1,37E+02	3,82E-06	1,01E-04	2,29E+02	1,64E-03	7,59E+03
Innenschale		5,13E+03	4,53E+03	4,04E+04	7,48E+03	2,58E+03	4,13E+01	1,98E-06	1,63E-05	3,25E+02	2,37E-03	1,38E+04
Deponie		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3		8,82E+03	1,13E+04	6,59E+04	1,30E+04	3,77E+03	1,78E+02	5,80E-06	1,17E-04	5,55E+02	4,01E-03	2,14E+04
A4												
Ausbruch		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen		6,08E+01	1,68E+00	8,47E+02	6,35E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,74E-07	5,83E-06	1,02E-01	4,15E-06	5,97E+01
Innenschale		1,30E+02	3,58E+00	1,81E+03	1,35E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,85E-07	1,24E-05	2,18E-01	8,85E-06	1,27E+02
Deponie		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4		1,90E+02	5,26E+00	2,65E+03	1,99E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,59E-07	1,83E-05	3,21E-01	1,30E-05	1,87E+02
A5												
Ausbruch		7,98E+02	5,34E+01	9,84E+03	1,96E+03	0,00E+00	0,00E+00	3,18E-05	2,89E-03	6,01E+00	1,62E-04	1,68E+03
Stützmaßnahmen		2,01E+03	3,38E+02	1,93E+04	4,27E+03	1,52E+01	8,95E-01	5,05E-06	4,27E-04	1,21E+02	8,43E-04	3,42E+03
Innenschale		6,13E+02	3,24E+01	5,79E+03	8,09E+02	4,54E+01	9,58E-01	6,75E-05	1,38E-04	4,57E+00	3,12E-05	2,66E+03
Deponie		1,26E+03	8,99E+02	2,63E+04	2,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	5,67E-06	4,46E-05	6,59E+00	1,63E-04	4,03E+04
Gerätetransport		3,12E+01	8,62E-01	4,35E+02	3,26E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,41E-07	2,99E-06	5,25E-02	2,13E-06	3,06E+01
Summe A5		4,70E+03	1,32E+03	6,16E+04	7,27E+03	6,06E+01	1,85E+00	1,10E-04	3,50E-03	1,38E+02	1,20E-03	4,81E+04
A1-A5												
Summe		1,37E+04	1,27E+04	1,30E+05	2,03E+04	3,83E+03	1,80E+02	1,17E-04	3,64E-03	6,93E+02	5,23E-03	6,97E+04

Tab. 6-13: Ergebnisse Bahntunnel 1-gleisig, leicht lösbar pro Tunnelmeter

Die Umweltwirkungen des Vortriebs konzentrieren sich gleichermaßen fast ausschließlich auf den Dieselmotorkraftstoff, der mit teilweise über 90 % den Haupttreiber abbildet (vgl. Abb. 6-31).

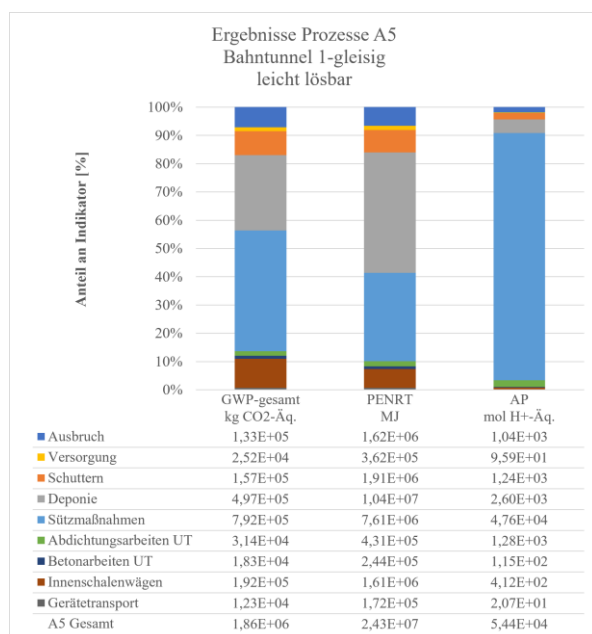


Abb. 6-30: Ergebnisse Prozesse A5, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar

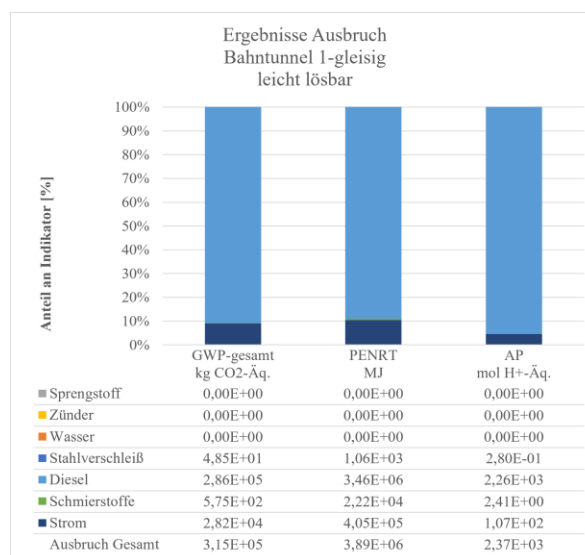


Abb. 6-31: Ergebnisse Ausbruch, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar

Das ökologische Profil der Stützmaßnahmen wird erneut durch den Spritzbeton und den Ortsbrustspritzbeton dominiert. Als relevanter stahlbasierter Faktor treten nun die Spieße etwa mit 8 % beim GWP hervor, welche dicht hinter den Ankern rangieren (vgl. Abb. 6-32).

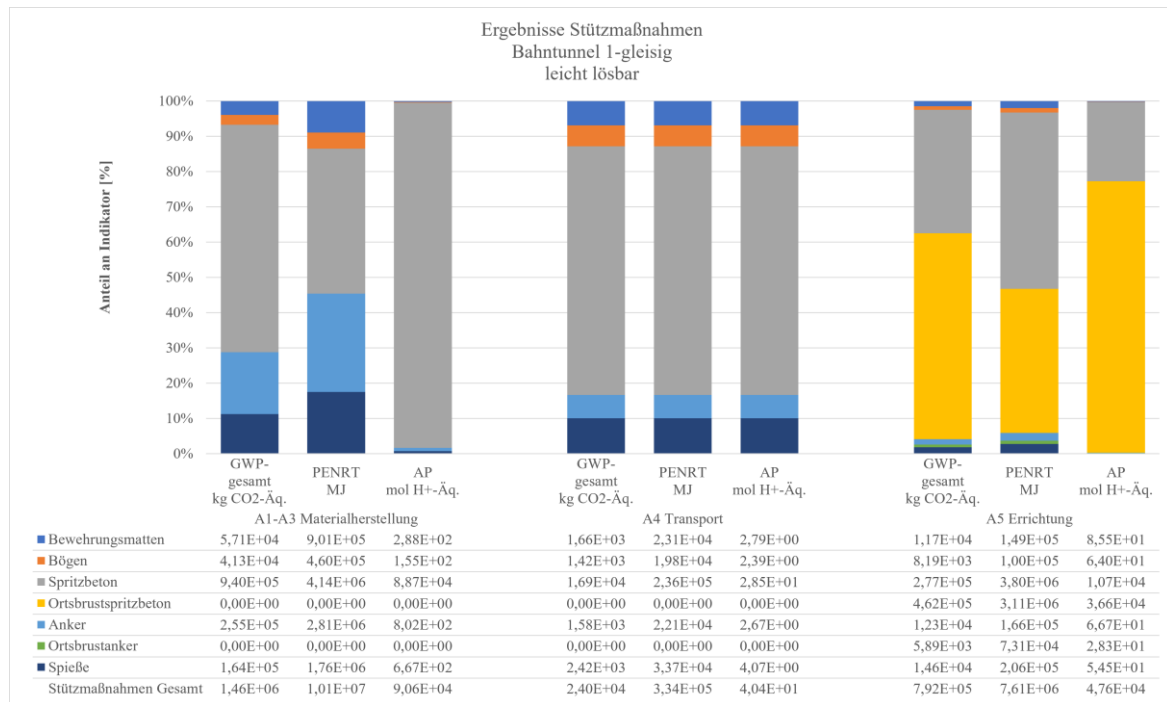


Abb. 6-32: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar

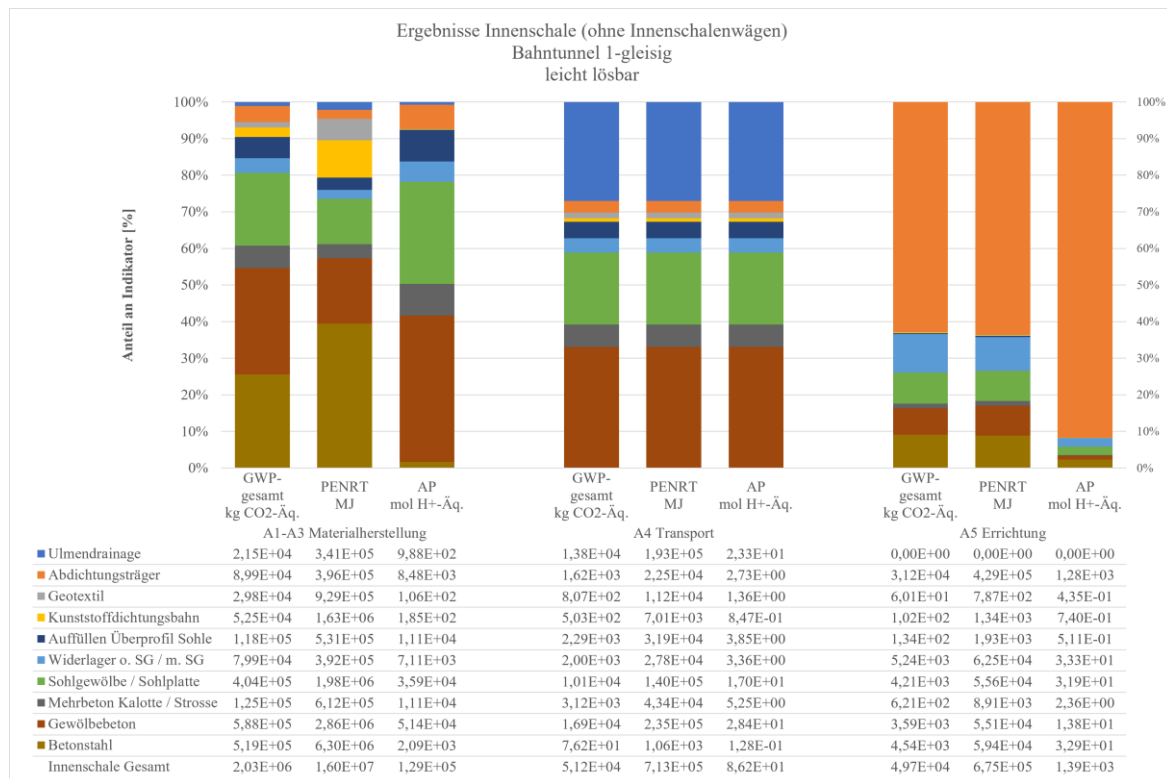


Abb. 6-33: Ergebnisse Innenschale, Bahntunnel eingleisig, leicht lösbar

In der leicht löslichen Geologie führt der notwendige Einbau einer statischen Bewehrung dazu, dass der Betonstahl mit 25 % beim GWP und 37 % beim PENRT in Abb. 6-33 zu einem dominierenden ökologischen Treiber der gesamten Innenschale aufsteigt.

6.6.2 Straßentunnel

6.6.2.1 Straßentunnel zweispurig

Für die Straßentunnel zeigen die Ergebnisse, dass die Verteilungen und prozessualen Gewichtungen der untersuchten Umweltindikatoren im Wesentlichen deckungsgleich mit den zuvor analysierten Zusammenhängen der Bahntunnel bleiben. Bei den Zahlen des zweispurigen Straßentunnels liegt der maßgebliche Unterschied ausschließlich in den absoluten Werten, welche aufgrund der differenten repräsentativen Länge des betrachteten Tunnelabschnitts – repräsentative Straßentunnellänge von 583 m statt 395 m bei den Bahntunneln – entsprechend höher ausfallen. Da die baubetrieblichen Rahmenbedingungen, Abläufe und Materialien etc. grundlegend gleich bleiben, gelten die o. g. Erklärungen, Ursachen usw. des zweigleisigen Bahntunnels sinngemäß auch für den zweispurigen Straßentunnel. Nur die „konstanten“ Anteile der Innenschalenwägen sowie der An- und Abtransport der Geräte fallen somit geringer aus.

Schwer lösbar

Der zweispurige Straßentunnel in schwer lösbarer Geologie bewirkt in den Phasen A1-A5 etwa 9,6 Tonnen CO₂-Äq. pro Tunnelmeter im Gegensatz zu den 9,7 Tonnen CO₂-Äq. des zweigleisigen Bahntunnels (vgl. Tab. 6-8 und Tab. 6-14).

		GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
		kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	disease inc.	-
A1-A3												
Ausbruch		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen		1,64E+03	3,89E+02	9,81E+03	1,82E+03	1,33E+02	1,36E+01	1,26E-06	1,73E-05	1,27E+02	9,02E-04	4,13E+03
Innenschale		3,82E+03	3,25E+03	2,35E+04	3,32E+03	5,06E+01	5,57E-01	4,88E-07	1,01E-05	3,22E+02	2,28E-03	8,53E+03
Deponie		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3		5,46E+03	3,64E+03	3,33E+04	5,14E+03	1,84E+02	1,42E+01	1,75E-06	2,74E-05	4,50E+02	3,18E-03	1,27E+04
A4												
Ausbruch		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen		2,73E+01	7,56E-01	3,81E+02	2,85E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,23E-07	2,62E-06	4,60E-02	1,87E-06	2,68E+01
Innenschale		1,32E+02	3,65E+00	1,84E+03	1,38E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,95E-07	1,27E-05	2,22E-01	9,01E-06	1,30E+02
Deponie		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport		0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4		1,59E+02	4,40E+00	2,22E+03	1,66E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,19E-07	1,53E-05	2,68E-01	1,09E-05	1,56E+02
A5												
Ausbruch		7,45E+02	9,23E+01	1,00E+04	2,80E+03	4,11E+00	7,46E+00	1,81E-05	1,63E-03	4,25E+00	9,39E-05	1,59E+03
Stützmaßnahmen		4,69E+02	5,09E+01	6,01E+03	1,40E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,32E-06	1,16E-04	1,95E+01	1,32E-04	7,27E+02
Innenschale		3,76E+02	2,24E+01	3,63E+03	5,66E+02	3,22E+01	3,03E-01	7,10E-05	9,31E-05	3,32E+00	2,31E-05	1,10E+03
Deponie		2,35E+03	1,68E+03	4,91E+04	4,21E+02	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-05	8,33E-05	1,23E+01	3,04E-04	7,53E+04
Gerätetransport		1,97E+01	5,43E-01	2,74E+02	2,05E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,86E-08	1,88E-06	3,31E-02	1,34E-06	1,93E+01
Summe A5		3,96E+03	1,85E+03	6,90E+04	5,19E+03	3,63E+01	7,76E+00	1,01E-04	1,93E-03	3,94E+01	5,54E-04	7,88E+04
A1-A5												
Summe		9,58E+03	5,49E+03	1,04E+05	1,03E+04	2,20E+02	2,19E+01	1,04E-04	1,97E-03	4,90E+02	3,75E-03	9,16E+04

Tab. 6-14: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, schwer lösbar pro Tunnelmeter

Der prozentuelle Anteil der Innenschalenwägen an den gesamten Innenschalenarbeiten über A1-A5 hinweg beträgt beim zweispurig Querschnitt nun etwas weniger mit ca. 9 %. Der Ab- und Abtransport der Geräte bleibt mit etwa 1 % in der Phase A5 untergeordnet (vgl. Abb. 6-34). Die Ausbruchverteilung in Abb. 6-35 bleibt im Grunde annähernd gleich wie jene des Bahntunnels. Die weiteren Zahlenwerte des zweispurigen Straßentunnels werden aufgrund der Similarität zum zweigleisigen Eisenbahntunnel somit durch Abbildungen präsentiert.

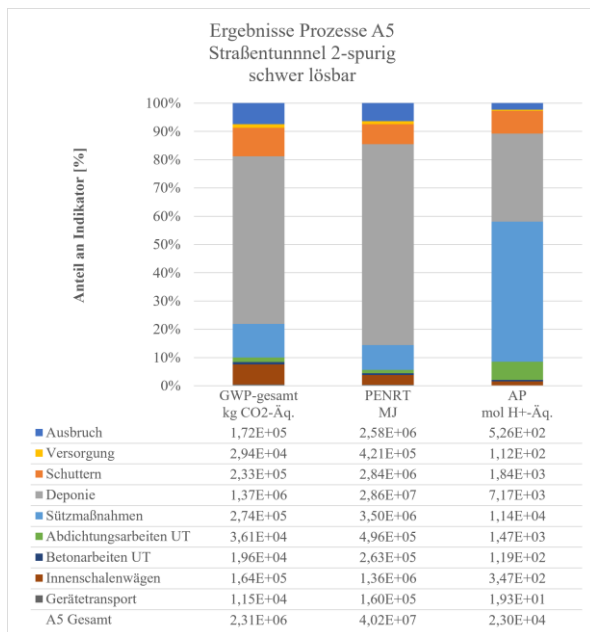


Abb. 6-34: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel
zweispurig, schwer lösbar

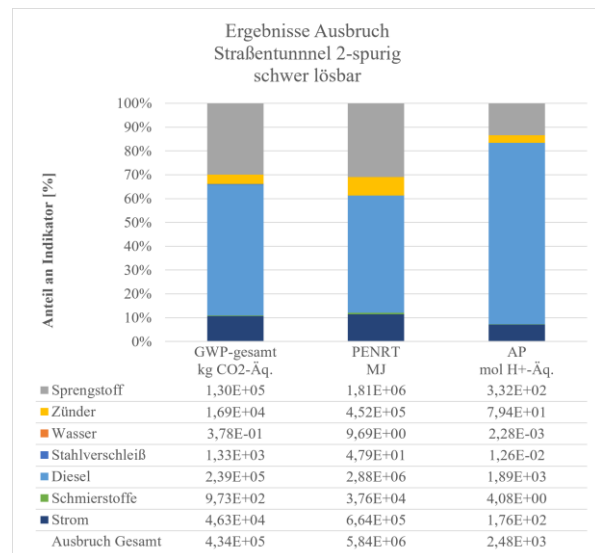


Abb. 6-35: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel
zweispurig, schwer lösbar

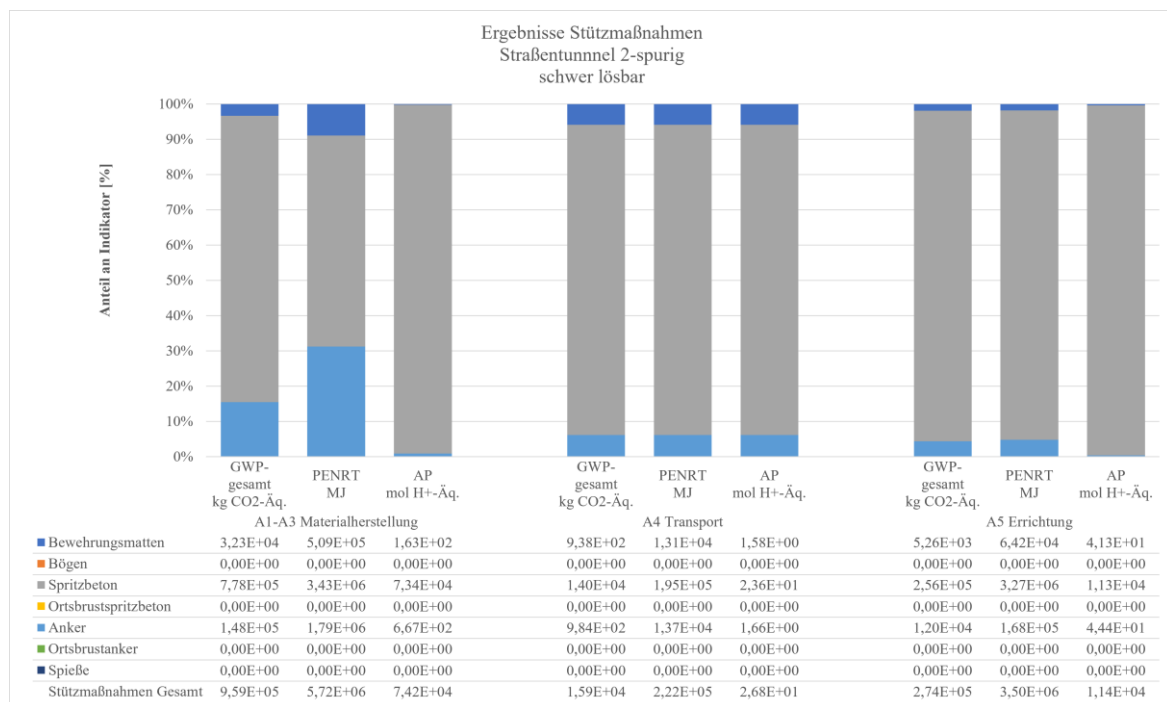


Abb. 6-36: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar

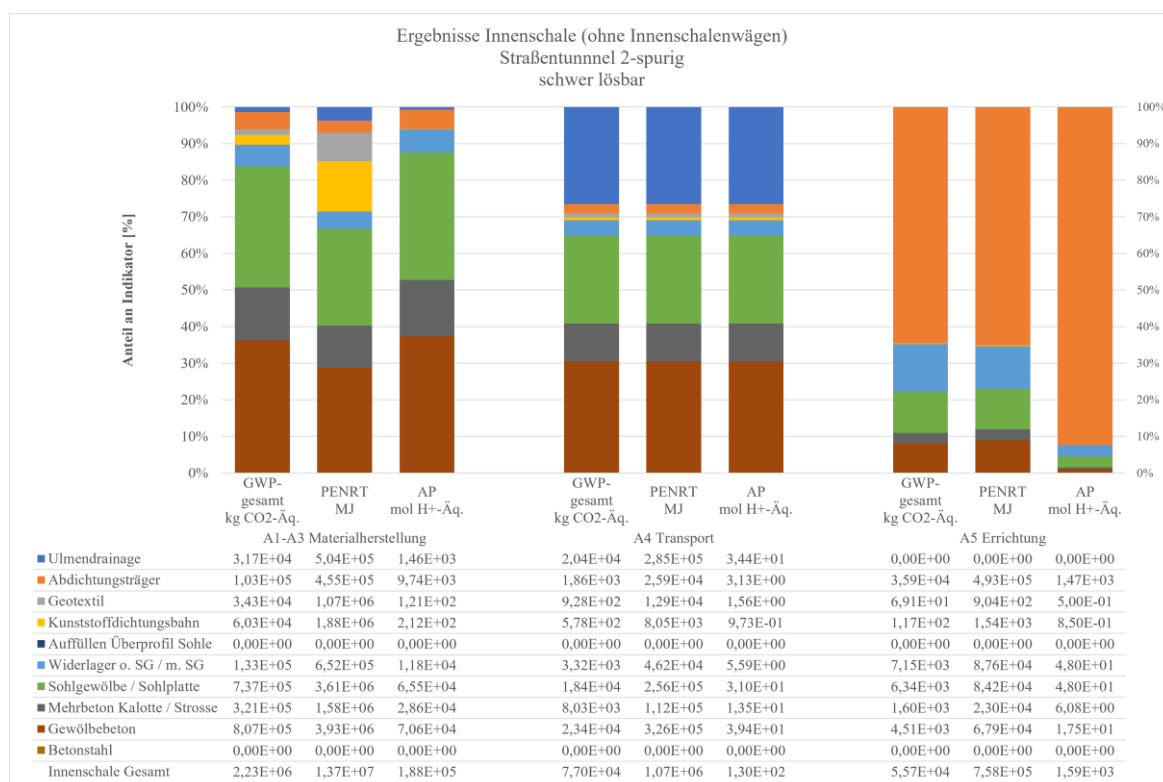


Abb. 6-37: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, schwer lösbar

Mittel lösbar

Der zweispurige Straßentunnel in der mittleren Geologie bewirkt in den Phasen A1-A5 etwa 13,8 Tonnen CO₂-Äq. pro Tunnelmeter (vgl. Tab. 6-9, großer Bahntunnel ca. 14,0 t CO₂-Äq.).

	GWP- gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ - Äq.	m ³ Welt- Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ - Äq.	desease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stütz- maßnahmen	3,79E+03	1,69E+03	2,42E+04	4,23E+03	6,79E+02	3,86E+01	3,26E-06	4,69E-05	2,74E+02	1,95E-03	9,91E+03
Innenschale	5,24E+03	4,94E+03	3,25E+04	4,50E+03	5,20E+01	8,59E-01	6,51E-07	1,36E-05	4,44E+02	3,14E-03	1,14E+04
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	9,03E+03	6,63E+03	5,67E+04	8,73E+03	7,31E+02	3,95E+01	3,91E-06	6,05E-05	7,18E+02	5,09E-03	2,13E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stütz- maßnahmen	6,36E+01	1,76E+00	8,86E+02	6,64E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,87E-07	6,10E-06	1,07E-01	4,34E-06	6,24E+01
Innenschale	1,63E+02	4,51E+00	2,27E+03	1,70E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,36E-07	1,56E-05	2,75E-01	1,11E-05	1,60E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	2,27E+02	6,27E+00	3,16E+03	2,37E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,02E-06	2,17E-05	3,82E-01	1,55E-05	2,23E+02
A5											
Ausbruch	9,36E+02	1,18E+02	1,26E+04	3,78E+03	5,20E+00	9,31E+00	2,23E-05	2,02E-03	5,31E+00	1,16E-04	2,11E+03
Stütz- maßnahmen	1,03E+03	1,10E+02	1,32E+04	2,83E+03	3,13E-02	9,42E-04	4,15E-06	3,68E-04	4,21E+01	2,89E-04	1,50E+03
Innenschale	4,14E+02	2,71E+01	4,15E+03	7,28E+02	3,31E+01	3,03E-01	8,45E-05	1,04E-04	4,71E+00	3,31E-05	1,33E+03
Deponie	2,19E+03	1,57E+03	4,58E+04	3,94E+02	0,00E+00	0,00E+00	9,89E-06	7,78E-05	1,15E+01	2,84E-04	7,04E+04
Gerätetransport	1,97E+01	5,43E-01	2,74E+02	2,05E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,86E-08	1,88E-06	3,31E-02	1,34E-06	1,93E+01
Summe A5	4,59E+03	1,82E+03	7,60E+04	7,73E+03	3,84E+01	9,61E+00	1,21E-04	2,57E-03	6,36E+01	7,23E-04	7,53E+04
A1-A5											
Summe	1,38E+04	8,46E+03	1,36E+05	1,65E+04	7,70E+02	4,91E+01	1,26E-04	2,65E-03	7,82E+02	5,83E-03	9,68E+04

Tab. 6-15: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, mittel lösbar pro Tunnelmeter

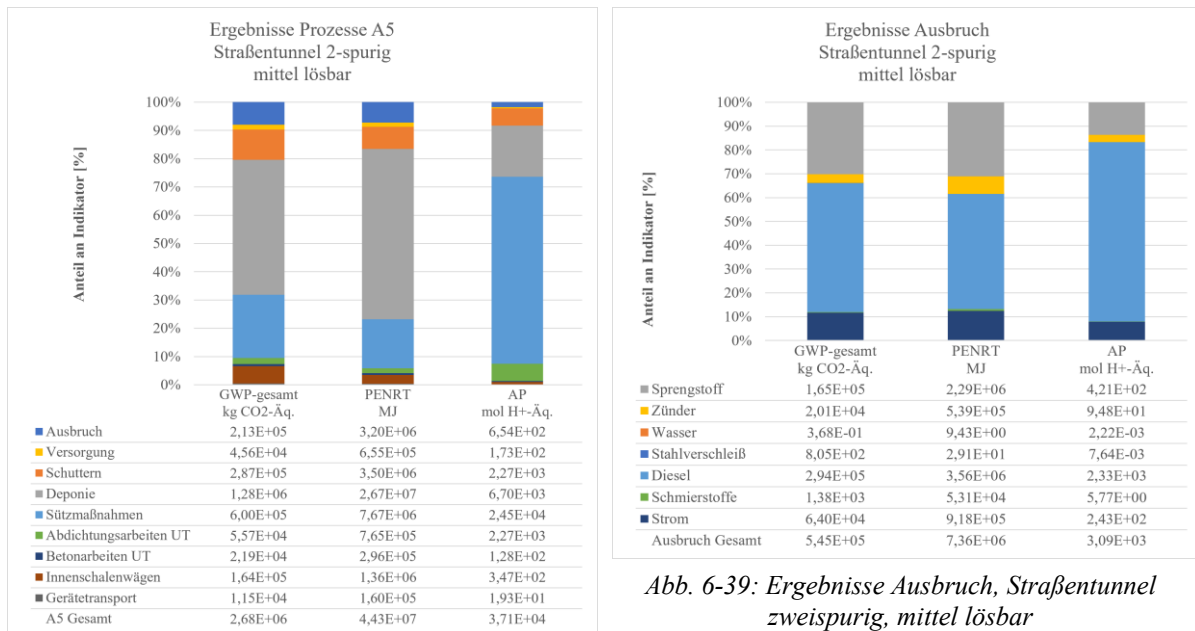


Abb. 6-38: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar

Abb. 6-39: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar

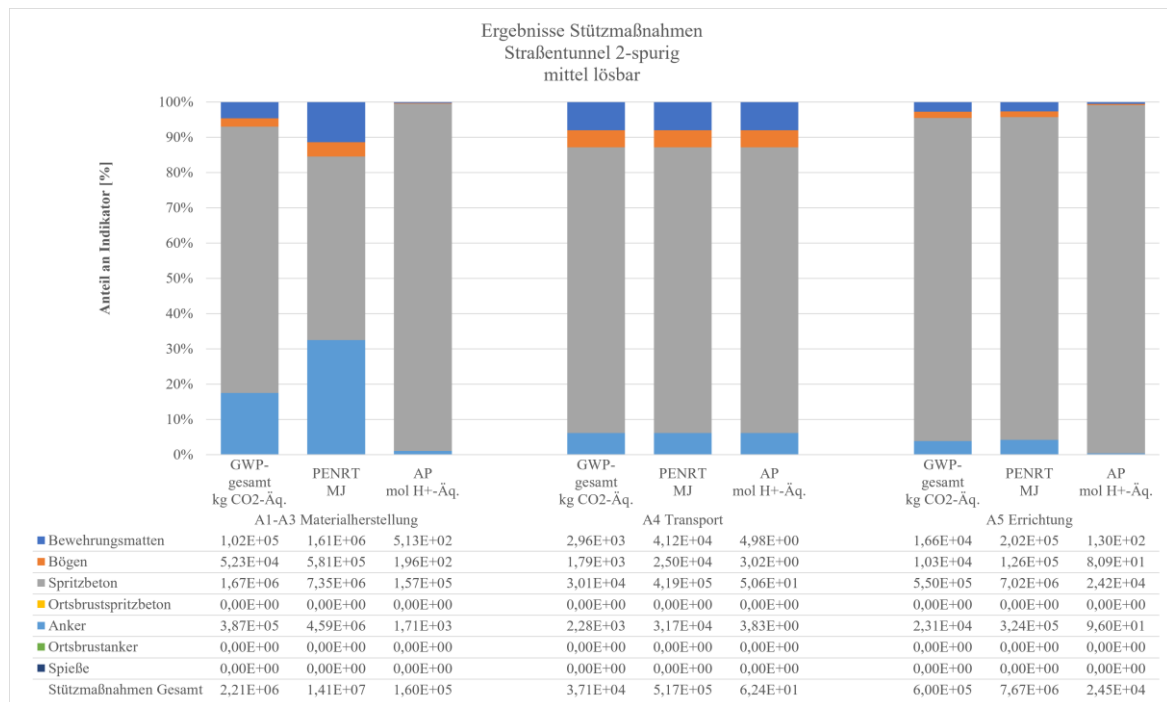


Abb. 6-40: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar

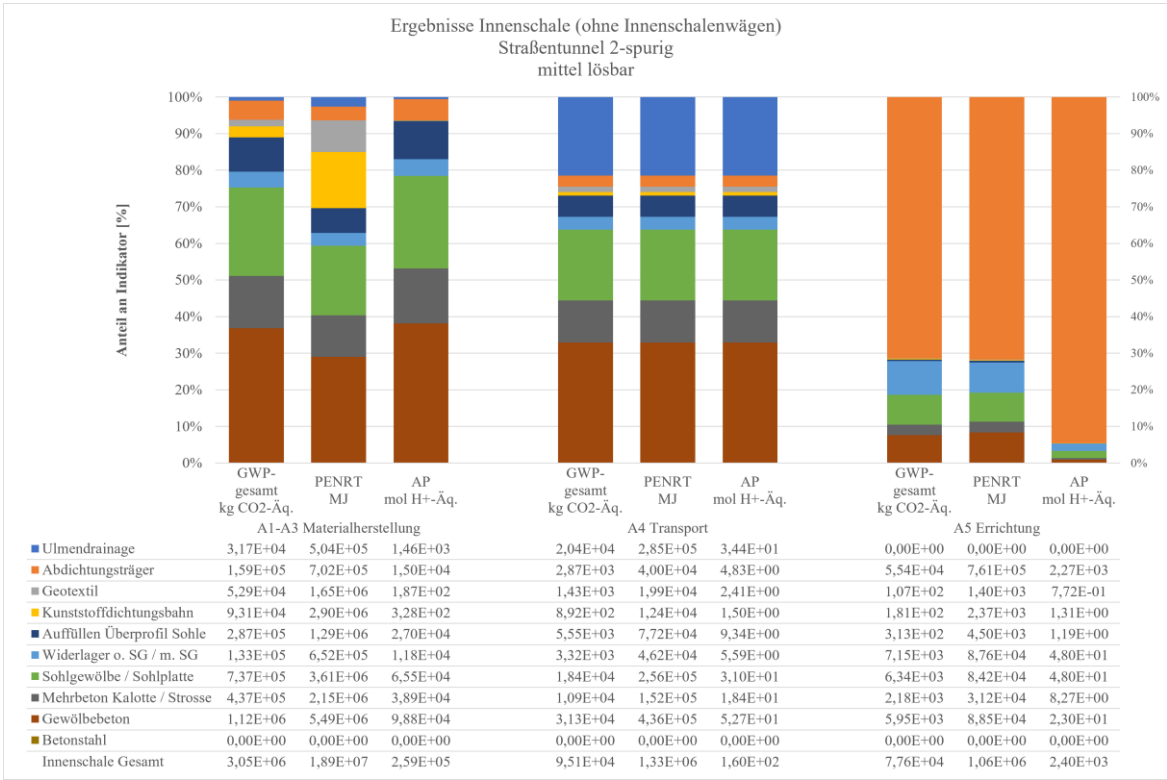


Abb. 6-41: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, mittel lösbar

Leicht lösbar

Die Umweltwirkungen der leicht lösbaren Geologie bewegen sich pro tm auf einem ähnlichen Niveau wie jene des zweigleisigen Bahntunnels (Tab. 6-16: 19,4 zu 19,6 t CO₂-Äq.).

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	disease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	5,07E+03	1,03E+04	3,61E+04	7,86E+03	1,68E+03	1,87E+02	5,48E-06	1,46E-04	2,99E+02	2,14E-03	1,01E+04
Innenschale	6,84E+03	5,71E+03	5,34E+04	1,00E+04	3,48E+03	5,57E+01	2,67E-06	2,17E-05	4,34E+02	3,17E-03	1,84E+04
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	1,19E+04	1,60E+04	8,95E+04	1,79E+04	5,16E+03	2,42E+02	8,15E-06	1,68E-04	7,34E+02	5,31E-03	2,85E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	8,03E+01	2,22E+00	1,12E+03	8,39E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,62E-07	7,70E-06	1,35E-01	5,48E-06	7,88E+01
Innenschale	1,59E+02	4,40E+00	2,22E+03	1,66E+01	0,00E+00	0,00E+00	7,19E-07	1,53E-05	2,68E-01	1,09E-05	1,56E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	2,40E+02	6,62E+00	3,34E+03	2,50E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,08E-06	2,30E-05	4,03E-01	1,64E-05	2,35E+02
A5											
Ausbruch	1,41E+03	1,07E+02	1,75E+04	5,26E+03	0,00E+00	0,00E+00	5,31E-05	4,82E-03	1,03E+01	2,72E-04	3,79E+03
Stützmaßnahmen	3,41E+03	6,06E+02	3,03E+04	5,81E+03	3,03E+01	1,79E+00	7,23E-06	5,99E-04	2,21E+02	1,55E-03	5,49E+03
Innenschale	6,24E+02	3,56E+01	6,03E+03	9,50E+02	4,73E+01	9,89E-01	9,16E-05	1,57E-04	5,37E+00	3,77E-05	2,95E+03
Deponie	1,82E+03	1,30E+03	3,80E+04	3,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	8,20E-06	6,45E-05	9,52E+00	2,35E-04	5,83E+04
Gerätetransport	2,25E+01	6,21E-01	3,13E+02	2,35E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,01E-07	2,15E-06	3,78E-02	1,53E-06	2,21E+01
Summe A5	7,28E+03	2,05E+03	9,22E+04	1,24E+04	7,76E+01	2,78E+00	1,60E-04	5,64E-03	2,46E+02	2,09E-03	7,06E+04
A1-A5											
Summe	1,94E+04	1,80E+04	1,85E+05	3,03E+04	5,23E+03	2,45E+02	1,70E-04	5,83E-03	9,80E+02	7,42E-03	9,93E+04

Tab. 6-16: Ergebnisse Straßentunnel 2-spurig, leicht lösbar pro Tunnelmeter

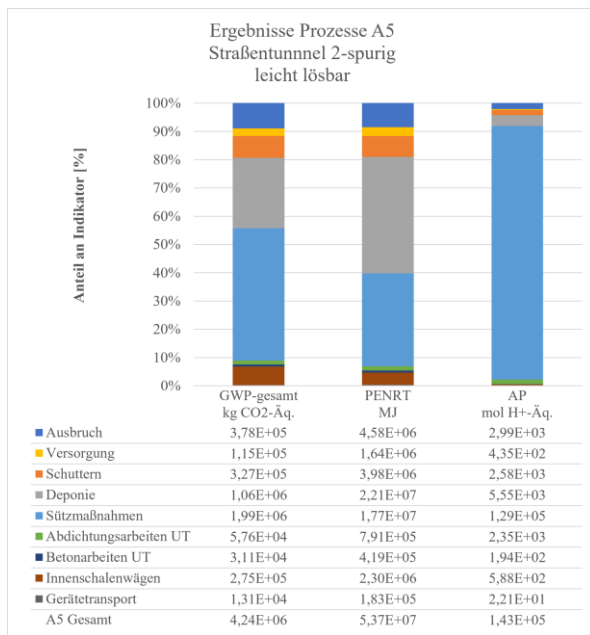


Abb. 6-42: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel
zweispurig, leicht lösbar

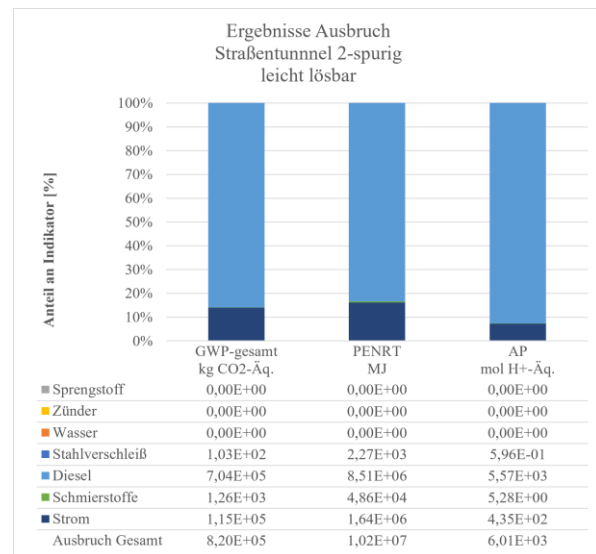


Abb. 6-43: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel
zweispurig, leicht lösbar

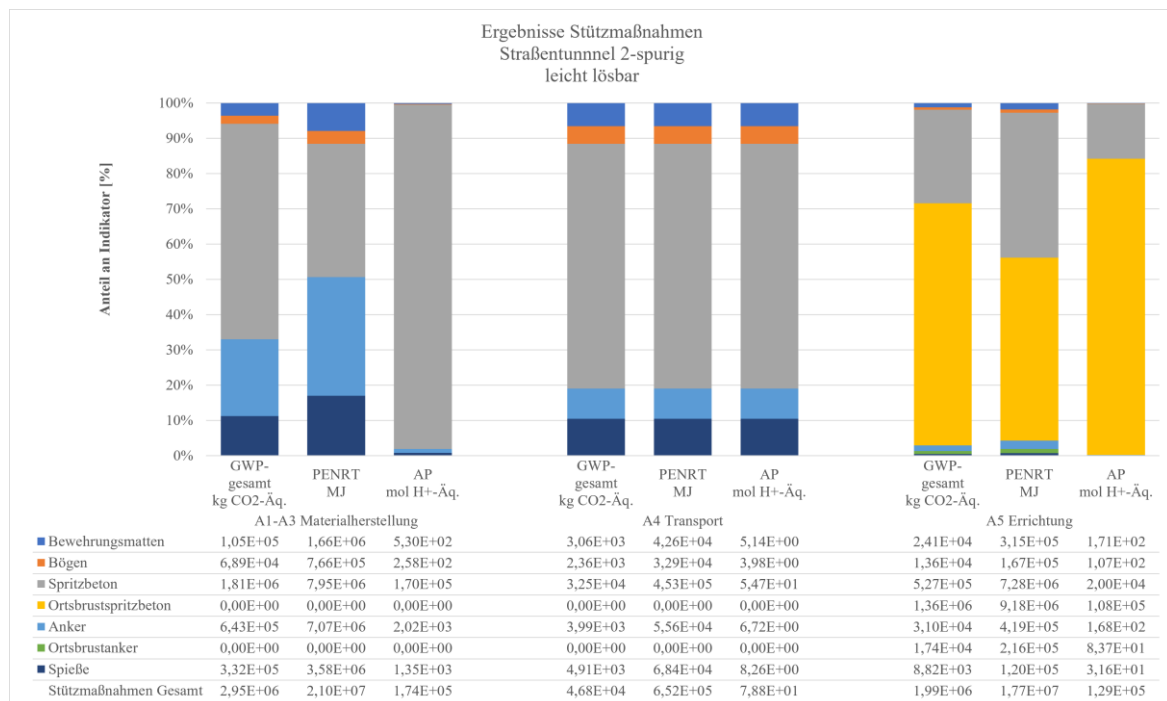


Abb. 6-44: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar

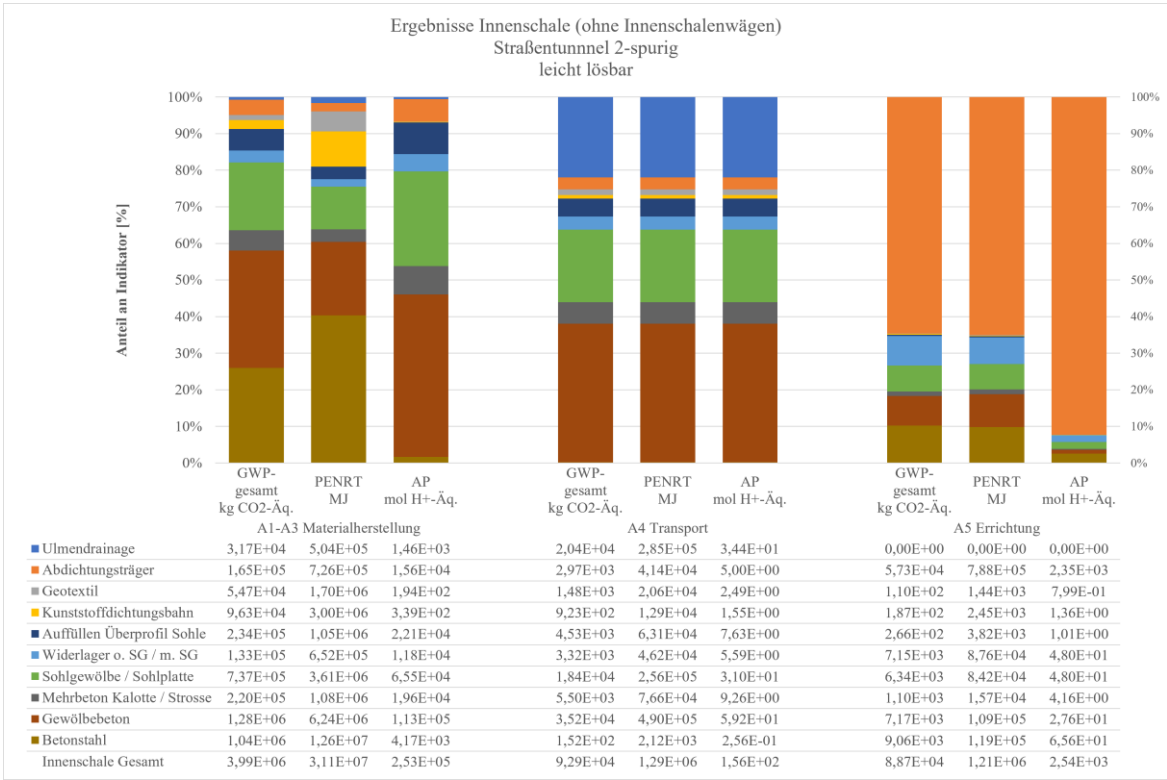


Abb. 6-45: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel zweispurig, leicht lösbar

6.6.2.2 Straßentunnel einspurig

In analoger Weise lässt sich die vergleichende Systematik auch auf den einspurigen Querschnitt übertragen. So entspricht der einspurige Straßentunnel in seiner materialspezifischen und prozessualen Charakteristik dem eingleisigen Bahntunnel, sodass auch in diesem Fall die grundlegenden ökologischen Verteilungsmuster und Wirkungsmechanismen direkt übertragbar sind und die Abweichungen primär aus den geometrischen und projektspezifischen Längenunterschieden resultieren. Die folgenden Beschreibungen des einspurigen Tunnels in allen drei abgebildeten Geologiekategorien stützen sich auf die zuvor erläuterten Zusammenhänge des eingleisigen Bahntunnels und werden somit nur mehr qualitativ beschrieben.

Schwer lösbar

Der zyklische Tunnelbau eines einspurigen Straßentunnels im Festgestein der schwer lösbaren Geologie generiert pro Laufmeter ein Treibhauspotenzial von summiert 7,43 Tonnen CO₂-Äq. Beim Aufschlüsseln dieses ökologischen Profils nach den Lebenszyklusstadien entfällt das Hauptgewicht mit etwa 4,4 Tonnen CO₂-Äq. auf die vorgelagerte Materialherstellung. Die straßengebundene Transportlogistik der Materialien mittels Lkw schlägt mit 0,14 t CO₂-Äq. zu Buche, wohingegen die verfahrenstechnischen Prozesse der eigentlichen Errichtungsphase vor Ort die Bilanz um zusätzliche 2,9 t CO₂-Äq. je Tunnelmeter ergänzen (vgl. Tab. 6-17).

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	desease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,32E+03	2,50E+02	7,46E+03	1,43E+03	1,03E+02	9,60E+00	7,20E-07	9,89E-06	1,08E+02	7,62E-04	3,08E+03
Innenschale	3,04E+03	2,76E+03	1,90E+04	2,65E+03	5,02E+01	4,76E-01	3,88E-07	8,05E-06	2,55E+02	1,81E-03	6,77E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	4,37E+03	3,01E+03	2,65E+04	4,08E+03	1,53E+02	1,01E+01	1,11E-06	1,79E-05	3,63E+02	2,57E-03	9,85E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,28E+01	6,31E-01	3,18E+02	2,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,03E-07	2,19E-06	3,84E-02	1,56E-06	2,24E+01
Innenschale	1,13E+02	3,12E+00	1,57E+03	1,18E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,09E-07	1,08E-05	1,90E-01	7,71E-06	1,11E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,36E+02	3,75E+00	1,89E+03	1,42E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,12E-07	1,30E-05	2,29E-01	9,27E-06	1,33E+02
A5											
Ausbruch	5,48E+02	6,82E+01	7,40E+03	2,09E+03	2,98E+00	5,51E+00	1,33E-05	1,20E-03	3,14E+00	6,93E-05	1,19E+03
Stützmaßnahmen	3,93E+02	4,21E+01	5,04E+03	1,08E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,12E-06	9,86E-05	1,65E+01	1,11E-04	5,59E+02
Innenschale	2,81E+02	1,78E+01	2,78E+03	4,51E+02	2,46E+01	2,49E-01	5,50E-05	9,01E-05	2,77E+00	2,03E-05	8,73E+02
Deponie	1,69E+03	1,21E+03	3,52E+04	3,03E+02	0,00E+00	0,00E+00	7,61E-06	5,98E-05	8,84E+00	2,18E-04	5,41E+04
Gerätetransport	1,93E+01	5,34E-01	2,69E+02	2,02E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,72E-08	1,85E-06	3,25E-02	1,32E-06	1,90E+01
Summe A5	2,93E+03	1,33E+03	5,07E+04	3,92E+03	2,76E+01	5,76E+00	7,71E-05	1,45E-03	3,12E+01	4,20E-04	5,68E+04
A1-A5											
Summe	7,43E+03	4,34E+03	7,91E+04	8,02E+03	1,81E+02	1,58E+01	7,88E-05	1,49E-03	3,95E+02	3,00E-03	6,68E+04

Tab. 6-17: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, schwer lösbar pro Tunnelmeter

Bei den prozentuellen Verteilungen des einspurigen Straßentunnels über die drei Indikatoren hinweg dominiert die Deponie des Materials, wobei die Energieverbräuche für das Schuttern, das Herstellen der Stützmaßnahmen sowie für den Ausbruch selbst die anderen relevanten Emittenten darstellen (vgl. Abb. 6-46). Die Ausbruchverteilung wird maßgeblich durch den Diesel- und Sprengstoffbedarf bestimmt (vgl. Abb. 6-47).

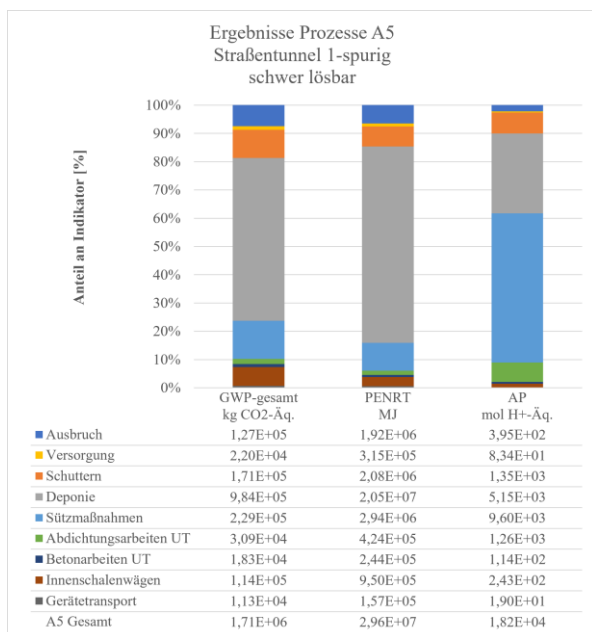


Abb. 6-46: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar

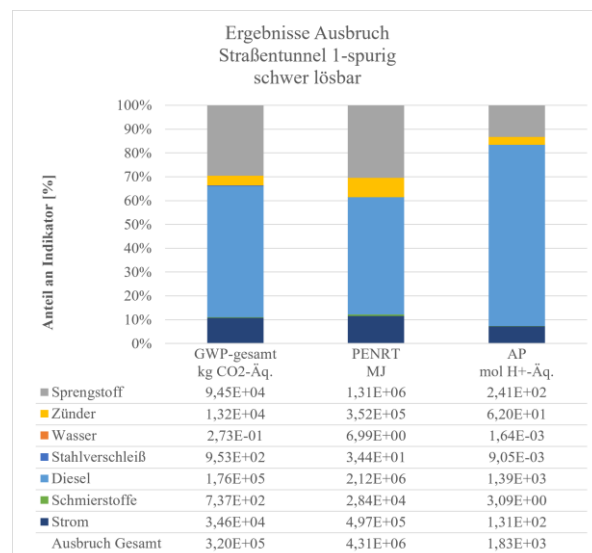


Abb. 6-47: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar

Die ökologischen Auswirkungen der Stützmaßnahmen werden ebenfalls vor allem durch die zementösen und energetischen Aufwendungen des Spritzbetons bestimmt (vgl. Abb. 6-48).

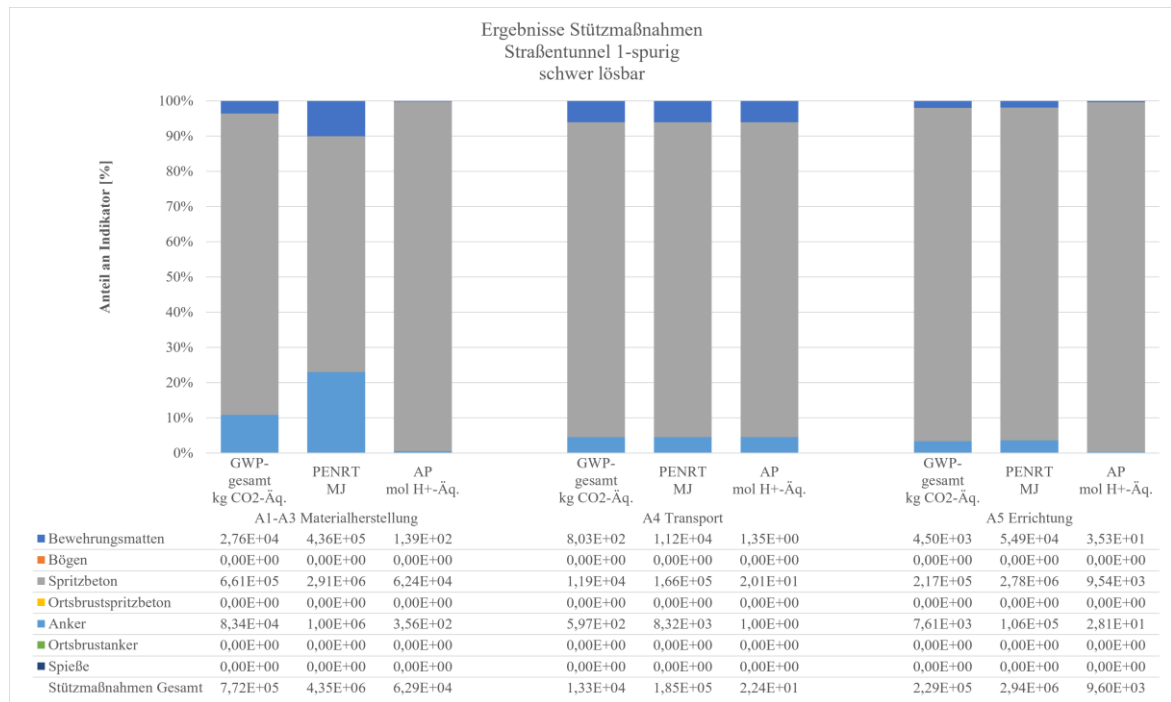


Abb. 6-48: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar

Sehr ähnliche Ergebnisse ergeben sich für die Verteilungen der Innenschale (vgl. Abb. 6-49).

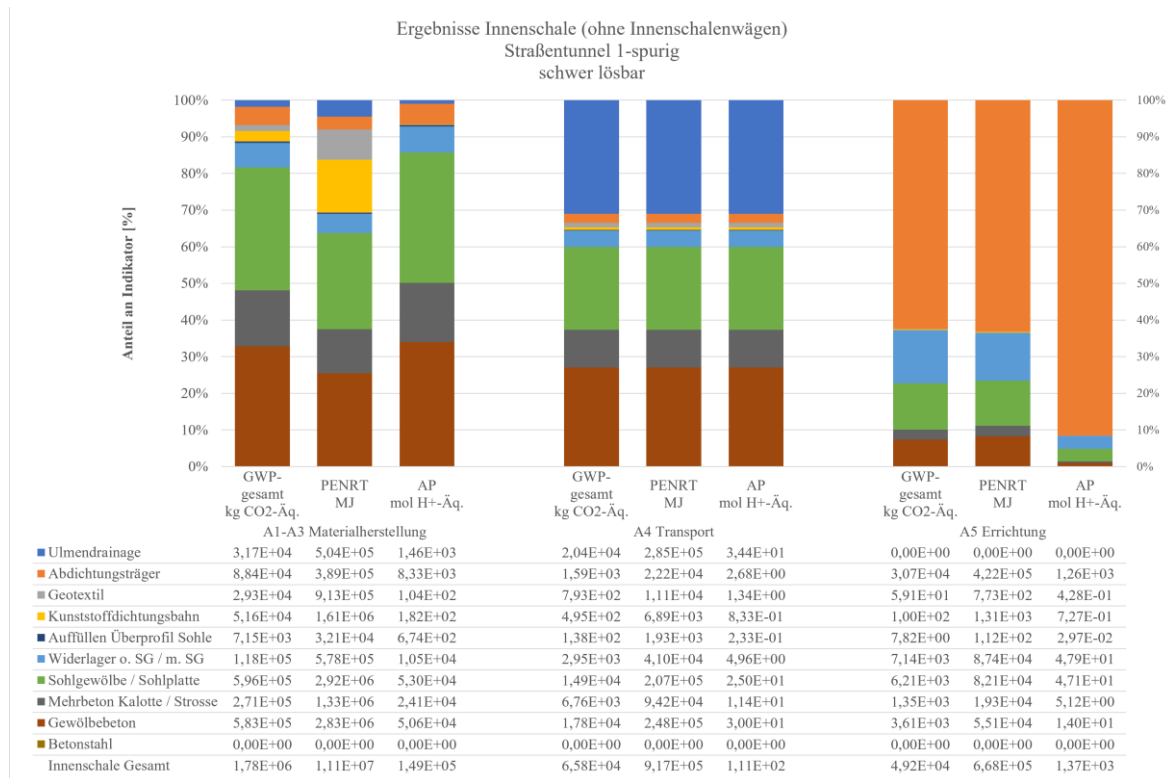


Abb. 6-49: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, schwer lösbar

Mittel lösbar

Für den einspurigen Straßentunnel in mittlerer Geologie beläuft sich das Treibhauspotenzial lt. Tab. 6-18 auf gesamt 10,2 t CO₂-Äq. pro Laufmeter. Die Herstellungsphase steuert 6,8 t CO₂-Äq. bei, die Errichtungsphase 3,3 t CO₂-Äq. und die Transportphase weitere 0,18 t CO₂-Äq.

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM desease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,75E+03	1,02E+03	1,74E+04	3,04E+03	5,15E+02	2,94E+01	2,26E-06	3,14E-05	2,02E+02	1,44E-03	7,28E+03
Innenschale	4,00E+03	3,99E+03	2,53E+04	3,45E+03	5,13E+01	6,99E-01	4,96E-07	1,04E-05	3,37E+02	2,38E-03	8,68E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	6,75E+03	5,02E+03	4,27E+04	6,49E+03	5,66E+02	3,01E+01	2,76E-06	4,17E-05	5,39E+02	3,82E-03	1,60E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	4,73E+01	1,31E+00	6,58E+02	4,93E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,13E-07	4,53E-06	7,96E-02	3,23E-06	4,64E+01
Innenschale	1,34E+02	3,69E+00	1,86E+03	1,40E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,03E-07	1,28E-05	2,25E-01	9,13E-06	1,31E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,81E+02	5,00E+00	2,52E+03	1,89E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,16E-07	1,73E-05	3,05E-01	1,24E-05	1,78E+02
A5											
Ausbruch	6,78E+02	8,54E+01	9,16E+03	2,74E+03	3,73E+00	6,78E+00	1,62E-05	1,46E-03	3,85E+00	8,44E-05	1,54E+03
Stützmaßnahmen	7,41E+02	7,88E+01	9,62E+03	2,01E+03	1,57E-02	4,71E-04	3,20E-06	2,84E-04	2,93E+01	2,02E-04	1,04E+03
Innenschale	3,08E+02	2,11E+01	3,15E+03	5,59E+02	2,51E+01	2,49E-01	6,23E-05	9,78E-05	3,79E+00	2,76E-05	1,01E+03
Deponie	1,54E+03	1,10E+03	3,23E+04	2,77E+02	0,00E+00	0,00E+00	6,97E-06	5,48E-05	8,09E+00	2,00E-04	4,96E+04
Gerätetransport	1,93E+01	5,34E-01	2,69E+02	2,02E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,72E-08	1,85E-06	3,25E-02	1,32E-06	1,90E+01
Summe A5	3,29E+03	1,29E+03	5,45E+04	5,59E+03	2,88E+01	7,03E+00	8,87E-05	1,90E-03	4,51E+01	5,15E-04	5,32E+04
A1-A5											
Summe	1,02E+04	6,31E+03	9,97E+04	1,21E+04	5,95E+02	3,71E+01	9,23E-05	1,96E-03	5,85E+02	4,35E-03	6,93E+04

Tab. 6-18: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, mittel lösbar pro Tunnelmeter

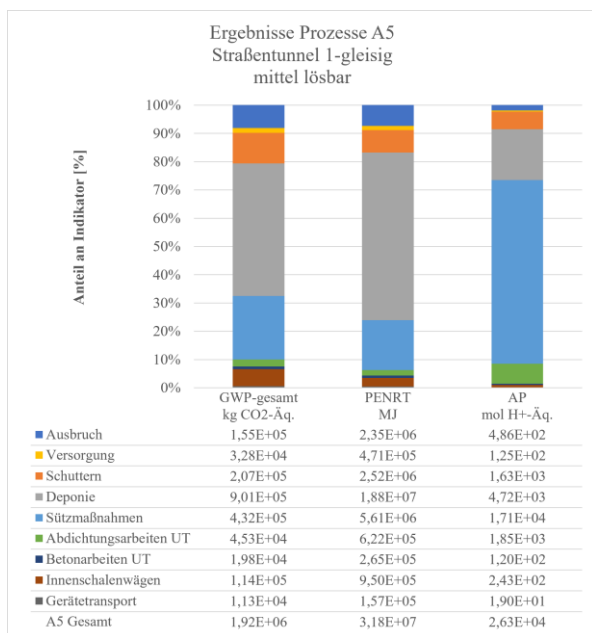


Abb. 6-50: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar

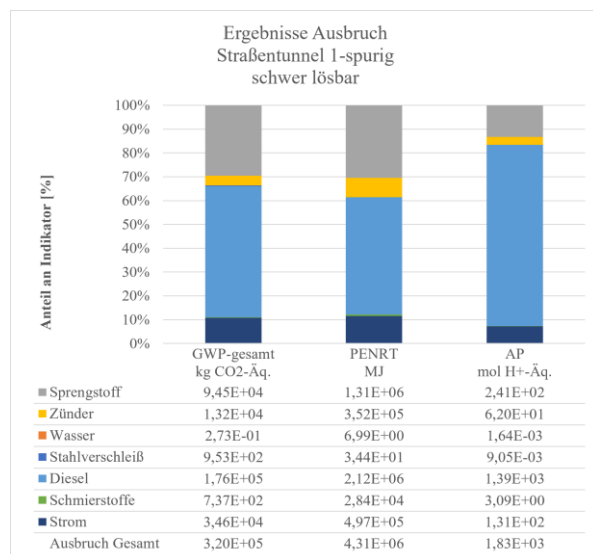


Abb. 6-51: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar

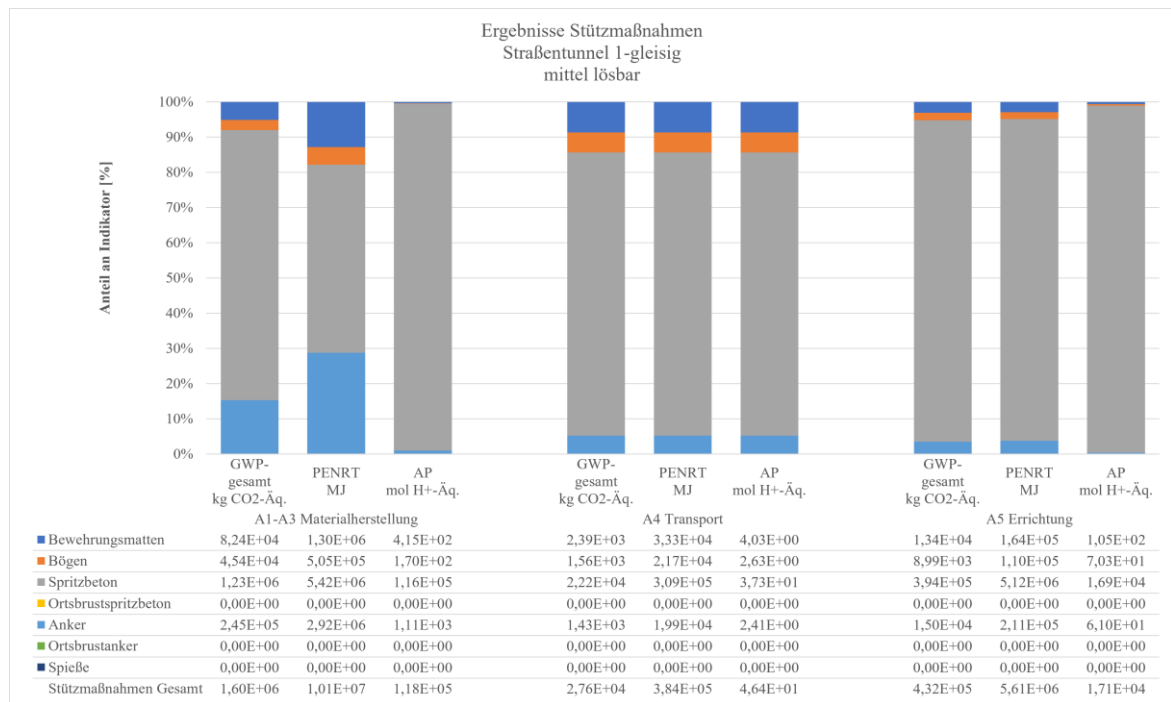


Abb. 6-52: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar

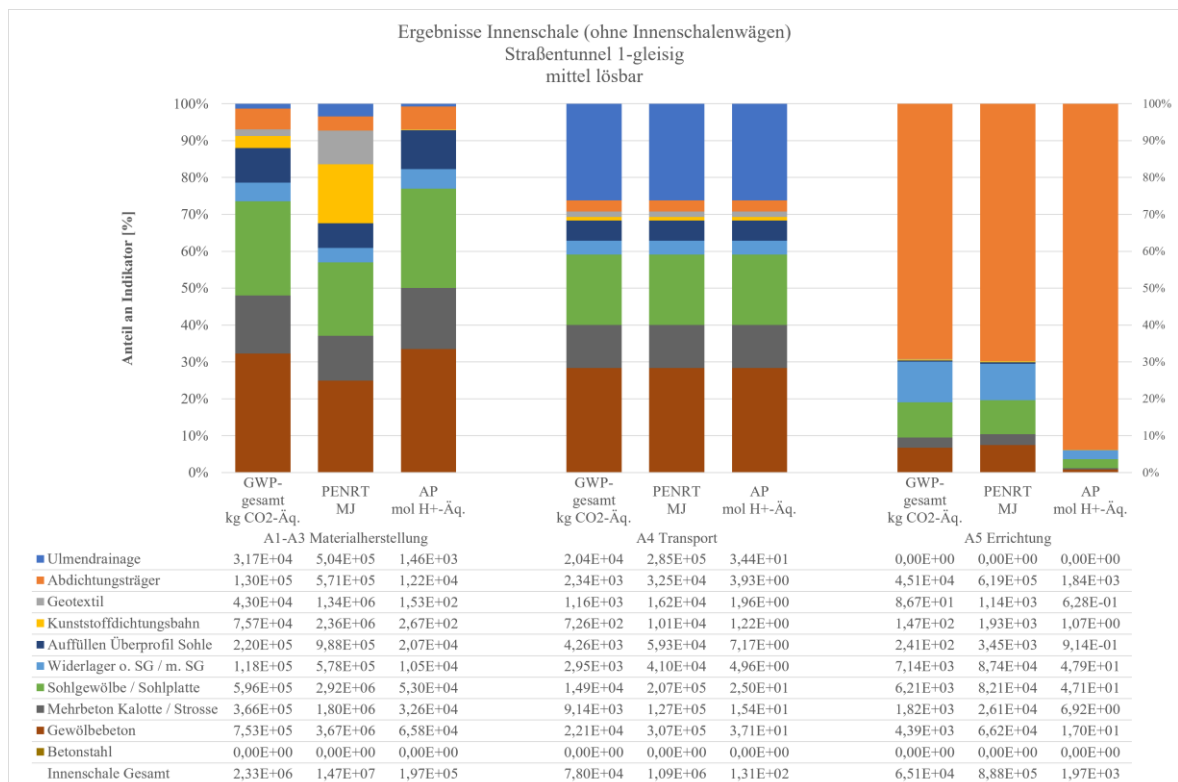


Abb. 6-53: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, mittel lösbar

Leicht lösbar

Der durchschnittliche leicht lösbare einspurige Straßentunnel emittiert in Summe etwa 13,6 Tonnen CO₂-Äq., wobei 8,8 t CO₂-Äq. in der Herstellungsphase, 0,19 in der Transportphase und 4,6 in der Bau-/ Errichtungsphase pro Tunnelmeter anfallen (vgl. Tab. 6-19).

	GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	desease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	3,69E+03	6,80E+03	2,55E+04	5,56E+03	1,19E+03	1,37E+02	3,82E-06	1,01E-04	2,29E+02	1,64E-03	7,59E+03
Innenschale	5,13E+03	4,53E+03	4,04E+04	7,48E+03	2,58E+03	4,13E+01	1,98E-06	1,63E-05	3,25E+02	2,37E-03	1,38E+04
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	8,82E+03	1,13E+04	6,59E+04	1,30E+04	3,77E+03	1,78E+02	5,80E-06	1,17E-04	5,55E+02	4,01E-03	2,14E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	6,08E+01	1,68E+00	8,47E+02	6,35E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,74E-07	5,83E-06	1,02E-01	4,15E-06	5,97E+01
Innenschale	1,30E+02	3,58E+00	1,81E+03	1,35E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,85E-07	1,24E-05	2,18E-01	8,85E-06	1,27E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,90E+02	5,26E+00	2,65E+03	1,99E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,59E-07	1,83E-05	3,21E-01	1,30E-05	1,87E+02
A5											
Ausbruch	8,62E+02	6,87E+01	1,08E+04	3,63E+03	0,00E+00	0,00E+00	3,19E-05	2,89E-03	6,25E+00	1,64E-04	2,51E+03
Stützmaßnahmen	2,01E+03	3,38E+02	1,93E+04	4,27E+03	1,52E+01	8,95E-01	5,05E-06	4,27E-04	1,21E+02	8,43E-04	3,42E+03
Innenschale	4,55E+02	2,70E+01	4,47E+03	7,11E+02	3,50E+01	7,29E-01	6,75E-05	1,37E-04	4,23E+00	3,08E-05	2,15E+03
Deponie	1,26E+03	8,99E+02	2,63E+04	2,26E+02	0,00E+00	0,00E+00	5,67E-06	4,46E-05	6,59E+00	1,63E-04	4,03E+04
Gerätetransport	2,12E+01	5,87E-01	2,96E+02	2,22E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,57E-08	2,03E-06	3,57E-02	1,45E-06	2,08E+01
Summe A5	4,60E+03	1,33E+03	6,11E+04	8,84E+03	5,01E+01	1,62E+00	1,10E-04	3,50E-03	1,38E+02	1,20E-03	4,85E+04
A1-A5											
Summe	1,36E+04	1,27E+04	1,30E+05	2,19E+04	3,82E+03	1,80E+02	1,17E-04	3,64E-03	6,93E+02	5,23E-03	7,00E+04

Tab. 6-19: Ergebnisse Straßentunnel 1-spurig, leicht lösbar pro Tunnelmeter

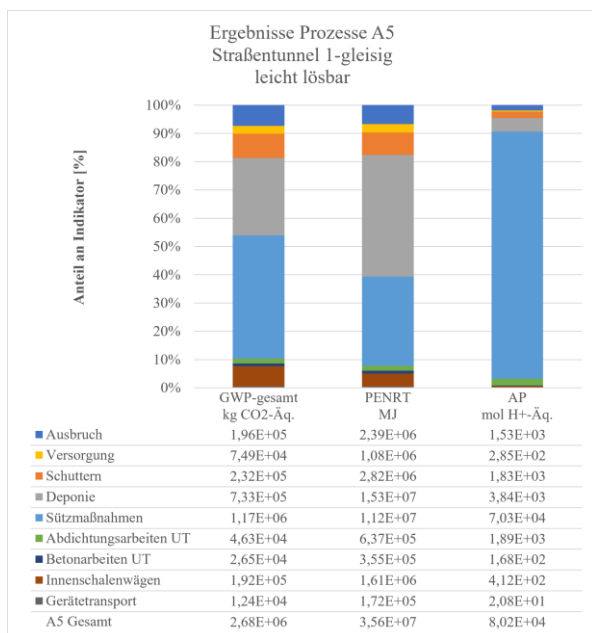


Abb. 6-54: Ergebnisse Prozesse A5, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar

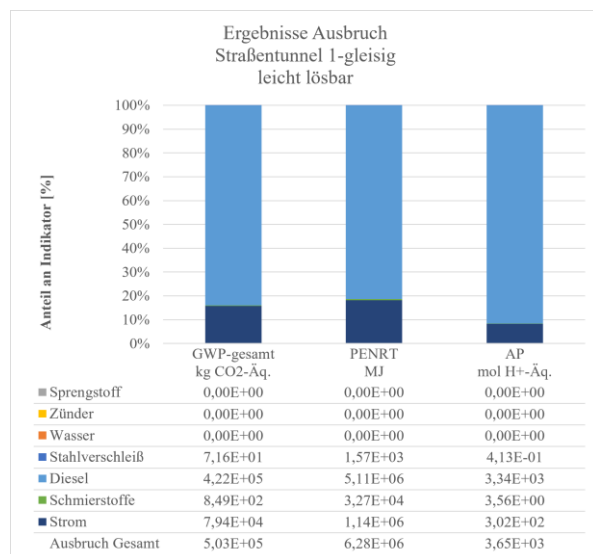


Abb. 6-55: Ergebnisse Ausbruch, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar

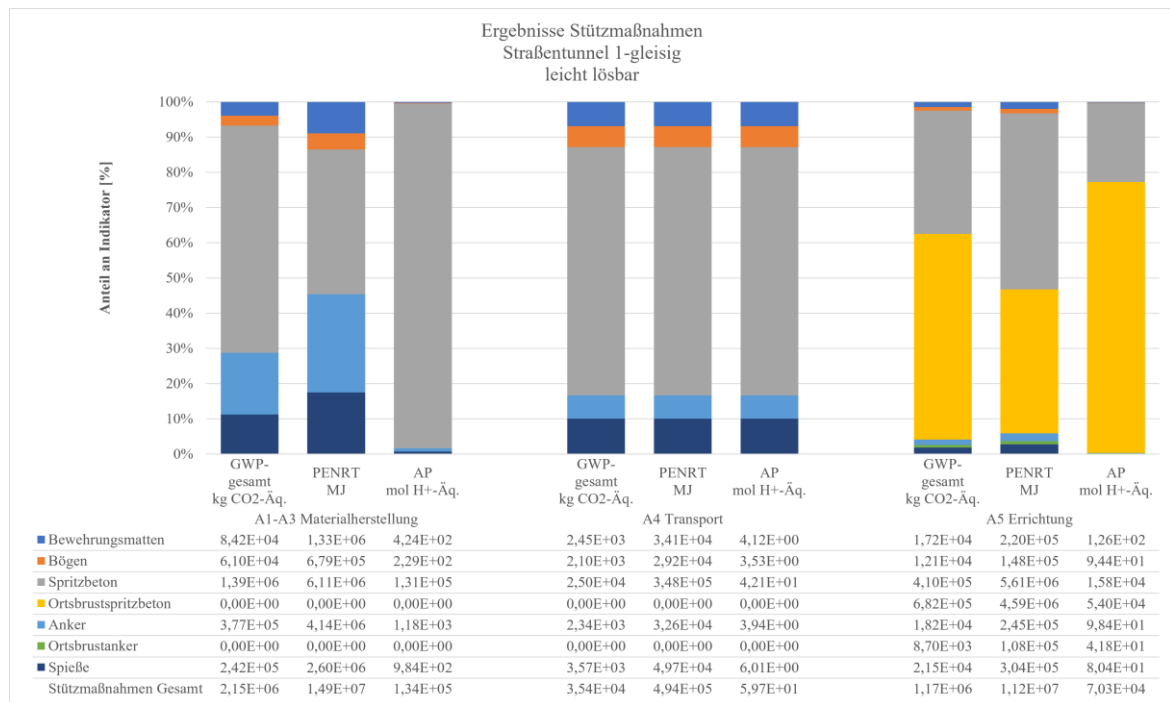


Abb. 6-56: Ergebnisse Stützmaßnahmen, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar

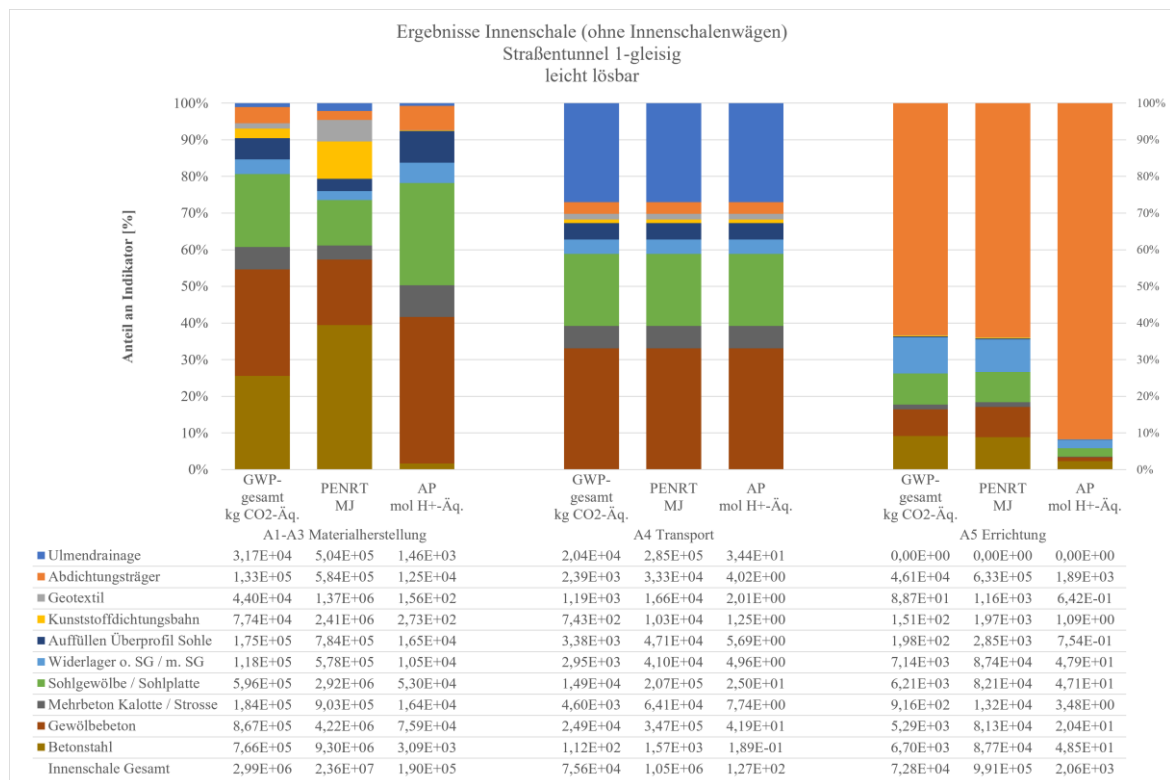


Abb. 6-57: Ergebnisse Innenschale, Straßentunnel einspurig, leicht lösbar

6.6.3 Querschlüge

6.6.3.1 Befahrbare Querschlüge (EQ)

Da die kalkulatorischen Annahmen für den mit Einsatzfahrzeugen befahrbaren Querschlag von jenen der beiden größeren Tunnelquerschnitte abweichen, werden die nachfolgenden Ergebnisse in einer tiefergehenden Detailstufe dargestellt. Für die ökologische Bilanzierung wird als Berechnungsgrundlage die repräsentative Länge des Straßentunnels herangezogen. Dies begründet sich primär durch den abgebildeten Verkehrsträger des jeweiligen Tunnels. Es wird daher angenommen, dass diese Querschlüge aufgrund der geforderten Befahrbarkeit durch Rettungs- und Einsatzfahrzeuge als EQ ausgeführt werden als die begehbaren Querschlüge im Bahntunnelbau. Falls ein begehbare Querschlag verwendet wird, ist es aufgrund der vorangehenden Ergebnisse ausreichend genau, hierfür die Ergebnisse des begehbaren Querschlags auf Basis der repräsentativen Länge des Bahntunnels als Referenz heranzuziehen.

Schwer lösbar

Der zyklische Tunnelbau dieses befahrbaren Querschlags im Festgestein der schwer lösaren Geologie schlägt pro Laufmeter mit einem Treibhauspotenzial von insgesamt 5,3 Tonnen CO₂-Äq. zu Buche (vgl. Tab. 6-20). Bei der prozessualen Aufschlüsselung entfällt mit 3,3 t CO₂-Äq. der intensivste Posten auf die Materialherstellung, gefolgt von den Positionen der Errichtungsphase mit 1,9 t CO₂-Äq. Die Transportphase komplettiert die Bilanz mit weiteren 0,11 t CO₂-Äq. je Tunnelmeter.

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM desease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,01E+03	1,11E+02	5,10E+03	1,04E+03	7,24E+01	5,59E+00	1,81E-07	2,48E-06	8,83E+01	6,22E-04	2,02E+03
Innenschale	2,27E+03	2,26E+03	1,46E+04	1,99E+03	4,98E+01	3,96E-01	2,87E-07	6,02E-06	1,88E+02	1,33E-03	5,02E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	3,27E+03	2,37E+03	1,97E+04	3,03E+03	1,22E+02	5,99E+00	4,68E-07	8,50E-06	2,77E+02	1,95E-03	7,05E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,83E+01	5,06E-01	2,55E+02	1,91E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,26E-08	1,76E-06	3,08E-02	1,25E-06	1,80E+01
Innenschale	9,39E+01	2,59E+00	1,31E+03	9,80E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,23E-07	9,00E-06	1,58E-01	6,41E-06	9,21E+01
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,12E+02	3,10E+00	1,56E+03	1,17E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,06E-07	1,08E-05	1,89E-01	7,66E-06	1,10E+02
A5											
Ausbruch	3,52E+02	4,41E+01	4,78E+03	1,37E+03	1,86E+00	3,57E+00	8,56E-06	7,75E-04	2,02E+00	4,46E-05	7,89E+02
Stützmaßnahmen	3,17E+02	3,33E+01	4,07E+03	7,54E+02	0,00E+00	0,00E+00	9,21E-07	8,12E-05	1,34E+01	9,03E-05	3,91E+02
Innenschale	1,85E+02	1,31E+01	1,92E+03	3,37E+02	1,69E+01	1,94E-01	3,90E-05	8,72E-05	2,22E+00	1,74E-05	6,47E+02
Deponie	1,03E+03	7,33E+02	2,14E+04	1,84E+02	0,00E+00	0,00E+00	4,63E-06	3,64E-05	5,37E+00	1,33E-04	3,29E+04
Gerätetransport	1,90E+01	5,25E-01	2,65E+02	1,98E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,57E-08	1,82E-06	3,20E-02	1,30E-06	1,87E+01
Summe A5	1,90E+03	8,24E+02	3,25E+04	2,65E+03	1,88E+01	3,76E+00	5,32E-05	9,81E-04	2,30E+01	2,86E-04	3,47E+04
A1-A5											
Summe	5,29E+03	3,20E+03	5,38E+04	5,69E+03	1,41E+02	9,75E+00	5,41E-05	1,00E-03	3,00E+02	2,25E-03	4,19E+04

Tab. 6-20: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, schwer lösbar pro Tunnelmeter

In der schwer löslichen Geologie wird das ökologische Profil der Errichtungsphase (A5) bei den befahrbaren Querschlägen primär durch zwei Haupttreiber geprägt. Den intensivsten Faktor bildet die Deponie, welche bei diesem Querschnitt speziell in der Materialherstellungs- sowie Transportphase wirkt. Als zweiter wesentlicher Kernprozess treten die Stützmaßnahmen hervor, welche am meisten beim AP zu Buche schlagen. Das Schuttern steuert einen moderaten logistischen Nebenbeitrag bei, während der eigentliche Ausbruch und das Herstellen der Innenschale eine untergeordnete Rolle in dieser Phase einnehmen (vgl. Abb. 6-58).

Der Ausbruch selbst wird bei detaillierterer Betrachtung wiederum vom Diesel- und Sprengstoffbedarf getrieben, welche etwa 50 bzw. 30 % beim GWP und PENRT ausmachen (vgl. Abb. 6-59).

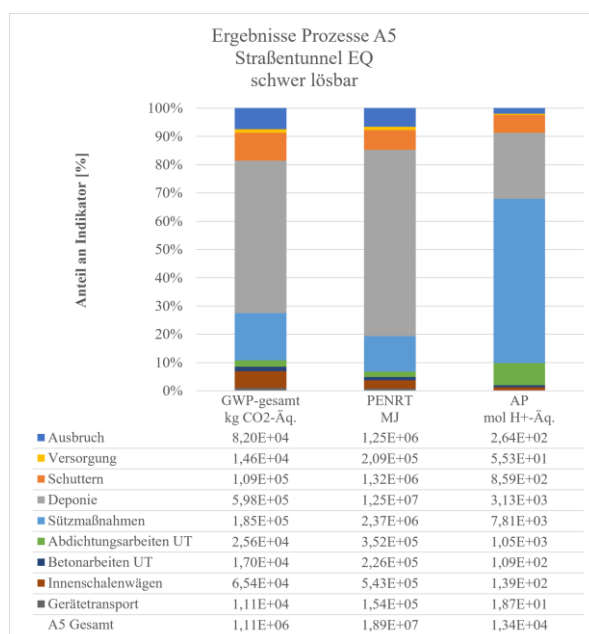


Abb. 6-58: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar

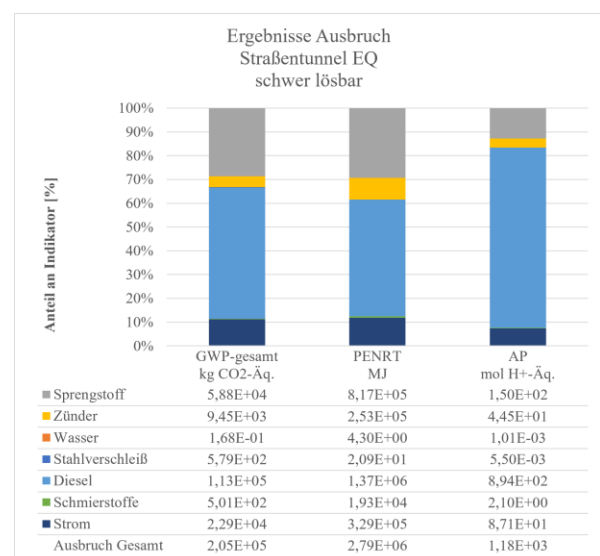


Abb. 6-59: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar

Die Ergebnisse der Stützmaßnahmen zeigen erneut, dass der Spritzbeton der dominierende Faktor ist. Vor allem die energetischen Aufwendungen und die Deponie des Rückpralls sorgen für bis zu 99 % in der Errichtungsphase. Daneben bilden die Bewehrungsmatten in der Materialherstellungs- und Transportphase sowie die Anker in der Produktherstellung die weiteren relevanten Anteile (vgl. Abb. 6-60).

Bei der Analyse der Innenschale lässt sich erkennen, dass die Betonbauteile vor allem in der Materialherstellungs- bzw. Tunnelherstellungs- und Transportphase am meisten herausstechen. Das Verhältnis von Gewölbe zu Sohle ist für den Querschlag erstmals umgekehrt, sodass die gesamten Aufwendungen der Sohlplatte aus A1-A5 etwa ein Drittel des Treibhauspotenzials ausmachen, während jene des Gewölbes etwa ein Viertel ausmachen. Die weiteren relevanten Bestandteile sind unter anderem den Widerlagern sowie dem Mehrbeton zuzuordnen (maximal 8 bzw. 16 % je Indikator). Mengenmäßig ist die Materialherstellungsphase weiterhin die am meisten emittierende Phase mit etwa 86 ÷ 99 % (vgl. Abb. 6-61).

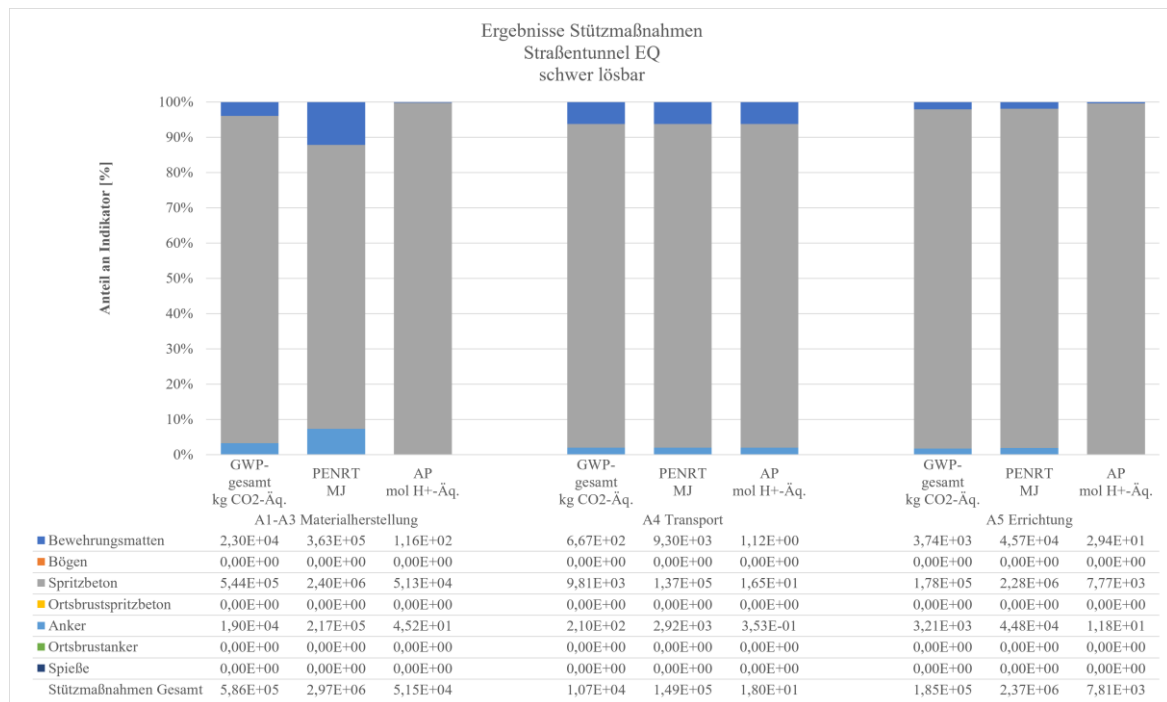


Abb. 6-60: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar

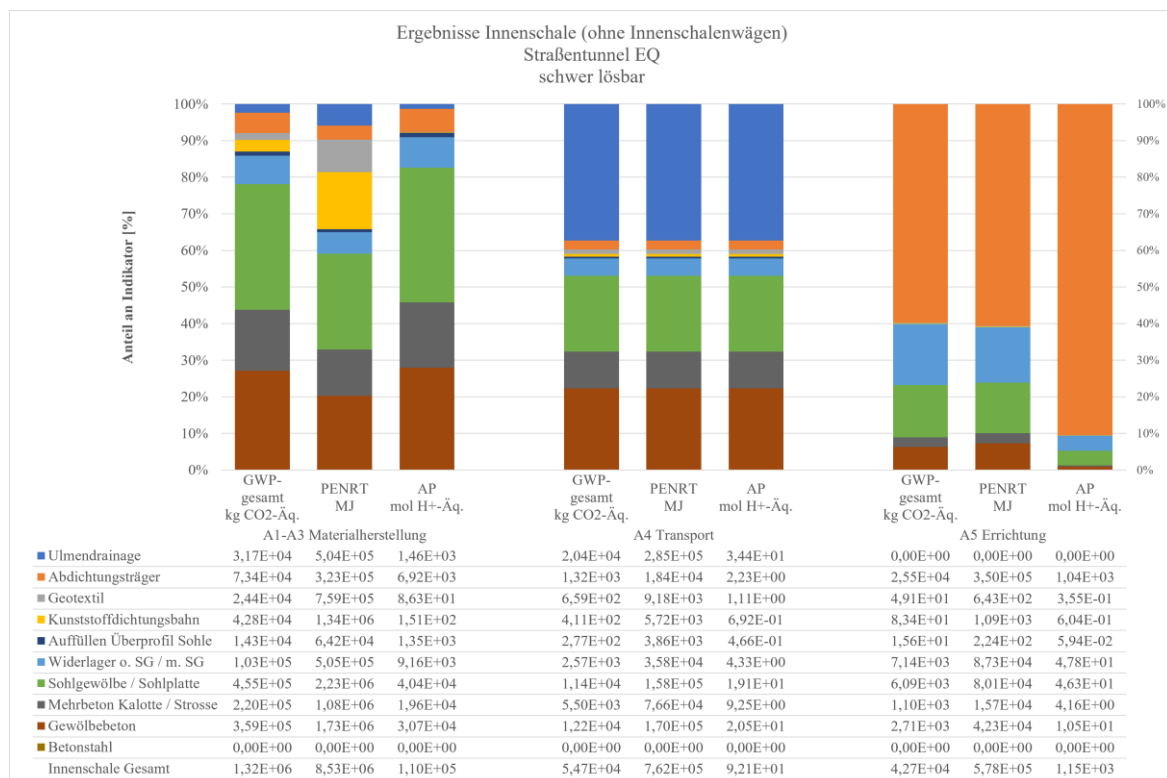


Abb. 6-61: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, schwer lösbar

Mittel lösbar

Im Bereich der mittelschwer lösbaren Geologie resultiert aus der Herstellung des befahrbaren Querschlags ein Gesamteffekt von 6,6 Tonnen CO₂-Äq. je Tunnelmeter (vgl. Tab. 6-21). Das ökologische Profil wird dabei maßgeblich Phase A1-A3 determiniert, die mit 4,5 t CO₂-Äq. den ressourcenintensivsten Faktor darstellt. Für die Phase A5 fallen etwa 2,0 t CO₂-Äq. an, während Phase A4 die Gesamtbilanz um ca. 0,14 t CO₂-Äq. pro Laufmeter ergänzt.

	 GWP-gesamt	WDP	PENRT	PERT	SM	MFR	HTP-c	HTP-nc	AP	PM	SQP
	kg CO ₂ -Äq.	m ³ Welt-Äq.	MJ	MJ	kg	kg	CTUh	CTUh	mol H ⁺ -Äq.	desease inc.	-
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,71E+03	3,57E+02	1,06E+04	1,85E+03	3,50E+02	2,01E+01	1,26E-06	1,58E-05	1,30E+02	9,26E-04	4,65E+03
Innenschale	2,76E+03	3,05E+03	1,80E+04	2,40E+03	5,05E+01	5,39E-01	3,41E-07	7,20E-06	2,30E+02	1,63E-03	5,97E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	4,47E+03	3,40E+03	2,86E+04	4,25E+03	4,00E+02	2,07E+01	1,61E-06	2,30E-05	3,60E+02	2,55E-03	1,06E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	3,09E+01	8,54E-01	4,31E+02	3,23E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,39E-07	2,96E-06	5,21E-02	2,11E-06	3,03E+01
Innenschale	1,04E+02	2,88E+00	1,45E+03	1,09E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,70E-07	9,99E-06	1,75E-01	7,11E-06	1,02E+02
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,35E+02	3,73E+00	1,88E+03	1,41E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,10E-07	1,30E-05	2,28E-01	9,22E-06	1,33E+02
A5											
Ausbruch	4,20E+02	5,32E+01	5,71E+03	1,71E+03	2,25E+00	4,24E+00	1,01E-05	9,11E-04	2,40E+00	5,26E-05	9,72E+02
Stützmaßnahmen	4,53E+02	4,79E+01	6,09E+03	1,19E+03	0,00E+00	0,00E+00	2,25E-06	2,01E-04	1,66E+01	1,14E-04	5,88E+02
Innenschale	2,02E+02	1,51E+01	2,16E+03	3,90E+02	1,70E+01	1,94E-01	4,00E-05	9,21E-05	2,87E+00	2,22E-05	6,91E+02
Deponie	8,97E+02	6,41E+02	1,87E+04	1,61E+02	0,00E+00	0,00E+00	4,05E-06	3,18E-05	4,70E+00	1,16E-04	2,88E+04
Gerätetransport	1,90E+01	5,25E-01	2,65E+02	1,98E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,57E-08	1,82E-06	3,20E-02	1,30E-06	1,87E+01
Summe A5	1,99E+03	7,58E+02	3,30E+04	3,45E+03	1,93E+01	4,44E+00	5,65E-05	1,24E-03	2,66E+01	3,06E-04	3,10E+04
A1-A5											
Summe	6,60E+03	4,17E+03	6,34E+04	7,72E+03	4,19E+02	2,51E+01	5,87E-05	1,27E-03	3,87E+02	2,87E-03	4,18E+04

Tab. 6-21: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, mittel lösbar pro Tunnelmeter

Die detaillierte Aufschlüsselung der Errichtungsphase in Abb. 6-62 zeigt, dass sich der Einzelposten der Deponie mit etwa 45 % beim GWP und 57 % beim PENRT als der einflussreichste Prozess herauskristallisiert. Diese Zahlenwerte werden durch die materialintensiven Stützmaßnahmen, welche infolge des kontinuierlichen Sicherungsbedarfs ca. 23 % des GWP beanspruchen und mit einem maximalen Anteil von 62 % beim AP, ergänzt. Das mechanische Schuttern steuert mit 11 % beim GWP einen moderaten logistischen Beitrag bei, während der eigentliche Ausbruch mit 8 % beim GWP und die Innenschalenwägen mit etwa 6 % beim GWP stabile, im Verhältnis jedoch eher untergeordnete Werte aufweisen. Die verbleibenden Prozesskomponenten nehmen in der ökologischen Gesamtbilanz der Phase A5 eine sekundäre Rolle ein.

Die Aufschlüsselung der Ausbrucharbeiten zeigt, dass der Dieselverbrauch erneut der Hauptbestandteil mit etwa 50 ÷ 75 % je Indikator ist (vgl. Abb. 6-63).

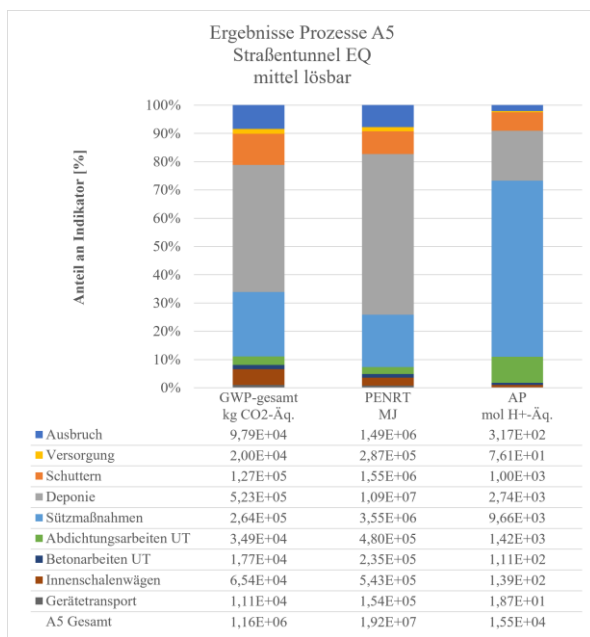


Abb. 6-62: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar

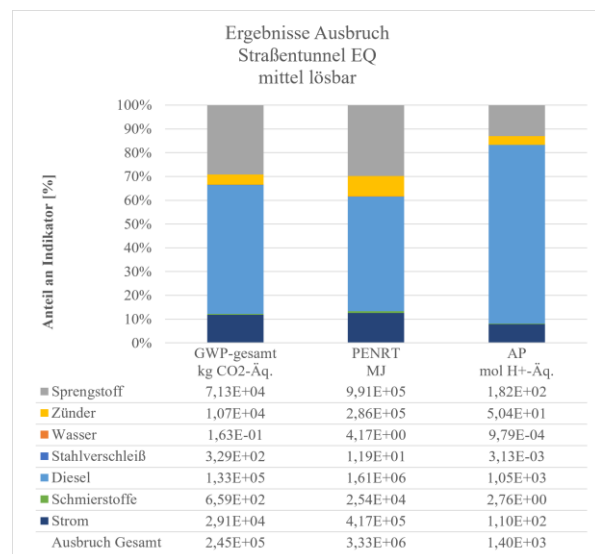


Abb. 6-63: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar

Die Verteilung der Stützmaßnahmen wird hauptsächlich von der Materialherstellungsphase A1-A3 definiert mit etwa 62 bis 88 %, wobei die Errichtungsphase mit bis zu 35 % mehr an Bedeutung gewinnt im Vergleich zur schwer lösaren Geologie (vgl. Abb. 6-64).

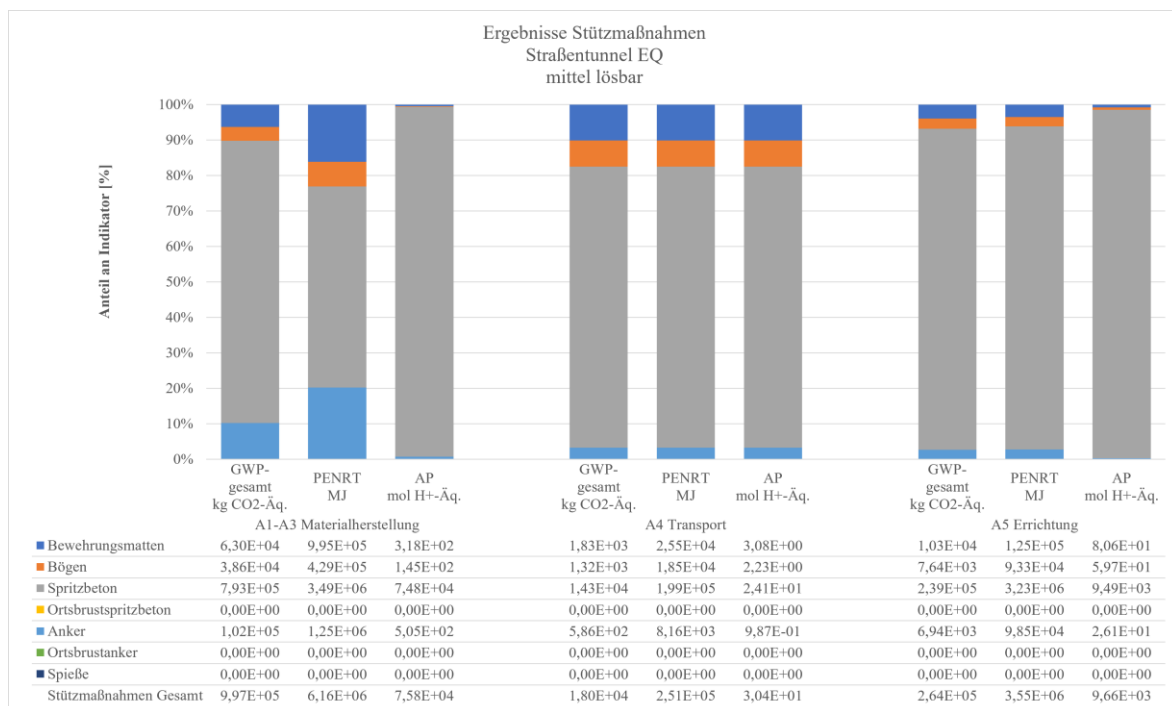


Abb. 6-64: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar

Die Innenschalenarbeiten verteilen sich in etwa wie bei den Querschnitten und Geologien zuvor, wobei der Gewölbebeton und die Sohlplatte etwa prozentuell gesehen etwa gleichwertig sind über die gesamten Phasen hinweg (vgl. Abb. 6-65).

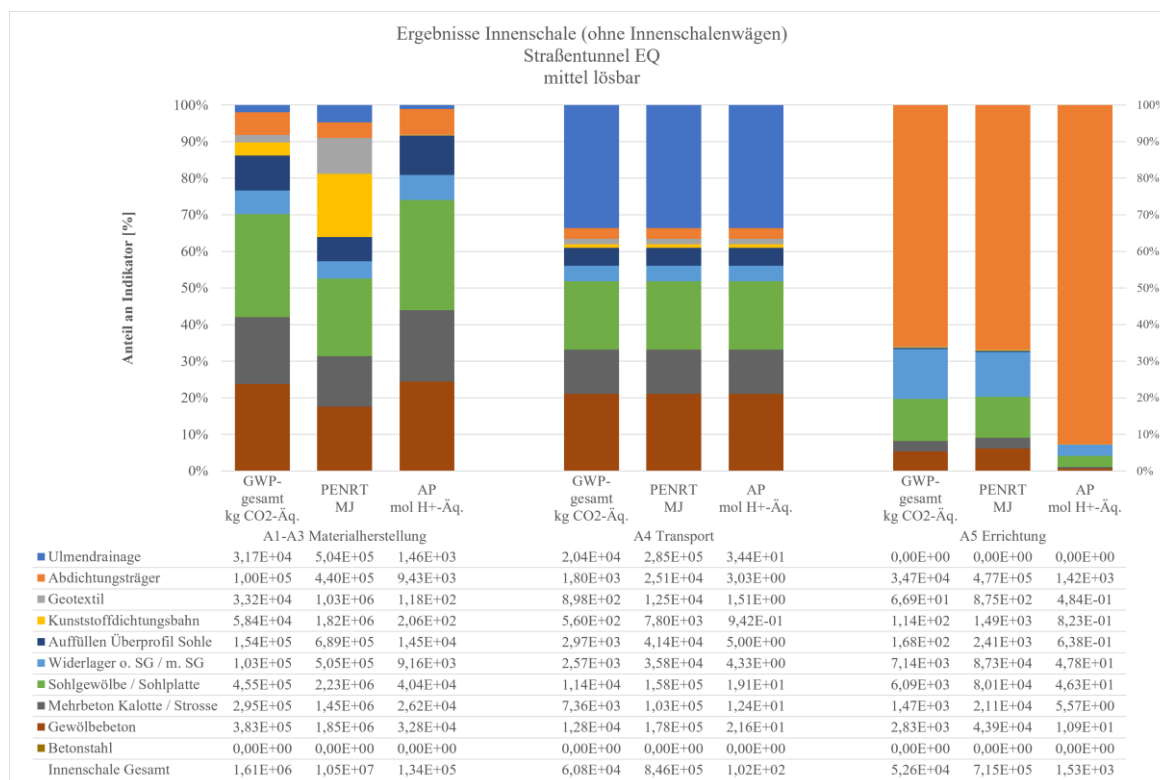


Abb. 6-65: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, mittel lösbar

Leicht lösbar

Unter den Bedingungen der leicht lösbaren Geologie resultiert aus dem Bau von einem Tunnelmeter des befahrbaren Querschlags ein Gesamteffekt von 7,8 Tonnen CO₂-Äq. (vgl. Tab. 6-22). Dabei ergibt sich die ökologische Zusammensetzung aus 5,7 t CO₂-Äq. in der Phase A1-A3, 0,14 t CO₂-Äq. in A4 und 1,9 t CO₂-Äq. in A5.

Die Prozesse der Errichtungsphase fokussieren sich im Wesentlichen erneut auf die Deponie sowie die Stützmaßnahmen, letzteres speziell beim Versauerungspotenzial (vgl. Abb. 6-66). Durch den Einsatz des Tunnelladebaggers aufgrund der kleineren Querschnittsgröße ergeben sich für den Ausbruch andere Verteilungen. Somit beläuft sich dieser Stromverbrauch auf etwa 4,4E+04 kg CO₂-Äq. statt den 2,3E+04 kg CO₂-Äq. der schwer lösbaren Geologie mit dem dieselbetriebenen Tunnelbagger. Der Dieselbedarf sinkt somit etwas, wohingegen der Strombedarf aufgrund der elektrischen Löseleistung dementsprechend auf etwa 13 ÷ 27 % je Indikator steigt (vgl. Abb. 6-67).

Der Einsatz von Spritzbeton kristallisiert sich als der einflussreichste Faktor der Stützmaßnahmen heraus, der etwa 74 % des GWP sowie 61 % des PENRT beansprucht und mit fast 98 % beim AP die Wirkungen dieses Prozesses fast vollständig diktiert. Als spürbarer, sekundärer Treiber treten die Spieße hervor, welche mit ca. 11 % beim GWP und 16 % beim PENRT zu Buche schlagen, während sie beim AP mit lediglich 1 % kaum ins Gewicht fallen.

Die Anker steuern mit unter 10 % einen geringen Beitrag bei. Nahezu gleichauf liegen die Bögen und die Bewehrung mit max. 8 %. Die Sicherungen der Ortsbrust (Ortsbrustspritzbeton und Ortsbrustanker) fallen für den Querschlag aufgrund der geringen Ausbruchfläche weg und nehmen somit in dieser Geologiekategorie keine Rolle ein (vgl. Abb. 6-68).

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM disease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,31E+03	3,34E+03	1,49E+04	3,25E+03	6,94E+02	8,69E+01	2,16E-06	5,49E-05	1,59E+02	1,14E-03	5,10E+03
Innenschale	3,43E+03	3,34E+03	2,75E+04	4,96E+03	1,69E+03	2,69E+01	1,30E-06	1,09E-05	2,16E+02	1,58E-03	9,12E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	5,74E+03	6,69E+03	4,24E+04	8,21E+03	2,39E+03	1,14E+02	3,46E-06	6,57E-05	3,76E+02	2,72E-03	1,42E+04
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	4,13E+01	1,14E+00	5,75E+02	4,31E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,86E-07	3,95E-06	6,94E-02	2,82E-06	4,05E+01
Innenschale	9,99E+01	2,76E+00	1,39E+03	1,04E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,51E-07	9,58E-06	1,68E-01	6,82E-06	9,81E+01
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,41E+02	3,90E+00	1,97E+03	1,47E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,37E-07	1,35E-05	2,38E-01	9,64E-06	1,39E+02
A5											
Ausbruch	3,18E+02	3,02E+01	4,03E+03	2,00E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-05	9,63E-04	2,20E+00	5,53E-05	1,23E+03
Stützmaßnahmen	6,04E+02	7,08E+01	8,17E+03	2,73E+03	2,00E-02	6,02E-04	2,87E-06	2,54E-04	2,04E+01	1,41E-04	1,36E+03
Innenschale	2,86E+02	1,84E+01	2,91E+03	4,71E+02	2,27E+01	4,69E-01	4,34E-05	1,17E-04	3,10E+00	2,39E-05	1,34E+03
Deponie	6,98E+02	4,99E+02	1,46E+04	1,25E+02	0,00E+00	0,00E+00	3,15E-06	2,48E-05	3,66E+00	9,03E-05	2,24E+04
Gerätetransport	2,00E+01	5,52E-01	2,78E+02	2,09E+00	0,00E+00	0,00E+00	9,01E-08	1,92E-06	3,36E-02	1,36E-06	1,96E+01
Summe A5	1,93E+03	6,19E+02	3,00E+04	5,32E+03	2,27E+01	4,69E-01	6,01E-05	1,36E-03	2,93E+01	3,11E-04	2,64E+04
A1-A5											
Summe	7,80E+03	7,31E+03	7,43E+04	1,35E+04	2,41E+03	1,14E+02	6,42E-05	1,44E-03	4,05E+02	3,04E-03	4,07E+04

Tab. 6-22: Ergebnisse befahrbarer Querschlag, leicht lösbar pro Tunnelmeter

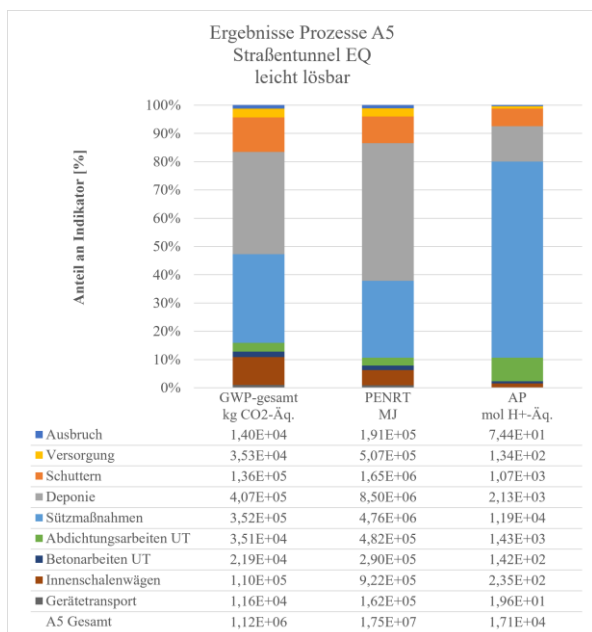


Abb. 6-66: Ergebnisse Prozesse A5, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar

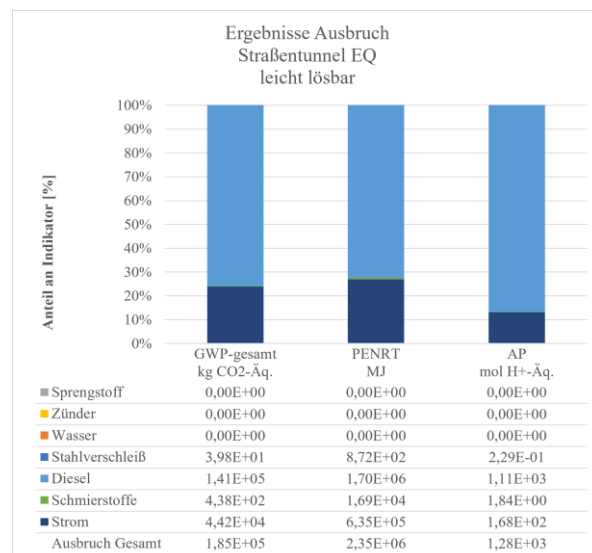


Abb. 6-67: Ergebnisse Ausbruch, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar

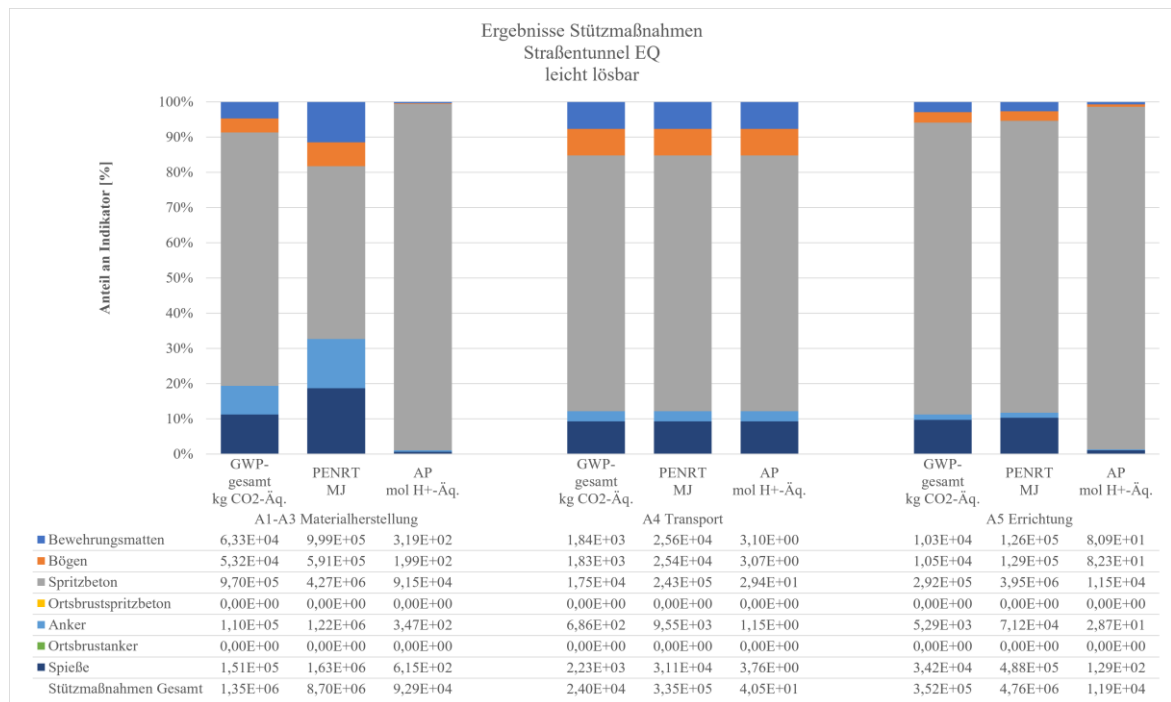


Abb. 6-68: Ergebnisse Stützmaßnahmen, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar

Gewölbe- und Sohlbeton der Innenschale kristallisieren sich erneut als Hauptemittenten heraus. Weiters erzeugt der Bewehrungsstahl hier wiederum etwa 25 % der gesamten Wirkungen über A1-A5 (vgl. Abb. 6-69).

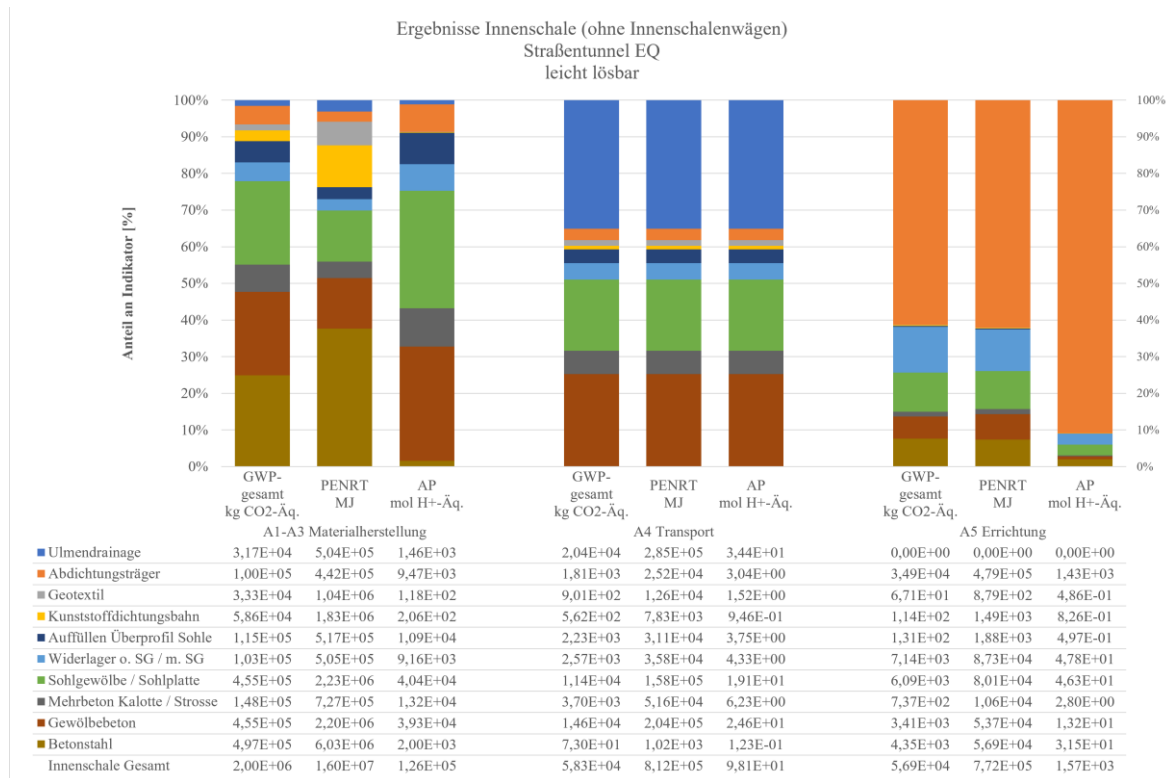


Abb. 6-69: Ergebnisse Innenschale, befahrbarer Querschlag, leicht lösbar

6.6.3.2 Begehbare Querschläge (GQ)

Schwer lösbar

Der begehbare Querschlag erzeugt ein GWP-gesamt von 3,2 t CO₂-Äq. je tm (vgl. Tab. 6-23).

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM desease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	5,89E+02	6,98E+01	3,07E+03	6,46E+02	4,96E+01	3,82E+00	1,13E-07	1,46E-06	5,08E+01	3,58E-04	1,20E+03
Innenschale	1,42E+03	1,54E+03	9,56E+03	1,27E+03	4,92E+01	2,71E-01	1,80E-07	3,84E-06	1,16E+02	8,21E-04	3,15E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	2,01E+03	1,61E+03	1,26E+04	1,92E+03	9,88E+01	4,09E+00	2,94E-07	5,30E-06	1,67E+02	1,18E-03	4,36E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,07E+01	2,96E-01	1,49E+02	1,12E+00	0,00E+00	0,00E+00	4,84E-08	1,03E-06	1,81E-02	7,32E-07	1,05E+01
Innenschale	7,35E+01	2,03E+00	1,02E+03	7,68E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,32E-07	7,05E-06	1,24E-01	5,02E-06	7,22E+01
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	8,43E+01	2,33E+00	1,17E+03	8,80E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,80E-07	8,08E-06	1,42E-01	5,75E-06	8,27E+01
A5											
Ausbruch	2,06E+02	2,44E+01	2,77E+03	6,31E+02	1,08E+00	2,04E+00	5,31E-06	4,81E-04	1,21E+00	2,75E-05	3,82E+02
Stützmaßnahmen	1,85E+02	1,96E+01	2,37E+03	4,66E+02	0,00E+00	0,00E+00	5,61E-07	4,95E-05	7,84E+00	5,31E-05	2,44E+02
Innenschale	1,62E+02	1,04E+01	1,64E+03	2,50E+02	1,38E+01	1,28E-01	2,33E-05	8,29E-05	1,63E+00	1,33E-05	4,16E+02
Deponie	5,20E+02	3,72E+02	1,09E+04	9,33E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,35E-06	1,84E-05	2,72E+00	6,72E-05	1,67E+04
Gerätetransport	2,81E+01	7,75E-01	3,91E+02	2,93E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,27E-07	2,69E-06	4,72E-02	1,92E-06	2,75E+01
Summe A5	1,10E+03	4,27E+02	1,80E+04	1,44E+03	1,49E+01	2,17E+00	3,17E-05	6,35E-04	1,34E+01	1,63E-04	1,77E+04
A1-A5											
Summe	3,20E+03	2,04E+03	3,18E+04	3,37E+03	1,14E+02	6,26E+00	3,24E-05	6,48E-04	1,80E+02	1,35E-03	2,22E+04

Tab. 6-23: Ergebnisse begehrbarer Querschlag, schwer lösbar pro Tunnelmeter

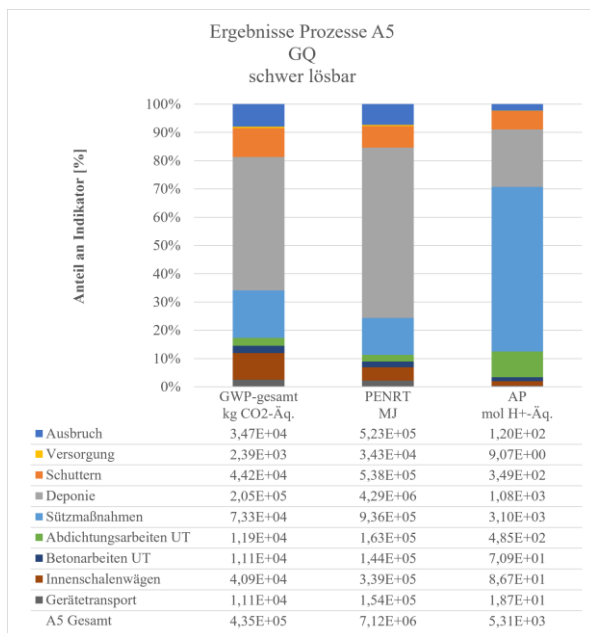


Abb. 6-70: Ergebnisse Prozesse A5, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar

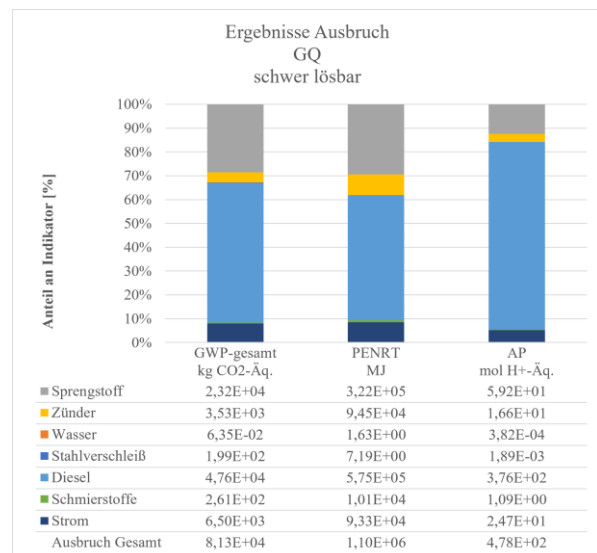


Abb. 6-71: Ergebnisse Ausbruch, begehrbarer Querschlag, schwer lösbar

Die restlichen Ergebnisse der begehbaren Querschläge, welche den kleinsten Ausbruchsquerschnitt abbilden, orientieren sich ungefähr an den Werten der befahrbaren Querschläge und werden somit durch die Tabellen und Abbildungen beschrieben.

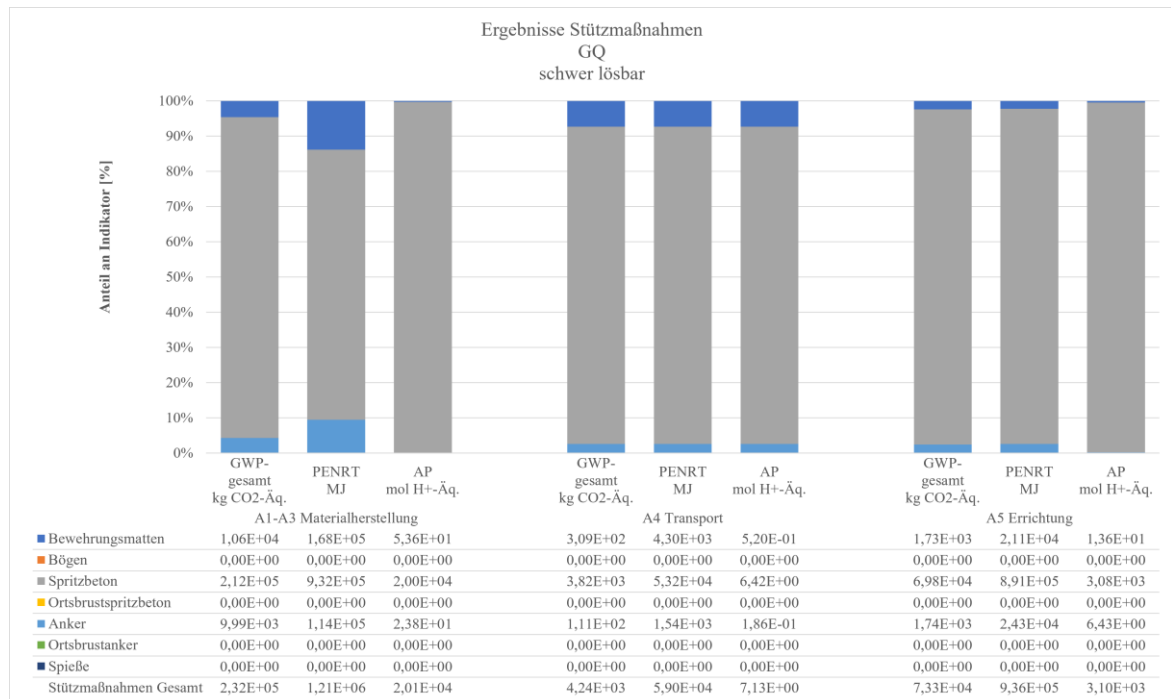


Abb. 6-72: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehbaren Querschlag, schwer lösbar

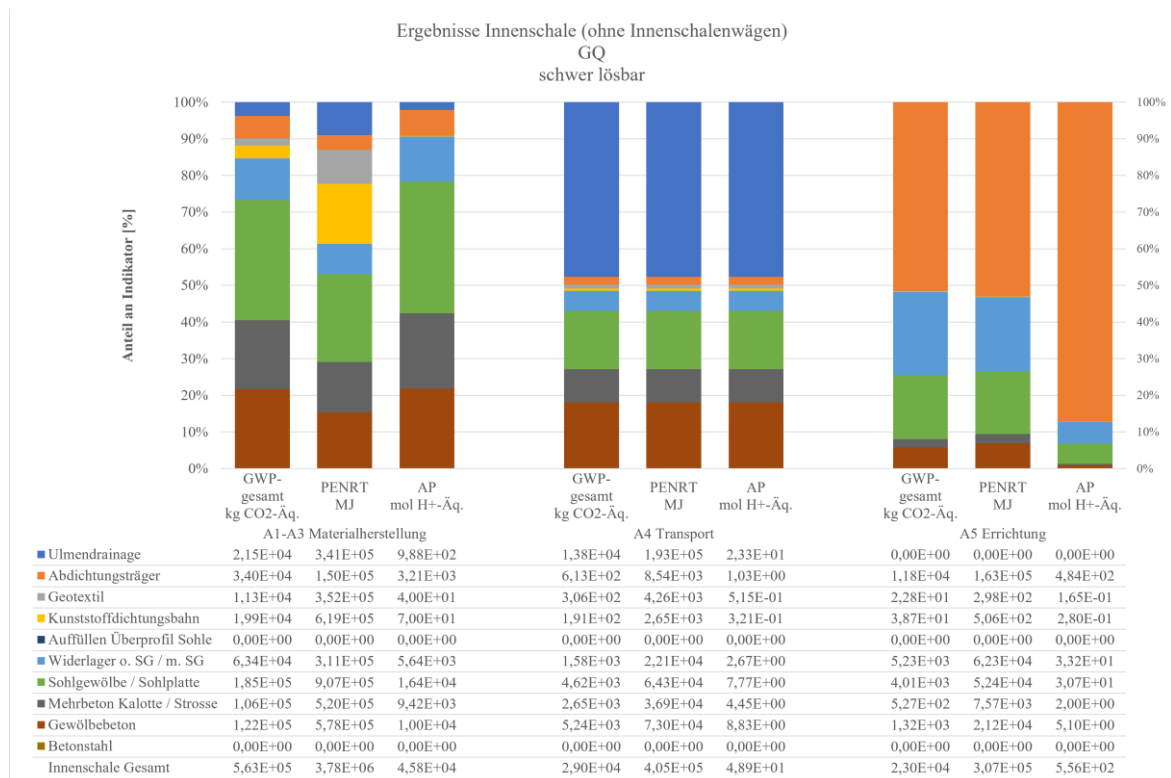


Abb. 6-73: Ergebnisse Innenschale, begehbaren Querschlag, schwer lösbar

Mittel lösbar

Der begehbare Querschlag emittiert in der mittleren Geologie einen gesamten CO₂-Äq.-Fußabdruck von etwa 4,5 Tonnen pro Tunnelmeter (vgl. Tab. 6-24).

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM disease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,35E+03	3,36E+02	8,63E+03	1,48E+03	2,57E+02	1,61E+01	1,24E-06	1,59E-05	9,86E+01	7,03E-04	3,82E+03
Innenschale	1,80E+03	2,13E+03	1,21E+04	1,58E+03	4,97E+01	3,80E-01	2,20E-07	4,72E-06	1,47E+02	1,04E-03	3,86E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	3,14E+03	2,47E+03	2,07E+04	3,06E+03	3,07E+02	1,65E+01	1,46E-06	2,07E-05	2,46E+02	1,75E-03	7,68E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	2,35E+01	6,48E-01	3,27E+02	2,45E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,06E-07	2,25E-06	3,95E-02	1,60E-06	2,30E+01
Innenschale	8,12E+01	2,24E+00	1,13E+03	8,48E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,66E-07	7,79E-06	1,37E-01	5,54E-06	7,97E+01
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,05E+02	2,89E+00	1,46E+03	1,09E+01	0,00E+00	0,00E+00	4,72E-07	1,00E-05	1,76E-01	7,15E-06	1,03E+02
A5											
Ausbruch	2,79E+02	3,42E+01	3,77E+03	8,79E+02	1,64E+00	2,97E+00	6,83E-06	6,19E-04	1,60E+00	3,54E-05	5,09E+02
Stützmaßnahmen	3,48E+02	3,74E+01	4,66E+03	1,01E+03	0,00E+00	0,00E+00	1,64E-06	1,46E-04	1,27E+01	8,76E-05	5,03E+02
Innenschale	1,75E+02	1,20E+01	1,81E+03	2,90E+02	1,39E+01	1,28E-01	2,41E-05	8,66E-05	2,12E+00	1,68E-05	4,50E+02
Deponie	4,65E+02	3,33E+02	9,72E+03	8,35E+01	0,00E+00	0,00E+00	2,10E-06	1,65E-05	2,44E+00	6,02E-05	1,49E+04
Gerätetransport	2,81E+01	7,75E-01	3,91E+02	2,93E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,27E-07	2,69E-06	4,72E-02	1,92E-06	2,75E+01
Summe A5	1,29E+03	4,17E+02	2,04E+04	2,27E+03	1,55E+01	3,09E+00	3,48E-05	8,70E-04	1,89E+01	2,02E-04	1,64E+04
A1-A5											
Summe	4,54E+03	2,89E+03	4,26E+04	5,34E+03	3,23E+02	1,96E+01	3,68E-05	9,01E-04	2,65E+02	1,95E-03	2,42E+04

Tab. 6-24: Ergebnisse begehrbarer Querschlag, mittel lösbar pro Tunnelmeter

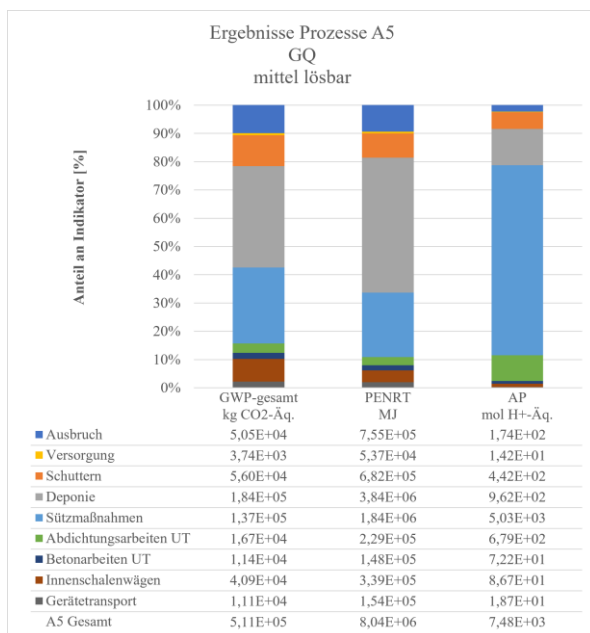


Abb. 6-74: Ergebnisse Prozesse A5, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar

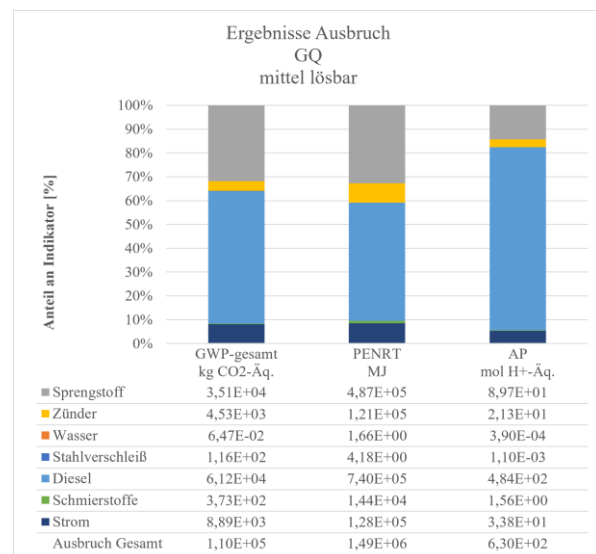


Abb. 6-75: Ergebnisse Ausbruch, begehrbarer Querschlag, mittel lösbar

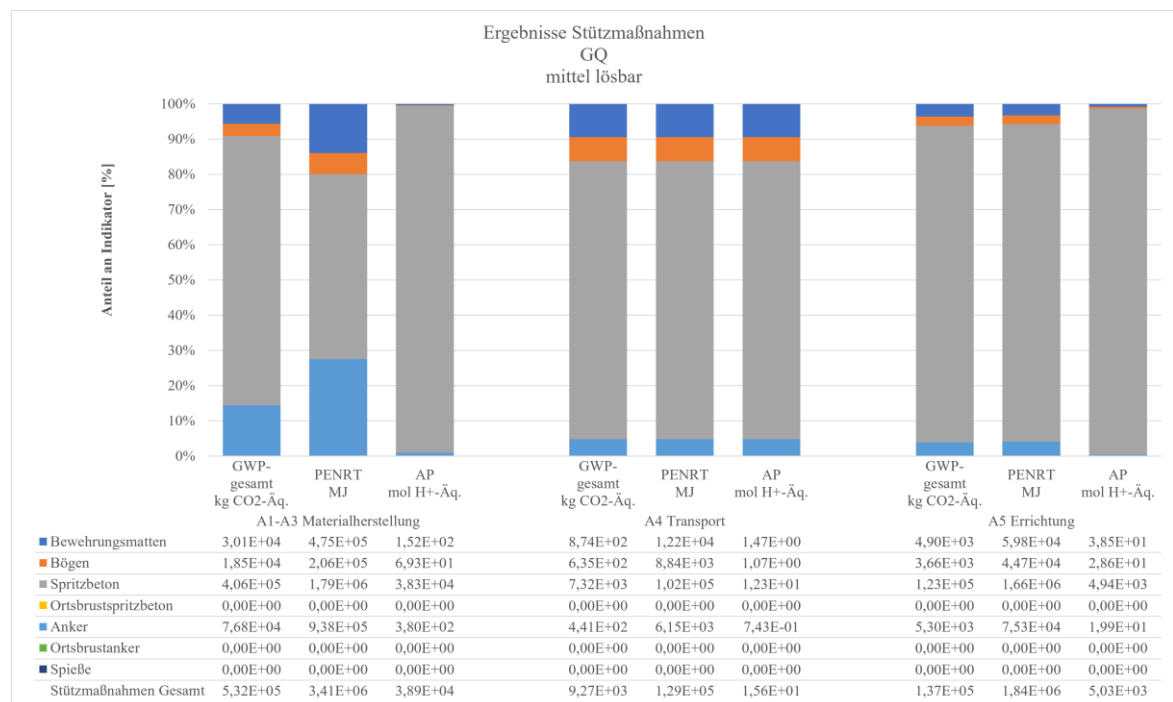


Abb. 6-76: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehbarer Querschlag, mittel lösbar

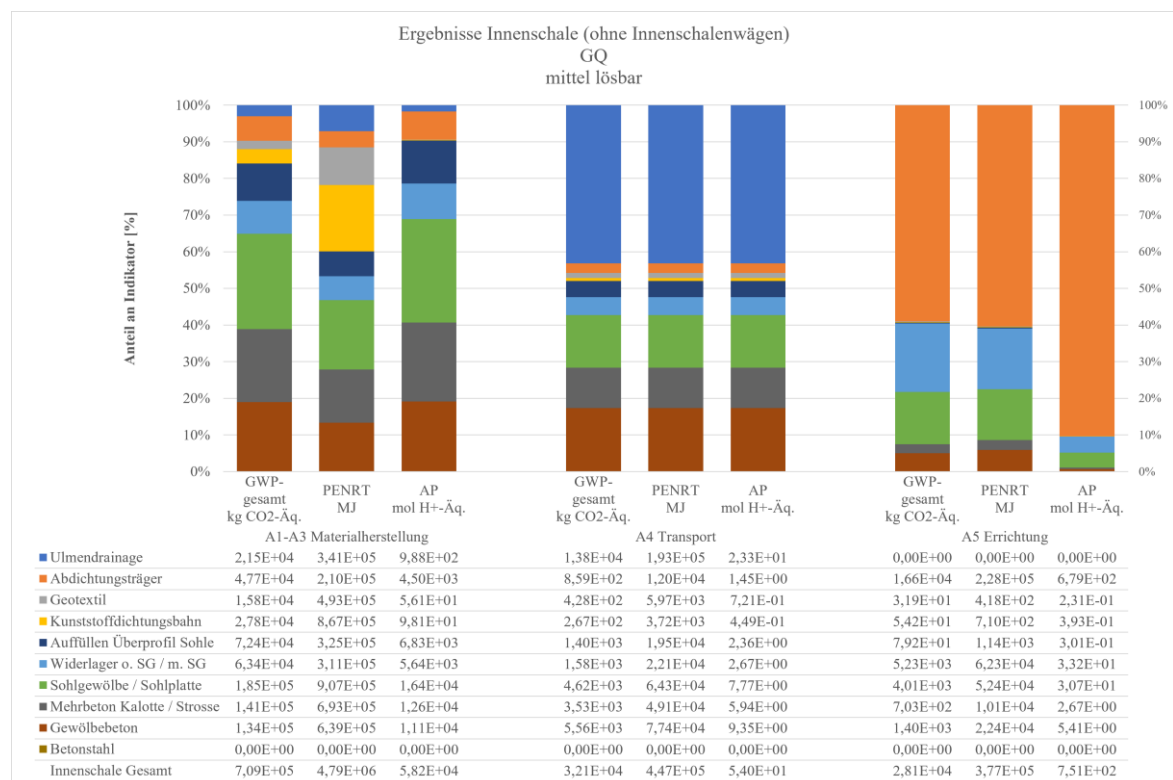


Abb. 6-77: Ergebnisse Innenschale, begehbarer Querschlag, mittel lösbar

Leicht lösbar

Ein durchschnittlicher begehrter Querschlag ruft in leicht lösbarer Geologie etwa 4,1 Tonnen CO₂-Äq. in der Materialherstellungsphase, 0,11 während der Transportphase, 1,4 in der Bau-/Errichtungsphase und somit insgesamt 5,6 t CO₂-Äq. pro Tunnelmeter hervor (siehe Tab. 6-25).

	GWP-gesamt kg CO ₂ -Äq.	WDP m ³ Welt-Äq.	PENRT MJ	PERT MJ	SM kg	MFR kg	HTP-c CTUh	HTP-nc CTUh	AP mol H ⁺ -Äq.	PM disease inc.	SQP -
A1-A3											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	1,89E+03	1,01E+03	1,13E+04	2,17E+03	4,73E+02	1,51E+01	7,21E-07	1,23E-05	1,44E+02	1,02E-03	4,03E+03
Innenschale	2,16E+03	2,32E+03	1,77E+04	3,08E+03	1,03E+03	1,61E+01	7,88E-07	6,83E-06	1,37E+02	9,93E-04	5,68E+03
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A1-A3	4,05E+03	3,33E+03	2,90E+04	5,25E+03	1,50E+03	3,13E+01	1,51E-06	1,91E-05	2,80E+02	2,01E-03	9,71E+03
A4											
Ausbruch	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Stützmaßnahmen	3,43E+01	9,49E-01	4,78E+02	3,58E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,55E-07	3,29E-06	5,78E-02	2,34E-06	3,37E+01
Innenschale	7,80E+01	2,16E+00	1,09E+03	8,15E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,52E-07	7,48E-06	1,31E-01	5,33E-06	7,66E+01
Deponie	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Gerätetransport	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Summe A4	1,12E+02	3,10E+00	1,57E+03	1,17E+01	0,00E+00	0,00E+00	5,07E-07	1,08E-05	1,89E-01	7,67E-06	1,10E+02
A5											
Ausbruch	2,23E+02	1,62E+01	2,78E+03	7,19E+02	0,00E+00	0,00E+00	8,62E-06	7,82E-04	1,65E+00	4,40E-05	5,50E+02
Stützmaßnahmen	5,13E+02	5,32E+01	6,75E+03	1,14E+03	2,00E-02	6,02E-04	2,66E-06	2,38E-04	1,98E+01	1,37E-04	5,87E+02
Innenschale	2,50E+02	1,48E+01	2,48E+03	3,62E+02	1,91E+01	3,81E-01	2,63E-05	1,02E-04	2,32E+00	1,81E-05	1,04E+03
Deponie	3,71E+02	2,65E+02	7,75E+03	6,66E+01	0,00E+00	0,00E+00	1,67E-06	1,32E-05	1,94E+00	4,80E-05	1,19E+04
Gerätetransport	2,95E+01	8,15E-01	4,11E+02	3,08E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,33E-07	2,83E-06	4,96E-02	2,01E-06	2,89E+01
Summe A5	1,39E+03	3,50E+02	2,02E+04	2,29E+03	1,91E+01	3,82E-01	3,94E-05	1,14E-03	2,57E+01	2,49E-04	1,41E+04
A1-A5											
Summe	5,55E+03	3,68E+03	5,07E+04	7,55E+03	1,52E+03	3,16E+01	4,14E-05	1,17E-03	3,06E+02	2,27E-03	2,39E+04

Tab. 6-25: Ergebnisse begehrter Querschlag, leicht lösbar pro Tunnelmeter

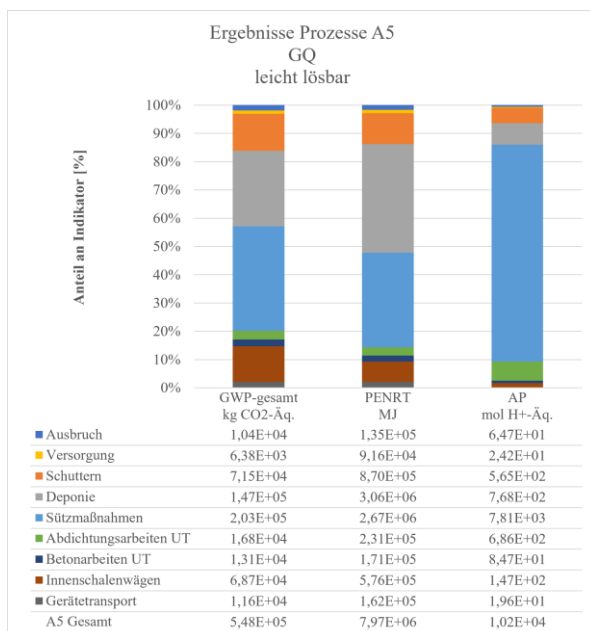


Abb. 6-78: Ergebnisse Prozesse A5, begehrter Querschlag, leicht lösbar

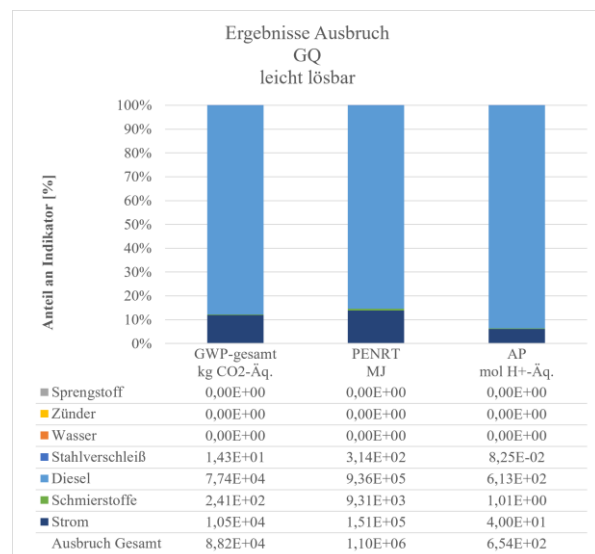


Abb. 6-79: Ergebnisse Ausbruch, begehrter Querschlag, leicht lösbar

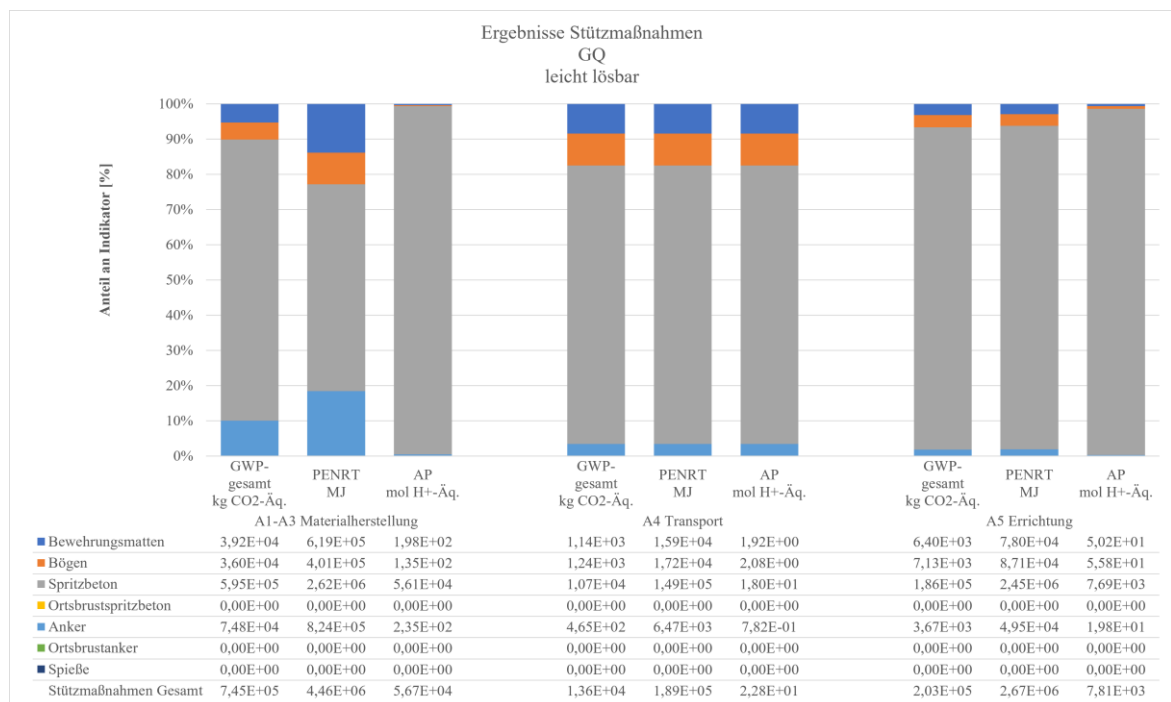


Abb. 6-80: Ergebnisse Stützmaßnahmen, begehbarer Querschlag, leicht lösbar

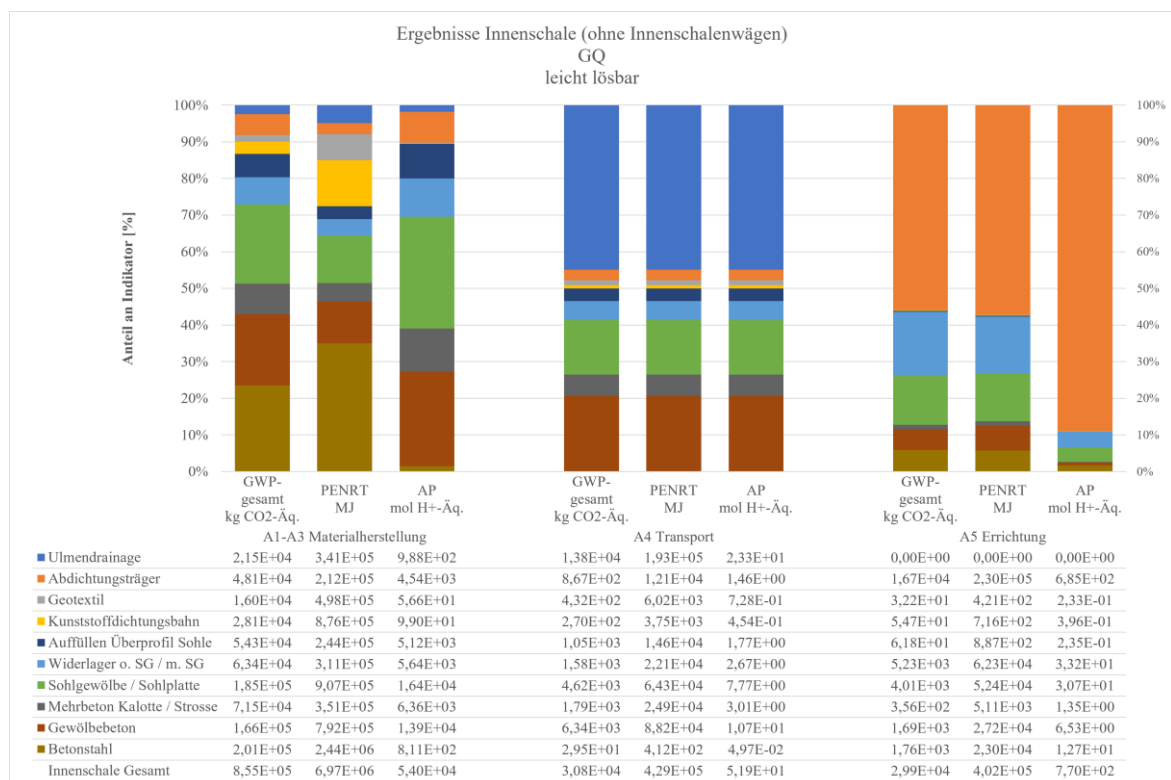


Abb. 6-81: Ergebnisse Innenschale, begehbarer Querschlag, leicht lösbar

6.6.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der ökobilanziellen Analyse der betrachteten Vortriebe verdeutlichen vor allem die Unterschiede im ökologischen Fußabdruck in Abhängigkeit der vorherrschenden geologischen Gegebenheiten und der geometrischen Querschnittsgrößen. Besonders zeigt sich, dass sich am jeweiligen durchschnittlichen Querschnitt über die drei geologischen Verhältnisse im Gesamtergebnis und in der prozentuellen Verteilung sowie in den einzelnen Lebenszyklusphasen pro m Tunnel bzw. pro repräsentativer Länge Unterschiede ergeben (vgl. vorige Abbildungen und Tab. 6-26). [53]

Weiters bedeutet das, dass die Resultate für mittel bzw. leicht lösbare Bedingungen proportional ansteigende Werte verzeichnen. Diese Erkenntnis ist ferner auf die durch tunnelbautechnische Anforderungen zunehmende Ausdehnung der Ausbruchslinie von schwer bis leicht lösbarer Geologie sowie den anwachsenden Bedarf an Stützmitteln und an Betonkubaturen der Innenschale zurückzuführen. Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Lebenszyklusphasen tragen vor allem die Materialherstellung der Stützmittel (A1-A3) und der Ausbruch (A5) maßgeblich zur Höhe der Umweltwirkungen bei.

Die Betrachtung der Ausbrucharbeiten ergibt je nach Lösemethode ein anderes Bild: Der Sprengvortrieb wird maßgeblich vom Dieselverbrauch und dem Sprengstoff geprägt, wobei die Zünder und der Strom für die Geräte und die Bewetterung bzw. Beleuchtung ebenfalls relevant sind (siehe bspw. Abb. 6-11 oder Abb. 6-39). Der Baggervortrieb wird je nachdem, ob ein großer bzw. kleiner Querschnitt vorliegt und somit ein Tunnel- oder Tunnelladebagger zum Einsatz kommt, bestimmt. Ersteres wird somit hauptsächlich durch den Dieselverbrauch des Baggers bestimmt, hingegen nimmt der Strom aufgrund des elektrischen Lösevorgangs des Tunnelladebaggers eine größere Rolle ein. Jedoch ist hier der Diesel durch das Schuttern trotzdem noch maßgebend (siehe bspw. Abb. 6-43 oder Abb. 6-79).

Bei einer detaillierten Aufschlüsselung der einzelnen Stützmittel kristallisiert sich vor allem die materialintensive Einbringung des Spritzbetons und das Material selbst als maßgebliche Haupttreiber der Umweltwirkungen heraus (siehe bspw. Abb. 6-52 oder Abb. 6-68). Im Bereich der leicht lösbaren Geologie wird diese Belastung zusätzlich durch die bautechnische Notwendigkeit des Ortsbrustspritzbetons massiv beeinflusst. Demgegenüber weisen Komponenten wie Anker, Bewehrung oder Stahlbögen – primär bedingt durch die intermittierende Anordnung und den im Verhältnis geringeren Materialeinsatz pro Laufmeter – ein deutlich reduziertes Wirkungspotenzial auf und tragen nur sekundär zum gesamten Fußabdruck der Sicherungsmaßnahmen bei. Jedoch besitzen die Anker und Spieße dort je nach Querschnitt die zweit- bzw. drittgrößten Werte nach dem (Ortsbrust-)Spritzbeton. [53]

Die Analyse der Innenschalenarbeiten ergibt, dass die Betonarbeiten aufgrund der mengenmäßig dominierenden und ökologisch prägenden Materialien sowie der aufwendigen Transport- und Einbauprozesse die Auswirkungen maßgeblich beeinflussen. Wobei die größten

Bestandteile dabei der Gewölbebeton und die Sohlplatte bzw. das Sohlgewölbe mit bis zu mehr als die Hälfte der gesamten Wirkungen in A1-A5 sind. Darüber hinaus beeinflussen die bewehrten Querschnitte der schlechten, leicht lösbaren Geologie die Gesamtergebnisse massiv, denn die Bewehrung erreicht je nach Querschnitt annähernd 40 % des gesamten Primärenergiebedarfs (siehe bspw. Abb. 6-13).

Die generelle Betrachtung der übergeordneten Arbeitsschritte bzw. Prozesse zeigt, dass die Innenschale den größten Anteil mit ca. 40 bis 52 % des gesamten Treibhauspotenzials über die Phasen A1-A5 hinweg bewirkt (vgl. Abb. 6-82 bis Abb. 6-87). In dieser zusammengefassten Darstellung zählen die Innenschalenwägen zur Innenschale dazu, was die Prozentwerte etwas in die Höhe treibt (ca. 10 % bei der leicht lösbaren Geologie). Der zweitgrößte Anteil richtet sich stark nach der modellierten Geologie und dem jeweiligen Tunnelquerschnitt. Bei der schwer lösbaren Geologie belegt die Deponie bis zu 25 % und bei der leicht lösbaren Klasse nur etwa bis maximal 7 %. Hingegen bewirken die Stützmaßnahmen bei der leicht lösbaren Klasse aufgrund der größeren Stützmittelmenge den zweitgrößten Anteil mit bis zu 44 %. Bei der schwer lösbaren Geologie reichen diese nur bis max. 22 %. Den restlichen relevanten Anteil bildet der Ausbruch mit maximal etwa 8 %. Die Abgrenzung zwischen der Deponie und dem Ausbruch selbst wird bewusst gewählt, sodass die Einflüsse besser ersichtlich sind. Der kleine Restbetrag verteilt sich auf den An- und Abtransport der Geräte der aufgrund der geringen Tonnagen der Geräte im Vergleich zu den gesamten Transporten marginal ausfällt.

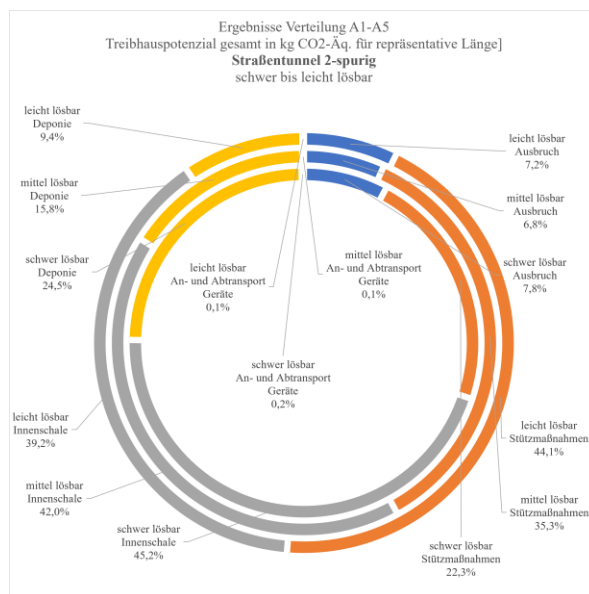


Abb. 6-82: Ergebnisse Verteilung A1-A5,
Straßentunnel 2-spurig

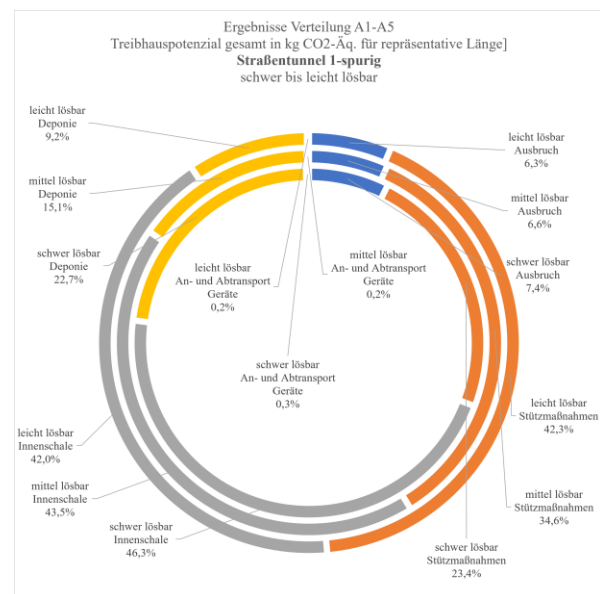


Abb. 6-83: Ergebnisse Verteilung A1-A5,
Straßentunnel 1-spurig

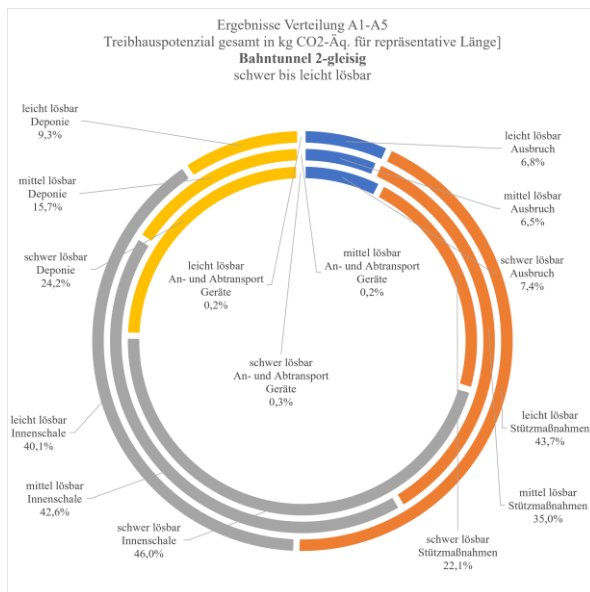


Abb. 6-84: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Bahntunnel 2-gleisig

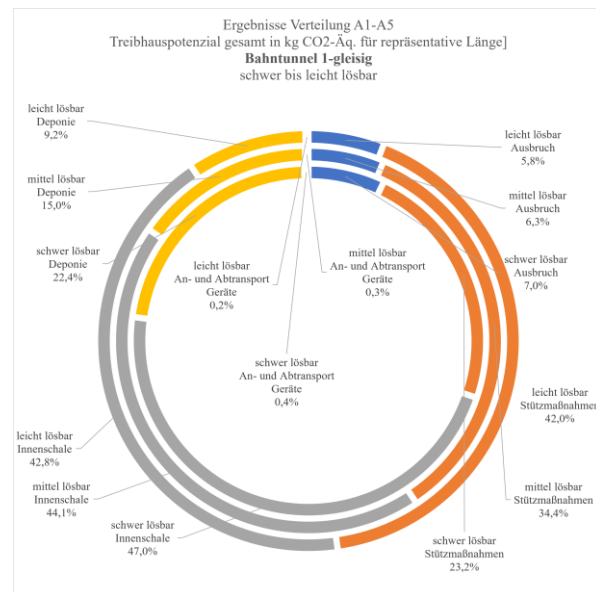


Abb. 6-85: Ergebnisse Verteilung A1-A5, Bahntunnel 1-gleisig

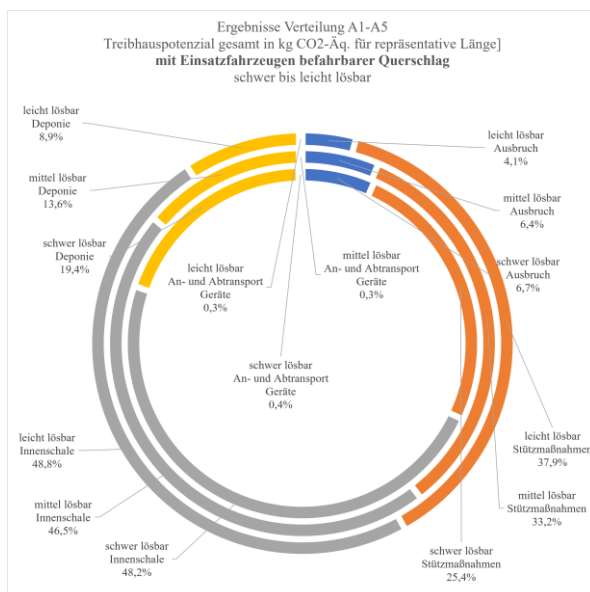


Abb. 6-86: Ergebnisse Verteilung A1-A5, befahrbarer Querschlag

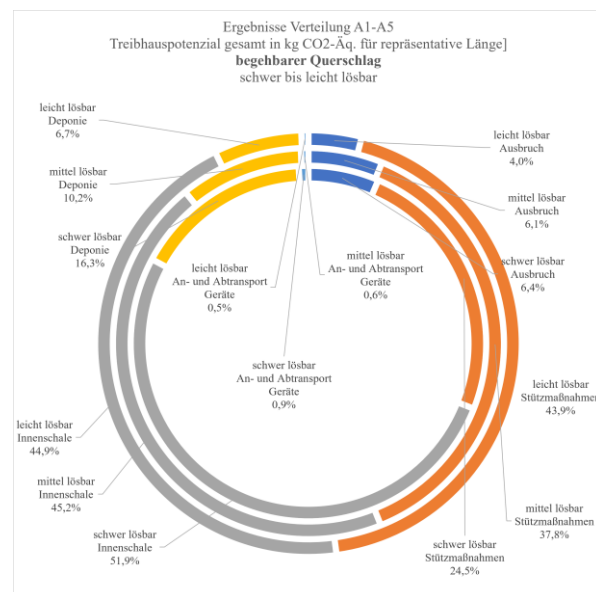


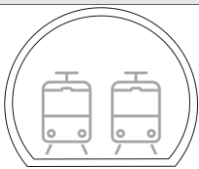
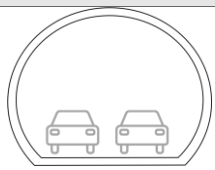
Abb. 6-87: Ergebnisse Verteilung A1-A5, begehrbarer Querschlag

Die relativen Beiträge der einzelnen Lebenszyklusphasen werden maßgeblich durch die angenommene Geologie sowie den jeweiligen Tunnelquerschnitt beeinflusst. Daraus ergibt sich folgende phasenspezifische Verteilung:

- Materialherstellungsphase A1-A3: etwa 56 bis 73 %
- Transportphase A4: etwa 1 bis 3 %
- Errichtungsphase A5: etwa 25 bis 42 %

6.6.5 Gegenüberstellung in Abhängigkeit der Querschnittsgröße

Um die vielen Ergebnisse der vorigen Abschnitte übersichtlich zusammenzufassen und für Vergleiche zur Verfügung zu stellen, werden die Ergebnisse des insgesamten Treibhauspotenzials in Tab. 6-26 präsentiert. Die Mittelwertbildung entspricht dabei einem geologisch durchschnittlichen Tunnel, dessen Auswirkungen leicht über dem Tunnel mit einer mittelschwer lösbar Geologie liegen.

Tunnelart	Geologie	GWP-gesamt [t CO ₂ -Äq.] pro Meter Tunnel	GWP-gesamt [t CO ₂ -Äq.] für repr. Tunnellänge
Bahntunnel 2-gleisig			
	schwer lösbar	9,7	3.833,1
	mittel lösbar	14,0	5.513,1
	leicht lösbar	19,6	7.730,3
	Mittelwert	14,4	5.692,2
Straßentunnel 2-spurig			
	schwer lösbar	9,6	5.586,4
	mittel lösbar	13,8	8.072,9
	leicht lösbar	19,4	11.321,4
	Mittelwert	14,3	8.326,9
Bahntunnel 1-gleisig			
	schwer lösbar	7,5	2.969,5
	mittel lösbar	10,3	4.067,9
	leicht lösbar	13,7	5.417,6
	Mittelwert	10,5	4.151,7
Straßentunnel 1-spurig			
	schwer lösbar	7,4	4.334,1
	mittel lösbar	10,2	5.960,8
	leicht lösbar	13,6	7.935,8
	Mittelwert	10,4	6.076,9
mit Einsatzfahrzeugen befahrbare Querschläge			
	schwer lösbar	5,3	3.081,8
	mittel lösbar	6,6	3.848,6
	leicht lösbar	7,8	4.550,2
	Mittelwert	6,6	3.826,9
begehbare Querschläge			
	schwer lösbar	3,2	1.263,3
	mittel lösbar	4,5	1.793,5
	leicht lösbar	5,5	2.192,1
	Mittelwert	4,4	1.749,6

Tab. 6-26: Ergebnisse GWP-gesamt je nach Tunnelart

7 Diskussion

7.1 Ergebnisdiskussion

7.1.1 Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass einerseits die geologischen Verhältnisse maßgeblich die Höhe der Umweltwirkungen im Tunnelbau beeinflussen. Geradewegs setzt sich der Fußabdruck pro Tunnelmeter bzw. für den repräsentativen Tunnel hauptsächlich aus der damit verbundenen Art der Lösemethode, der Deponie des Ausbruchmaterials, der notwendigen Stützmittel und der Innenschale zusammen [53]. Ein zyklisch vorgetriebener Tunnel mit Innenschale emittiert dabei im Mittel (gleiche Anteile leicht, mittel und schwer lösbar) ca. 4,4 bis 14,3 Tonnen CO₂-Äq. pro tm (vgl. Tab. 6-26).

Dabei kristallisierten sich vor allem auf der Materialseite der Beton, der Stahl sowie das Ausbruchmaterial und auf der Energieseite der Diesel und Strom als die mengenmäßig dominierenden Positionen pro Tunnelmeter heraus (vgl. Abb. 6-6 bis Abb. 6-9). Die in der Einleitung erwähnten Massenströme der Literatur (vgl. Tab. 1-2 und Tab. 1-3) decken sich mit den in Tab. 7-1 präsentierten Mengen.

Mengengerüst pro Meter	Eisenbahntunnel, eingleisig Straßentunnel, einspurig	Eisenbahntunnel, zweigleisig Straßentunnel, zweispurig
(Spritz- und Ort-) Beton [t]	55,8 ÷ 93,0	69,6 ÷ 129,7
Stahl (insgesamt) [t]	0,1 ÷ 3,3	0,2 ÷ 4,5
Ausbruchmaterial [t]	132,3 ÷ 177,5	191,2 ÷ 247,1
Diesel [l]	82,2 ÷ 203,5	108,8 ÷ 328,4
Strom [kWh]	490,0 ÷ 1166,8	696,6 ÷ 1770,0

Tab. 7-1: Mengengerüst Ergebnisse

Betrachtet man die Auswirkungen der wesentlichen Positionen Beton, Stahl sowie die notwendigen Energien mittels Diesel und Strom auf das Treibhauspotenzial, so lassen sich die Bandbreiten der prozentuellen Anteile je nach Geologie und Querschnitt in Tab. 7-2 aufzeigen. Der Spritzbeton – nur das Material ohne Transport, Einbau oder Zusatzmittel etc. – bewirkt etwa 30 % der gesamten Materialherstellungsphase A1-A3 und 16 ÷ 22 % der gesamten Ergebnisse für GWP-gesamt in den Phasen A1-A5. Dieser Wert umfasst den im Tunnel verbleibenden Spritzbeton der Stützmittel und des Abdichtungsträgers und korreliert im Wesentlichen mit der Spritzbetonstärke (Geologie) und der aufzutragenden Fläche (Querschnitt).

Der Konstruktionsbeton bewirkt etwa $38 \div 63$ % des CO₂-Äq.-Fußabdrucks der Phase A1-A3 und ca. $23 \div 35$ % der gesamten Phasen A1-A5. Wiederum hängt diese Schwankungsbreite maßgeblich davon ab, ob ein Sohlgewölbe oder eine Sohlplatte in der Innenschale notwendig ist sowie welche Stärke der Gewölbebeton im jeweiligen Querschnitt aufweist.

Der gesamte Stahl, welcher im Bauwerk verbleibt – also Bewehrungsmatten, Anker, Spieße, Bewehrung der Innenschale etc. – bewirkt etwa fünf Prozent bis annähernd ein Viertel der gesamten Materialherstellungsphase und $3 \div 15$ % über die Phasen A1-A5. Die Auswirkungen werden stark durch die abgebildete Geologie und die daraus folgenden Anforderungen an die Stützmittellanzahl sowie die bewehrte Innenschale geprägt.

Bei den Energiepositionen bewirkt der verbrannte Diesel (ohne Schmierstoffe) ca. $11 \div 19$ % in A5 und $4 \div 7$ % in A1-A5. Hingegen nimmt der Strom zwar mengenmäßig eine relevante Rolle ein, jedoch äußert sich dieser nur mit Anteilen von max. 4 % in der Errichtungsphase A5 und etwa 1 % in den gesamten Phasen A1-A5.

Phase	Anteil an Phase
Spritzbeton (nur Material)	
Summe A1-A3	$28 \div 31$ %
Summe A1-A5	$16 \div 22$ %
Konstruktionsbeton (nur Material)	
Summe A1-A3	$38 \div 63$ %
Summe A1-A5	$23 \div 35$ %
Stahl (Summe an Material)	
Summe A1-A3	$5 \div 24$ %
Summe A1-A5	$3 \div 15$ %
Diesel	
Summe A5	$11 \div 19$ %
Summe A1-A5	$4 \div 7$ %
Strom	
Summe A5	$2 \div 4$ %
Summe A1-A5	ca. 1 %

Tab. 7-2: Anteile der wesentlichen Bestandteile an den gesamten Treibhauspotenzialen der jeweiligen Lebenszyklusphase

7.1.2 Vergleich mit anderen Ergebnissen

Die komparative Validierung der im Rahmen dieser Untersuchung generierten Sachbilanzdaten mit diversen Werten der momentan verfügbaren Fachliteratur bestätigt die inhärente Konsistenz der angewendeten Berechnungsmodelle. Um ein umfassendes und methodisch transparentes Bild der ökologischen Auswirkungen zu generieren, werden die Ergebnisse nachfolgend in fünf Abschnitten analysiert und gegenübergestellt.

Die Strukturierung folgt dabei einer sukzessiven Skalierung vom Gesamtsystem bis ins Detail. Zunächst werden die absoluten quantitativen Kennwerte pro Tunnellaufmeter differenziert nach

Tunneltyp und Geologie validiert. Anschließend wird der Fokus auf die relative Allokation der Hauptmaterialien sowie die Gewichtung innerhalb der Lebenszyklusmodule für die Phasen A1 bis A5 gelegt. Die restlichen Abschnitte widmen sich der prozessanalytischen Betrachtung der primären Hauptbestandteile des abgebildeten Tunnelbauwerks. Hierbei werden die spezifischen Treiber und stofflich-energetischen Verteilungen innerhalb der übergeordneten Prozesse Ausbrucharbeiten, Stützmaßnahmen und Innenschale systematisch mit den Benchmarks der internationalen Fachliteratur abgeglichen.

7.1.2.1 Absolute quantitative Indikatoren nach Tunneltyp und Geologie

Im Bereich des zweispurigen Straßentunnels weisen die eigenen Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von den gebirgstechischen Rahmenbedingungen eine Spannweite von 9,6 bis 19,4 t CO₂-Äq./m (Mittelwert: 14,3 t CO₂-Äq./m) auf. Diese Streuung korrespondiert in hoher Präzision mit den Werten der Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft, welche in ihrem Bericht „Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastrukturbau“ für geschlossene Vortriebe einen Emissionskennwert von circa 19,0 t CO₂-Äq./m (Stand 2022) sowie einen durch verfahrenstechnische Dekarbonisierung optimierten Zielwert von 11,5 t CO₂-Äq./m für das Jahr 2035 definiert [47]. Ergänzend stützen die Richtwerte des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen („Empfehlungen zur Nachhaltigkeit im Untertagebau Teil 2“) mit etwa 11,3 t CO₂-Äq./m [67] für einen zweispurigen Straßentunnel sowie die Ergebnisse einer Ökobilanzstudie zum Fernpasstunnel 2023 mit einem Zahlenwert von 12,7 t CO₂-Äq./m [57] für den zweispurigen Straßentunnel.

Für den eingleisigen Bahntunnel resultiert eine eigene Bandbreite von etwa 7,5 bis 13,7 t CO₂-Äq./m (Mittelwert: 10,5 t CO₂-Äq./m), was beinahe exakt mit dem Referenzwert des Bundesamts für Verkehr („BAV Umweltbilanz Bahninfrastruktur“, erstellt durch Carbotech) übereinstimmt [24]. Das BAV gibt als Referenzwert für ein analoges Profil bei einer 100-jährigen Lebensdauer einen Wert von 10,8 t CO₂-Äq./m aus [24].

Die Sensitivität in Abhängigkeit der modellierten Geologie – mithin der progressive Anstieg des Treibhauspotenzials bei zunehmend anspruchsvolleren Gebirgsklassen – deckt sich mit einer vergleichbaren Studie, die bei einer Ausbruchsfläche von ca. 100 m² für einen zweispurigen Straßentunnel Ergebnisse ohne Innenschale, jedoch inklusive Ausbruch und Stützmaßnahmen, von 3,2 t CO₂-Äq./m (leicht lösbar) über 6,2 t CO₂-Äq./m (mittel lösbar) bis zu 11,5 t CO₂-Äq./m (schwer lösbar) ausweisen [53]. Dass der Ausbruch ohne wesentliche Stützmittel in ähnlicher Weise ökologisch querschnittsabhängig und daher emissionsarm ist, stützen auch skandinavische Untersuchungen („*Environmental impact of drill and blast tunnelling: life cycle assessment*“), die Werte von etwa 0,42 t CO₂-Äq./m für kleinere Profile bis zu 1,45 t CO₂-Äq./m für größere Querschnitte (Standardtunnel mit 67 m² bei 0,9 t CO₂-Äq./m) beziffern [23].

Soweit punktuell signifikant höhere Literaturwerte publiziert wurden, wie etwa für den Katzenbergtunnel (28,5 t CO₂-Äq./m) oder den Grenztunnel Füssen (22,0 t CO₂-Äq./m) in der Dissertation von Sauer [22], ist dies primär auf erweiterte Bilanzierungsgrenzen sowie differente Ökodaten zurückzuführen. Dies bestätigt der direkte Vergleich mit einer Studie für Infrastrukturbauten [25] („Grundlagen für Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen von Infrastrukturbauten“), welche für bergmännische Straßentunnel rund 20 t CO₂-Äq./m und für Eisenbahntunnel ca. 15 t CO₂-Äq./m angibt, diese jedoch explizit inklusive der nachgelagerten Betriebs- und Erhaltungsphasen (Module B und C) über einen Betrachtungsraum von 100 Jahren akkumuliert.

7.1.2.2 Relative Allokation der Hauptmaterialien und Lebenszyklusmodule (A1–A5)

Die werkstoffseitige Untersuchung weist den zement- und stahlgebundenen Komponenten die primäre Rolle zu (vgl. Tab. 7-2). Der materialimmanente Anteil des Spritzbetons schlägt in den Modulen A1-A5 mit 16 % bis 22 % zu Buche, während der Konstruktionsbeton mit etwa 23 % bis 35 % bilanziert wird. Diese kumulierte Dominanz der Bindemittelphase deckt sich mit den Berechnungen der DAUB-Empfehlung, nach welcher die maßgeblichen Treiber die Innenschale (Beton und Bewehrung) mit rund 39,6 % und der Spritzbeton mit 28,5 % der Gesamtemissionen sind [67]. Das BAV beziffert diesen materialübergreifenden Betonanteil allgemein mit rund 40 % der gesamten Umweltbelastung [24]. Die verbleibenden stofflichen und energetischen Inputs der eigenen Analyse, namentlich Baustahl (3 ÷ 15 %), Dieselmotorkraftstoff (4 ÷ 7 %) und elektrischer Strom (circa 1 %), harmonisieren gleichfalls mit den Daten der Fachliteratur.

Die beträchtliche Schwankungsbreite der Hauptmaterialien wird in den Berechnungen von Sauer bestätigt, welche je nach Vortriebsverhältnissen Anteile von 37 % bis 70 % für Spritzbeton, 10 % bis 37 % für Konstruktionsbeton und 2 % bis 13 % für Stahl ausweist [22]. Dies wird darauf zurückgeführt, ob im Vortrieb sicherungsintensive Maßnahmen wie eine schwere Ortsbrustsicherung, ein bewehrter Querschnitt oder stark bewehrte Innenschalen erforderlich sind. Ergänzend stützt die Fernpassstudie diese stoffliche Verteilung, indem sie die Vortriebsphase zu 52 % durch den Spritzbeton (neben jeweils 12,5 % für Strom und Diesel) und die Innenschalenphase zu 57,5 % durch den Sohlbeton sowie zu 41,8 % durch den Gewölbebeton (mit etwa 0,3 % Strom) dominiert ausweist [57].

In Bezug auf die Abgrenzung der Lebenszyklusphasen validiert die Literatur die ermittelte Dominanz der Materialherstellung (Phasen A1 bis A3), die im Rahmen dieser Arbeit 56 % bis 73 % der Gesamtwirkungen herbeiführt. Andere Studien bestätigen die Hauptwirkung der Phasen A1-A3 als emissionsstärkstes Segment [25] und quantifizieren diesen Schwerpunkt mit Werten von 81 % [67] bzw. 84 % von den gesamten Emissionen aus A1-A5 in der Masterarbeit von Hopf [26] („Ökobilanzierung im Tunnelbau“) auf einem tendenziell noch konservativeren Niveau, jedoch für ein ausländisches Bauvorhaben mit dementsprechend anderen

Hintergrunddaten. Letzteres belegt aggregiert, dass die Ressourcenverbräuche von Spritzbeton, Beton, Stahl und Energie mit rund 93 % den Hauptanteil am GWP-gesamt innerhalb von A1-A5 bilden [26].

Die logistische Transportphase A4 nimmt mit einem eigenen Anteil von etwa 1 % bis 3 % eine untergeordnete Stellung ein und erfährt eine punktgenaue Bestätigung durch die DAUB-Modellierung, die für Standarddistanzen (20 km Radius) exakt 1 % der Gesamtemissionen ausweist [67]. Demgegenüber beläuft sich die baustellenseitige Errichtungsphase A5 in der eigenen Sachbilanz auf 25 % bis 42 %. Dieser Wert übersteigt das zuvor genannte Referenzszenario (18 % für Herstellprozesse) geringfügig, was der detaillierten, prozessspezifischen Erfassung des zyklischen Maschinen- und Gerätebetriebs im Untertagevortrieb dieser Arbeit geschuldet ist (bspw. Berücksichtigung der Innenschalenwägen in dieser Studie etc.).

7.1.2.3 Prozessanalytische Betrachtung der Ausbrucharbeiten

Innerhalb der Teilleistung Ausbruch kristallisiert sich der Dieselmotorkraftstoffverbrauch der Vortriebs- und Ladegeräte als der dominierende Umweltindikator heraus, welcher in der eigenen Erhebung etwa 57 % des Treibhauspotenzials sowie 51 % des Primärenergiebedarfs determiniert. Als zweite Kernkomponente erweist sich der im Sprengvortrieb eingesetzte Sprengstoff mit einem GWP-gesamt-Anteil von ca. 30 %, wohingegen die Aufwendungen für Strom und Zünder unter der 10-%-Relevanzgrenze verbleiben. Bei der Durchführung eines rein mechanischen Baggervortriebs verschiebt sich diese Allokation erwartungsgemäß fast vollständig zugunsten des fossilen Energieträgers, sodass der Dieselmotorkraftstoffverbrauch etwa 90 % bis 96 % der Wirkungen beansprucht.

Diese prozessuale Gewichtung divergiert in Teilen von internationalen Datensätzen, bei welchen sich die Hauptemissionsquellen beim Bohren und Sprengen zu rund 35 % auf Diesel, zu 22 % auf Sprengstoffe und zu 36 % auf elektrischen Strom aufteilen [23]. Diese Diskrepanz im Bereich der elektrischen Energie resultiert primär aus der Spezifik des österreichischen Strommixes und der unterschiedlichen Geologie sowie der eingesetzten Maschinen. Demgegenüber stützt die Empfehlung die ermittelte Dominanz fossiler Energieträger, indem sie etwa 60 % der Modul-A5-Emissionen der direkten Dieselmotorkraftstoffverbrennung durch Baumaschinen zuschreibt und den Abtransport des Tunnelausbruchmaterials mit einem Anteil von 40 % innerhalb des Errichtungsmoduls bilanziert [67]. Diese Ergebnisse stimmen in der Größenordnung mit den eigenen Ergebnissen überein (siehe bspw. Abb. 6-82).

7.1.2.4 Prozessanalytische Betrachtung der Stützmaßnahmen

Bei der Herstellung und dem Einbau der Stützmittel besetzt der Spritzbeton mit einem berechneten Anteil von 70 % bis 99 % den ökologischen Hauptemittent, wohingegen die Anker mit einem Anteil von etwa 13 % eine sekundäre Rolle einnehmen. In der leicht löslichen Geologiekategorie wird der ökologische Fußabdruck fast ausschließlich durch die Kombination

aus dem Spritzbeton sowie Ortsbrustspritzbeton dominiert, welche zusammen etwa 63 % bis 99 % der Emissionen innerhalb der Stützmaßnahmen verursachen.

Diese Dominanz zementgebundener Stützmaßnahmen wird durch empirische Projektdaten gestützt, die dem Spritzbeton innerhalb der Vortriebs- und Sicherungsphase eine ökologische Hauptrolle von 52 % – neben jeweils 12,5 % für Strom und Diesel – zuweisen [57]. Weitere Ergebnisse bestätigen die materielle Verteilung, wonach der Spritzbetonanteil an den Stützmitteln je nach Vortriebsverhältnissen bis zu 70 % einnimmt [22], während der Anteil von Stahlkomponenten erst bei sicherungsintensiven Ausbruchsklassen maßgeblich ansteigt [67].

7.1.2.5 Prozessanalytische Betrachtung der Innenschale

Im Segment der Innenschale konzentrieren sich die Umweltwirkungen auf den Gewölbebeton und die Sohlplatte, welche isoliert betrachtet rund 25 % bis 37 % des Fußabdrucks der übergeordneten Arbeiten verursachen. Unter Berücksichtigung des gesamten bewehrten Querschnitts beläuft sich dieser Anteil auf 20 % bis 44 % der Gesamtauswirkungen des Tunnelbauwerks.

Diese Verteilung korreliert mit den anderen Erkenntnissen, bei denen der Innenausbau zu 57,5 % durch den Sohlbeton und zu 41,8 % durch den Gewölbebeton dominiert wird [57]. Die strukturelle Gesamtbetrachtung der deutschen Empfehlung, welche die gesamte Baugruppe „Innenschale“ (Beton- und Bewehrungsstahl) mit einem Anteil von 39,6 % bis 41 % an den Gesamtemissionen als das maßgebliche, bautechnisch vom Vortrieb weitgehend entkoppelte Hauptemissionssegment definiert, verifiziert die Zahlenwerte [67].

7.1.2.6 Datengrundlage und methodische Hintergründe der Ökobilanzierung

Die Aussagekraft, Validität und regionale Spezifik der Sachbilanzierung hängen maßgeblich von der Qualität und Herkunft der herangezogenen Hintergrunddaten ab. Um die spezifischen baubetrieblichen und geologischen Randbedingungen realitätsnah abzubilden, basiert die Datenbeschaffung der vorliegenden Arbeit, wie bereits erwähnt, primär auf spezifischen Umweltproduktdeklarationen. Es wurden gezielt verifizierte EPDs österreichischer Hersteller und Verbände herangezogen, um den nationalen Produktionsstandard und den lokalen Marktexplorationen im Bereich des Tunnelbaus gerecht zu werden. In Fällen, in denen keine länderspezifischen Deklarationen für Österreich verfügbar waren, wurde die Datengrundlage durch EPDs aus den direkten Nachbarländern oder dem erweiterten EU-Raum substituiert. Lediglich für Prozesse oder spezifische Komponenten, für welche keine spezifischen Produktdeklarationen existieren, wurde auf generische Datensätze zurückgegriffen (wiederholend sind hier die Schmierstoffe sowie die *End-of-Life*-Prozesse zu nennen).

Dieser methodische Ansatz einer primär hersteller- und produktspezifischen EPD-Datenbasis unterscheidet sich grundlegend von den Ansätzen vieler vorliegender Referenzstudien, deren Datenursprünge im Folgenden systemisch gegenübergestellt werden:

- Eigene Analyse vs. Fachpublikationen: Analog zur methodischen Stringenz dieser Arbeit nutzen auch aktuelle Fachpublikationen [53] eine fundierte Basis aus EPDs für die wesentlichen Materialien. Generische Hintergrunddaten aus Datenbanken wie ecoinvent [104] werden dort ebenfalls restriktiv gehandhabt und lediglich für verfahrenstechnische Sonderfälle sowie Datenlücken appliziert (bspw. Sprengstoff und Schmieröl)
- Referenz- und Zielwerte: Die übergeordneten Benchmarks dieser Literaturen basieren auf stark aggregierten oder datenbankgestützten Modellen. Während die österreichische Studie der Schieneninfrastruktur-Dienstleistungsgesellschaft (SCHIG) [47] zur rechnerischen Ermittlung ihrer Zielwerte größtenteils auf generische Datensätze der Datenbank ecoinvent, ergänzt durch punktuelle (Branchen-)EPDs, zurückgreift, stellt die Studie graue Emissionen von Infrastrukturbauten [25] eine Synthese bestehender Literaturwerte mit Verweis der verwendeten Quelle dar, ohne die zugrundeliegende material- und prozessseitige Primärdatengrundlage detailliert offenzulegen.
- Empfehlungen: Die Empfehlungen des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen stützen sich im Rahmen ihrer Berechnungen auf etablierte, teils kommerzielle Ökobilanzierungsdatenbanken. Hierzu zählen primär die Datenbestände des Instituts Bauen und Umwelt e. V. (IBU-Datenbank), die Sphera-Datenbank (ehemals GaBi), die deutsche ÖKOBAUDAT sowie skandinavische Datensätze der EPD Norge (diese Datenbank wurde für diese Arbeit ebenfalls verwendet). Damit weisen die Ergebnisse ein hohes Maß an europäischer Standardisierung auf, verbleiben jedoch größtenteils auf einer übergeordneten, datenbankbasierten Ebene.
- Studien: Die Studie des Bundesamtes für Verkehr [24] sowie die Fernpassstudie [57] weisen eine starke methodische Verwandtschaft auf, indem sie im Bereich der Baustellenprozesse und der Transportlogistik maßgeblich auf die generische Datenbank ecoinvent sowie erstere auf die Datenbank des Schweizerischen Bundesamts für Umwelt zurückgreifen. Die Transportprozesse und energetischen Aufwendungen werden hier fast vollständig über standardisierte ecoinvent-Datensätze abgebildet.
- Wissenschaftliche Monografien und Dissertationen: Sowohl die skandinavische Untersuchung [23] als auch die Masterarbeit von Hopf [26] basieren forschungsmethodisch auf einer nahezu vollständigen Modellierung mittels generischer ecoinvent-Hintergrunddaten. Die Dissertation von Sauer [22] nutzt spezifische Emissionsfaktoren mit geografischem Fokus auf Deutschland, verzichtet im Rahmen der Publikation jedoch auf eine detaillierte Offenlegung der verwendeten Hintergrunddaten oder der den CO₂-Äq. zugrundeliegenden Sachbilanzstrukturen.

7.2 Limitationen

Die methodische Konzeption dieser Untersuchung war gezielt auf die Abbildung repräsentativer Randbedingungen der österreichischen Tunnelbaupraxis ausgerichtet. Im Fokus

stand dabei die Modellierung eines störungsfreien Regelvortriebs und Regelquerschnitts der freien Strecke. Geologische und geometrische Unwägbarkeiten wie beispielsweise Störzonen, tunnelbautechnische Sondermaßnahmen oder lokale Querschnittserweiterungen (z. B. Injektionsschirm oder Pannenbucht) wurden im Rahmen dieser Studie explizit ausgeklammert. Zudem blieben projektspezifische Logistik- und Prozessschritte – darunter die Wiederverwendung bzw. Verwertung des Ausbruchmaterials sowie der an die Innenschale nachfolgende Einbau des Bahn- bzw. Straßenoberbaus – außerhalb der definierten Systemgrenzen. Gleiches gilt für die nachgelagerten Lebenszyklusphasen der Nutzung, Instandhaltung und des späteren Rückbaus. Für eine umfassende und ganzheitliche Nachhaltigkeitsbeurteilung eines realen Bauvorhabens sind diese Faktoren jedoch von wesentlicher Bedeutung und müssen objektspezifisch bilanziert werden [53]. Folglich sind die ermittelten ökologischen Zahlenwerte der Phasen A1-A5 als Benchmark für typische durchschnittliche österreichische Verkehrstunnel mit „normalen“ Längen zu verstehen, da extreme Ausreißer – wie sehr kurze Sonderbauwerke oder Großprojekte (z. B. Brenner Basistunnel) – in den zugrundeliegenden Berechnungsmodellen keine Berücksichtigung fanden.

Die Berechnungen basieren konsequent auf der Annahme eines einzelnen Vortriebs ohne Gegenvortrieb, wobei die ermittelten Aufwendungen linear auf die jeweils repräsentativen Tunnellängen skaliert wurden. Zudem weisen die quantifizierten Kennwerte eine stringente funktionelle Einschränkung auf: Sie gelten sinngemäß ausschließlich für eine einzelne Tunnelröhre. Für mehrröhrige Tunnelsysteme oder parallele Röhrenkonfigurationen müssen die Werte daher im Rahmen einer Gesamtanalyse entsprechend sinngemäß erweitert und um die spezifischen Interdependenzen der realen Bauabwicklungen ergänzt werden.

Darüber hinaus betreffen wesentliche Limitationen dieser Untersuchung die innerhalb der Berechnungsmodelle gewählten Parameter, deren Belastbarkeit und Detaillierungsgrad sich auf unterschiedlichen Ebenen bewegen. Einerseits stützen sich diverse Leistungs- und Materialannahmen usw. auf die langjährige Erfahrung aus einer Vielzahl bereits realisierter Tunnelbauprojekte. Diese fundierte Datengrundlage ermöglichte eine umfassende und detaillierte Erfassung des baustellenseitigen Bedarfs, welche bis hin zu kleinteiligen Positionen wie den Nägeln für die Abschalung reicht.

Andererseits steht diesem hohen Detaillierungsgrad die Notwendigkeit gegenüber, im Rahmen dieser frühen Analysephase für die übergeordnete Infrastrukturplanung an entscheidenden Stellen sehr grobe Pauschalierungen vorzunehmen, welche immense Auswirkungen auf die finalen ökologischen Ergebnisse haben. Hierzu zählen primär die vereinfachte Einteilung in lediglich drei Geologieklassen sowie die Annahme einer vollständigen Deponierung des gesamten Ausbruchmaterials ohne jegliche Form einer kreislaufwirtschaftlichen Wiederverwendung. Ebenso voraussetzen waren modellhafte Abschätzungen planungsintensiver und ökonomisch sowie ökologisch bestimmender Werte bezüglich der Innenschalenstärken und der zugehörigen Bewehrungsgrade sowie stark vereinfachte

Annahmen zu den Großgeräten, bei denen im Modell eine prozentuelle Abschreibung auf das jeweilige Projekt zugeordnet wurde.

Weiters weisen die für die Transportphase (A4) getroffenen Annahmen zu den Logistikwegen und Transportdistanzen eine inhärente Limitation auf, da diese ebenfalls projektspezifisch und in Abhängigkeit des Baustellenstandorts ausfallen. Obwohl die zugrundeliegende Modellierung der Transportketten differenziert nach den jeweiligen Gütern erfolgte, basieren die Berechnungen auf zugrundeliegenden Annahmen (vgl. Abschnitt 6.4.3). Da abgelegene oder topografisch anspruchsvolle Tunnelbaustellen in Österreich häufig über keine direkte Anbindung an übergeordnete Verkehrswege verfügen, können reale Transportentfernungen je nach Verfügbarkeit regionaler Lieferwerke oder Deponien massiv von den gewählten Standarddistanzen abweichen.

Ergänzend zu den o. g. Rahmenbedingungen betrifft eine weitere Limitation die modellseitige Berücksichtigung der Querschläge. In den Berechnungsmodellen wird standardmäßig davon ausgegangen, dass die statische Sicherung der Querschläge analog zur Haupttunnelröhre über eine zweischalige Bauweise mit einer Innenschale aus Ortbeton erfolgt. In der Baupraxis besteht jedoch je nach geologischen Verhältnissen und planungstechnischen Anforderungen die Möglichkeit, diese Verbindungsbauwerke als reine Spritzbetonschale auszuführen [80].

Die ermittelten Ergebnisse beschränken sich – wie eingangs erwähnt – ausschließlich auf die ökologischen Bestandteile der Nachhaltigkeitsbewertung. Um eine vollumfängliche Entscheidungsgrundlage für zukünftige Infrastrukturprojekte zu schaffen, muss dieser methodische Ansatz in zukünftigen Folgeuntersuchungen um das Zusammenspiel der ökonomisch-ökologischen Aspekte erweitert werden. Eine solche Zusammenführung von ökologischen Lebenszyklusanalysen und monetären Lebenszykluskosten gewinnt insbesondere vor dem Hintergrund der EU-Taxonomie-Verordnung [163] massiv an Relevanz. Die Integration dieser Kriterien wird künftig unerlässlich sein, um die Konformität von Tunnelbauwerken mit den strengen Nachhaltigkeitsvorgaben des europäischen Finanz- und Gesetzgebungsrahmens nachzuweisen.

7.3 Verbesserungspotenziale

Neben den identifizierten Limitationen lassen sich aus den Modellergebnissen auch gezielte technische und methodische Verbesserungspotenziale ableiten. Generell zeigt sich, dass die bautechnischen Prozesse im zyklischen Tunnelbau technisch bereits als ausgereift zu betrachten sind, obgleich in Teilbereichen weiterhin viele Optimierungspotenziale bestehen. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass in den Berechnungsmodellen durch den konsequenten Bezug auf österreichische Verhältnisse bereits teilweise optimierte Hintergrunddaten hinterlegt sind. Dies betrifft insbesondere den spezifischen österreichischen Strommix sowie die ökologischen Kennwerte der lokal hergestellten Produkte, welche im internationalen Vergleich bereits ein überdurchschnittlich vorteilhaftes ökologisches Niveau aufweisen.

Basierend auf den Ergebnissen resultieren signifikante Hebel zur Emissionsminderung somit primär aus einer weiter optimierten Materialauswahl und der Reduktion energieintensiver Prozesse auf der Baustelle. Ein zentraler Ansatzpunkt liegt in der konsequenten Substitution konventioneller Baustoffe durch CO₂-reduzierte Alternativen [164]. Hierzu zählt beispielsweise der verstärkte Einsatz von zementreduziertem Beton mit einem hohen Anteil an Hüttensand oder Flugasche sowie die Verwendung von CO₂-optimiertem Baustahl [21]. Prozessseitig lässt sich der fossile Energiebedarf der Errichtungsphase senken, indem konsequent auf den Einsatz elektrisch betriebener Großgeräte – wie Hybrid-Bagger oder rein elektrische Lademaschinen – umgestellt wird, gepaart mit einer intelligenten und wegoptimierten Baustellenlogistik, die Leerfahrten und Umschlagprozesse vermeidet [165].

Die Verbesserungspotenziale im Modell resultierten daher einerseits aus einer Optimierung der Materialien und Prozesse, andererseits verdeutlicht die Berechnung im Umkehrschluss auch, wie die Umweltwirkungen ansteigen würden, sofern die Randbedingungen nicht gegeben wären und auf internationale Standardwerte zurückgegriffen werden müsste.

7.3.1 Material

7.3.1.1 Ausbruchmaterial

Aufgrund der immensen Mengen an anfallendem Ausbruchmaterial (vgl. Tab. 7-1), welche bei der modellierten vollständigen Deponie an den finalen Einbauort transportiert werden müssen, ergeben sich maßgebliche Anteile am gesamten Fußabdruck (vgl. bspw. Abb. 6-82). Anstatt das anfallende Material vollständig zu deponieren, kann etwa durch frühzeitige, sensorbasierte Stoffstromanalysen eine sortenreine Trennung ermöglicht werden. Verwertbares Ausbruchmaterial könnte somit baustellennah aufbereitet und als Gesteinskörnung für den Spritz- und Innenschalenbeton oder als Dammschüttmaterial im Projekt wiederverwendet werden, was sowohl die Materialherstellung (Phase A1-A3) der Folgeprodukte, die Transportemissionen (Phase A4) als auch Deponielasten (in der maßgebenden Phase A5) reduzieren könnte. [166]

7.3.1.2 Beton

Da die Betonpositionen enorme Auswirkungen auf die (hauptsächlich aus Beton bestehenden) Bestandteile der Außen- sowie Innenschale haben (vgl. Tab. 7-2), besitzen Verbesserungen dort den größten Hebel.

Spritzbeton

Unabhängig von den spezifischen Randbedingungen kristallisiert sich der Spritzbeton durchgehend als die dominante Komponente innerhalb der ökologischen Bilanzierung der Stützmaßnahmen heraus (vgl. bspw. Abb. 6-12 oder Abb. 6-76). Für die Verbesserung ist

jedoch sicherzustellen, dass der für den Vortrieb gewählte Baustoff seinen lastabtragenden Beitrag der Außenschale über die gesamte Projektdauer hinweg zuverlässig erfüllt, während gleichzeitig das CO₂-Minderungspotenzial ausgeschöpft wird. Wie sensitiv die Gesamtbilanz auf die spezifische Materialzusammensetzung reagiert, verdeutlicht ein direkter Variantenvergleich: Findet anstelle der in der Sachbilanz genannten und modellierten Spritzbetonsorte SpC25/30(56)/ÜK3/J2/XC4/GK8/XA1/RV0,70 mit etwa 216 kg CO₂-Äq. je Kubikmeter [59] eine abweichende Sorte mit einem höheren Portlandzementklinkeranteil Verwendung – wie beispielsweise eine in Österreich gängige Sorte Spb Ö (CEM II A) mit ca. 370 kg CO₂-Äq. pro m³ [21] – so schlägt sich dies unmittelbar in den Gesamtergebnissen nieder. Allein durch diese werkstoffliche Modifikation steigen etwa die gesamten Umweltwirkungen eines zweispurigen Straßentunnels in leicht lösbarer Geologie über A1-A5 hinweg um ca. 21 %.

Neben der Reduktion der erforderlichen Stahlmengen bei der Spritzbetonbewehrung durch eine gesteigerte Materialeffizienz (z. B. Übergreifungslängen, Minimierung von Verschnitt etc.), kann die Mattenbewehrung bei fachgerechter Ausführung auch gänzlich durch Fasern ersetzt werden, um das Treibhauspotenzial weiter zu verkleinern. Die gleichmäßig, aber diskontinuierlich im Beton verteilten Fasern wirken dabei wie ein dreidimensionales Bewehrungssystem und bilden einen leistungsfähigen Verbundwerkstoff [167]. Im Gegensatz zu Mikrofasern, die ihre Hauptvorteile im frischen Zustand des Betons entfalten (Verringerung der Rissbildung und Erhöhung der Feuerbeständigkeit), werden synthetische Makrofasern und Stahlfasern in erster Linie eingesetzt, um die strukturelle Integrität des erhärteten Betons maßgeblich zu verbessern [167].

Werden beispielsweise PP-Makrofasern oder Makrofasern aus Stahl anstatt herkömmlicher Bewehrungsmatten beim zweigleisen Bahntunnel in schwer lösbarer Geologie verwendet, lässt sich das Treibhauspotenzial bis zu den Stützmaßnahmen (A1-A5) bei beiden Methoden um etwa 27 % reduzieren. Eine günstigere Transportphase (Phase A4) lässt sich primär bei den PP-Makrofasern erzielen, was auf das geringe Transportgewicht der Fasern durch eine niedrige Dosierung von nur 4 kg/m³ Beton zurückzuführen ist. Die Lebenszyklusphase A4 weist bei den Stahlfasern aufgrund der hohen Dosierung von 30 kg/m³ und des damit verbundenen höheren Gewichts hingegen keine nennenswerten Verbesserungen auf. In der baustellenseitigen Errichtungsphase entfällt zwar die aufwendige Montage der Bewehrungsmatten, für das Einbringen der Fasern in den Beton in Phase A5 wird jedoch ein energetischer Mehrverbrauch der Geräte von 10 % für Diesel, Schmieröl und Strom berücksichtigt.

Konstruktionsbeton

Neben dem Spritzbeton birgt auch die Optimierung des Konstruktionsbetons ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der projektbezogenen Umweltwirkungen, da allein das Material der Innenschale und des Sohlbetons bis zu 35 % des gesamten Treibhauspotenzials des Tunnels in den Phasen A1-A5 verursacht (vgl. Tab. 7-2). In den zugrundeliegenden Berechnungsmodellen wurde für den regulären Innenschalenbeton (IG oder IS/C25/30(56)/XC3/XF3/XA1L) ein Wert

von etwa 155 kg CO₂-Äq. pro m³ angesetzt, während für das Sohlgewölbe (C25/30/B7) ein Wert von circa 200 kg CO₂-Äq. pro m³ hinterlegt ist [59].

Um die Sensitivität dieser Kennwerte zu verdeutlichen, zeigt ein analog zum Spritzbeton berechnetes Vergleichsszenario mit einer klinkerintensiveren und ökologisch ungünstigeren Betonsorte massive Auswirkungen auf die Gesamtbilanz. Wird ein weniger optimierter Konstruktionsbeton eingesetzt, welcher Emissionen von rund 250 kg CO₂-Äq. pro Kubikmeter verursacht, steigen die rein materialbezogenen Treibhausgasemissionen (A1-A3) beim Innenschalenbeton um 61 % und beim Sohlbeton um 25 % an. Überträgt man diese materialeseitige Verschlechterung auf das gesamte Tunnelbauwerk, so führt der Einsatz dieser Rezeptur unter Berücksichtigung des maximalen Relevanzanteils von 35 % zu einer Erhöhung der ökologischen Gesamtauswirkungen in den Phasen A1-A5 um bis zu 21,5 %.

7.3.2 Prozess

7.3.2.1 Sprengtechnik

Sprenggenauigkeit (Überprofil)

Ein Verbesserungspotenzial besteht darin, sprengtechnisch bedingte Mehrausbrüche möglichst zu reduzieren und somit die zu lösenden Massen zu vermindern. Durch die erhöhte Profilgenauigkeit sind in weiterer Folge geringere Spritzbetonmengen erforderlich, was insgesamt die Umweltauswirkungen erheblich verbessern kann.

Durch ein ausgereiftes Bohrschema mit optimaler Anzahl genau platzierter und gebohrter Bohrlöcher wird ein erfolgreiches Laden und Sprengen gewährleistet und so können induzierte Gebirgsschäden minimiert werden. Um die geplante Ausbruchsgeometrie zu erreichen, ist nach der Erstellung des Bohrschemas die entsprechende Beladung der Bohrlöcher essenziell für den Energieeintrag in das Gebirge. Eine optimierte Auslegung der Konturbohrlöcher und der jeweiligen Zündintervalle kann eine günstige Rissbildung von Bohrloch zu Bohrloch ermöglichen. [79]

Angenommen das durchschnittliche Überprofil je Abschlag wird bei der schwer lösbaren Geologie des zweigleisigen Tunnels von 10 cm auf 5 cm durch die o. g. Maßnahmen reduziert, so können die gesamten Umweltauswirkungen des Löse- und Sicherungsvorgangs in A1-A5 um etwa 14 % gesenkt werden (vgl. Abb. 6-11). Diese Potenziale sind logischerweise abhängig von der aufzutragenden Spritzbetonmenge und der auszubrechenden Querschnittsfläche.

Sprengstoff

Ein weiteres Verbesserungspotenzial im konventionellen Sprengvortrieb liegt in der Substitution herkömmlicher, ammoniumnitrathaltiger Sprengstoffe durch innovative, nitratfreie Alternativen. Diese biologisch abbaubaren Emulsionssprengstoffen basieren auf Wasserstoffperoxid anstelle von Nitratsalzen als Oxidationsmittel. Da Wasserstoffperoxid lediglich in Wasser und Sauerstoff zerfällt, entstehen beim Sprengvorgang keine gefährlichen

Stickoxide. Dies führt im Untertagebau nicht nur zu einer signifikant verbesserten Luftqualität und Sicht direkt nach der Sprengung, sondern verkürzt auch die erforderlichen Bewetterungszeiten erheblich, wodurch die zyklischen Bauabläufe rascher fortgesetzt werden können. Zudem wird der Eintrag von Stickstoff in das anfallende Tunnelabwasser im Vergleich zu klassischen Sprengstoffen reduziert. [168]

7.3.2.2 Spritzbeton

Rückprall

Neben der werkstofflichen Optimierung der Betonrezeptur stellt die gezielte Verringerung des Rückpralls während des Spritzvorgangs eine der komplexesten, zugleich aber wirksamsten Stellschrauben zur Reduktion der Umweltwirkungen dar. Da jeder auftretende Rückprall eine direkte Materialverschwendung impliziert, bewirkt eine Minimierung dieser Verlustmengen weitreichende materielle, ökologische und logistische Einsparungen über die gesamten Phasen A1 bis A5 hinweg. Der Rückprall wird maßgeblich von der Erfahrung des Düsenführers, der Spritzrichtung und den gewählten Spritzparametern beeinflusst, hängt jedoch gleichermaßen vom Anlagenzustand, dem angewendeten Spritzverfahren, der Beschaffenheit des Untergrunds sowie der Frischbetoncharakteristik ab [81]. Bautechnisch lässt sich der Rückprall beispielsweise durch die Begrenzung der Rezeptur auf eine maximale Korngröße von 0-8 mm beim Nassspritzverfahren auf unter 10 % senken. Darüber hinaus wirken sich ein reduzierter Spritzausstoß sowie geringere Schichtstärken mindernd auf den Materialverlust aus [81]. Unter Einhaltung dieser Kriterien führt eine Reduktion des Rückpralls von beispielsweise 15 % auf 5 % zu einer Einsparung von rund 10 % der Treibhausgasemissionen innerhalb der Materialherstellungs-, Transport- und Errichtungsphase des Spritzbetons (A1-A5).

7.3.2.3 Energie

Strom

Im Bereich der energetischen Prozesse verursacht der gesamte elektrische Stromverbrauch der rechnerisch lediglich rund 1 % der ökologischen Gesamtauswirkungen. Dieser minimale Anteil resultiert maßgeblich aus dem spezifischen österreichischen Strommix, der durch seinen hohen Wasserkraftanteil weit geringere Emissionsfaktoren aufweist als der europäische Durchschnitt [169, 170]. Wie sensibel die Bilanzierung dennoch auf diesen Parameter reagiert, zeigt ein alternatives Szenario: Versorgt ein fossiler geprägter Strommix mit einem Emissionsfaktor von beispielsweise 0,5 kg CO₂-Äq. pro Kilowattstunde die Baustelle, verschlechtert sich die Ökobilanz spürbar. Allein durch diese Anpassung steigen die kumulierten Gesamtauswirkungen des Tunnels in den Phasen A1–A5 um etwa 4 % an. Dies verdeutlicht, dass eine treibhausgasarme Baustellenstromversorgung im internationalen Kontext einen wesentlichen Hebel darstellt.

Ein weiteres Zukunftspotenzial liegt in der Substitution dieselbetriebener Maschinen durch elektrisch angetriebene Alternativen, da ein solcher Technologiewechsel gleichermaßen die Transportlogistik in Phase A4 als auch die baustellenseitige Errichtungsphase A5 betrifft, wobei der Dieserverbrauch bis zu 7 % der gesamten ökologischen Gesamtauswirkungen verursacht (siehe Tab. 7-2). In der aktuellen Baupraxis steht der flächendeckende Einsatz von Elektro-Baumaschinen jedoch noch vor erheblichen Hürden, da spezialisierte Geräte für den Untertagebau am Markt oft noch nicht elektrifiziert verfügbar sind oder herstellerseitig sehr lange Lieferzeiten aufweisen. Zudem bestehen erhebliche Datenlücken hinsichtlich der tatsächlichen Lebenszykluskosten im realen Baustellenbetrieb sowie bezüglich der nachgelagerten Batterieverwertung und -entsorgung. Diese offenen technologischen und ökonomischen Fragestellungen stellen derzeit noch wesentliche Barrieren für eine verlässliche Bilanzierung dar und sind im Rahmen zukünftiger Forschungsarbeiten gezielt aufzuarbeiten

8 Fazit

Die Ergebnisse der vorliegenden Masterarbeit verdeutlichen, dass der Bau von Verkehrsinfrastrukturtunnelbauwerken einen massiven, ressourcenintensiven Eingriff in die Umwelt darstellt, dessen ökologisches Fundament maßgeblich in den frühen Projektphasen gelegt wird. Bis zur breiten Verfügbarkeit vollautomatisierter Bewertungsinstrumente weisen die hier erarbeiteten Benchmarkwerte nach, dass sie gerade in frühen strategischen Stadien – wie der Trassenwahl – ökobilanzielle Analysen wesentlich unterstützen und vereinfachen können. In Kombination mit projektspezifischen Einzelanalysen leisten diese Kennwerte einen fundierten Beitrag zu einer integralen Planung.

Die detaillierte Aufschlüsselung der Lebenszyklusmodule zeigt eine klare Verteilung der ökologischen Lasten, wobei die Materialherstellung (A1-A3) mit etwa 56 bis 73 % und die Errichtungsphase (A5) mit rund 25 bis 42 % die Hauptemittenten bilden, während die rein straßengebundene Transportlogistik über Lkw (A4) mit 1 bis 3 % eine untergeordnete Rolle einnimmt. Innerhalb dieser Phasen erweisen sich die modellierten geologischen Randbedingungen und Querschnittsarten als die maßgeblichen Regulatoren. Mit dem Übergang von schwer zu leicht lösbarer Geologie steigen die Umweltwirkungen aufgrund der tunnelbautechnischen Anforderungen proportional an. Dies ist direkt auf die notwendige Ausdehnung der Ausbruchslinie, erhöhte Betonkubaturen der Innenschale und einen intensivierten Einbau von Stützmitteln zurückzuführen.

Beim Vortrieb selbst differenziert sich das Bild je nach Lösemethode: Während der Sprengvortrieb primär durch den Diesel- und Sprengstoffverbrauch dominiert wird, verschiebt sich der Fokus beim Baggervortrieb je nach Geräteklasse (Tunnel- oder Tunnelladebagger) teilweise in Richtung des elektrischen Strombedarfs, obgleich der Dieselverbrauch für das Schuttern durchgehend maßgebend bleibt. Bei den Stützmaßnahmen kristallisiert sich der Spritzbeton über alle Szenarien hinweg als die dominante Komponente heraus, welche im Bereich der leicht lösbaren Geologie zusätzlich durch die bautechnische Notwendigkeit des Ortsbrustspritzbetons verstärkt wird. Komponenten wie Anker, Spieße, Stahlbögen und Baustahlmatten wirken sekundär zu den zementösen Bestandteilen. Über den gesamten Tunnelbauprozess (A1-A5) hinweg verursacht die Innenschale mit ca. 40 bis 52 % den größten Anteil des Treibhauspotenzials, wobei der Gewölbebeton und die Sohlplatte mehr als die Hälfte innerhalb der Innenschale bewirken, obgleich bewehrte Querschnitte in schlechter Geologie massiven Einfluss ausüben und die Bewehrung bis zu 40 % des gesamten Primärenergiebedarfs erreichen kann.

Die wesentlichen Limitationen dieser Untersuchung definieren gleichzeitig den Rahmen für zukünftige Forschungsarbeiten. Da sich die vorliegende Ökobilanzierung gemäß EN 17472 und EN 15804 auf die Lebenszyklusmodule A1-A5 des Tunnelbauwerks mit Innenschale beschränkt und Elemente des Straßen- bzw. Bahnoberbaus sowie der technischen Ausrüstung ausschließt, bildet sie die Bauwerksherstellung präzise ab, klammert jedoch Betrieb, Wartung und Entsorgung (B und C Phasen) aus. Eine lückenlose Gesamtbetrachtung erfordert künftig die Implementierung dieser Folgephasen, da die realen Lebenszykluswirkungen ein Vielfaches der reinen Errichtung betragen.

Zudem greift eine isolierte Bauwerksbetrachtung ökologisch zu kurz, wenn die funktionale Nutzung des Objekts unberücksichtigt bleibt. Einsparungspotenziale und Synergien, die sich beispielsweise durch die Verlagerung des Personen- und Güterverkehrs von der Straße auf die Schiene ergeben, können die gesamtökologische Bilanz eines Infrastrukturprojektes fundamental zum Positiven verändern.

Für die Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle ergeben sich aus den getroffenen Annahmen konkrete methodische Ansatzpunkte. Während die baustellenseitigen Verbräuche durch langjährige Projekterfahrungen sehr detailliert erfasst wurden, mussten für die frühe Planungsphase grobe Pauschalierungen gewählt werden. Hierzu zählen die vereinfachte Einteilung in drei Geologieklassen, modellhafte Abschätzungen der Innenschalenstärken sowie die Annahme einer vollständigen Deponierung des Ausbruchmaterials usw.

Genau hier setzen die größten material- und prozessbezogenen Optimierungspotenziale an. Anstelle einer vollständigen Deponierung bietet eine Stoffstromanalyse die Chance einer Materialtrennung und kreislaufwirtschaftlichen Wiederverwendung des Ausbruchmaterials. Den größten Hebel zur Emissionsminderung birgt jedoch die Optimierung der Betonrezepturen und der jeweiligen Bauteile. Da der Spritzbeton der Sicherung und der Konstruktionsbeton der Innenschale (allein bis zu 35 % vom GWP in A1-A5) die Bilanz dominieren, müssen zukünftige Initiativen primär bei der Zementreduktion und dem Einsatz klinkerreduzierter Bindemittel ansetzen.

Ausblickend ist die praxisnahe Forschung gefordert, derartige Nachhaltigkeitsanalysen weiter zu automatisieren und direkt mit digitalen Modellen zu verknüpfen. Um eine vollumfängliche Entscheidungsgrundlage zu schaffen, muss dieser ökologische Ansatz zudem um monetäre Lebenszykluskosten erweitert werden. Eine solche Zusammenführung von LCA und LCC gewinnt insbesondere vor dem Hintergrund der EU-Taxonomie-Verordnung massiv an Relevanz. Die Integration dieser kombinierten Kriterien wird künftig unerlässlich sein, um Tunnelbauwerke mit den strengen Nachhaltigkeitsvorgaben des europäischen Finanz- und Gesetzgebungsrahmens in Einklang zu bringen.

9 Literatur

- [1] M.-L. Zwicker, "Öffentliche Infrastruktur und regionale Wirtschaftsentwicklung in Österreich: Eine empirische Analyse ökonomischer Wechselwirkungen" Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://repositum.tuwien.at/bitstream/20.500.12708/216684/1/Zwicker%20Marie-Luise%20-%202025%20-%20OEffentliche%20Infrastruktur%20und%20regionale...pdf>
- [2] G. Grüblinger, "Verkehrsinfrastrukturstrategie Österreich 2030: Ziele, Leitlinien und strategische Projektbewertung" Masterarbeit, Technische Universität Wien, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://repositum.tuwien.at/handle/20.500.12708/9484>
- [3] *Speech to Conservative Women's Conference | Margaret Thatcher Foundation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.margaretthatcher.org/document/106056> (Zugriff am: 11. Mai 2026).
- [4] M. Jacob, "Infrastruktur" in *SDG - Forschung, Konzepte, Lösungsansätze zur Nachhaltigkeit, Ökonomische Nachhaltigkeit - Interdisziplinäre Perspektiven*, M. Jacob, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2025, S. 65–88, doi: 10.1007/978-3-658-46905-4_4.
- [5] Ständiges Sekretariat der Alpenkonvention, "Lebensqualität in den Alpen: 10. Alpenzustandsbericht", Innsbruck, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.alpconv.org/fileadmin/user_upload/Publications/RSA/RSA10_DE_web.pdf.
- [6] M. Anderl, A. Bartel, A. Buchmayr, et al., "Klimaschutzbericht 2025", Wien, 2025.
- [7] *Kreislaufwirtschaft: Baubranche spielt Schlüsselrolle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news/260429-kreislaufwirtschaft-baubranche> (Zugriff am: 4. Mai 2026).
- [8] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, "Ressourcennutzung in Österreich 2024: Band 4", Wien, 2024.
- [9] Umweltbundesamt, "Integration von Kreislaufwirtschaft: in Modelle von ressourcen- und energieintensiven Schlüsselindustrien", Wien, 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep1020.pdf>.
- [10] ÖBB-Holding AG, "Geschäftsbericht 2024: Nachhaltigkeitsbericht", Wien, 2025.
- [11] *Neues Bahn-Zeitalter beginnt: Feierliche - ÖBB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://presse-oebb.at/news-neues-bahn-zeitalter-beginnt-feierliche-eroeffnung-der-koralmbahn?id=227393&menueid=27024&l=deutsch> (Zugriff am: 15. April 2026).
- [12] ÖBB-Holding AG, "Zahlen Daten Fakten 2024/25", Wien, 2025.

- [13] L. Brill, *Statistik der Eisenbahn-Tunnel in Österreich*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eisenbahntunnel.at/> (Zugriff am: 15. April 2026).
- [14] Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur, "Statistik Straße und Verkehr", Wien, 2025.
- [15] ASFINAG, "Netzzustandsbericht 2024", Wien, 2024.
- [16] Entfernungsrechner, *Entfernung Bregenz, Vorarlberg, AUT → Wien, AUT - Luftlinie, Fahrstrecke, Mittelpunkt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.luftlinie.org/Bregenz,Vorarlberg,AUT/Wien,AUT/Graz,Steiermark,AUT> (Zugriff am: 15. April 2026).
- [17] ÖBB-Holding AG, "Netzzustandsbericht 2024", Wien, 2025.
- [18] VCÖ, *Zukünftige Herausforderungen für die Straßeninfrastruktur - Mobilität mit Zukunft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://vcoe.at/publikationen/vcoe-factsheets/detail/zukuenftige-herausforderungen-fuer-die-strasseninfrastruktur> (Zugriff am: 1. Juni 2026).
- [19] ASFINAG, *A 12 Inntal Autobahn Generalsanierung Landecker Tunnel und Neubau Flucht- und Rettungstunnel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.asfinag.at/bauen-erhalten/bauprojekte/a-12-landecker-tunnel/> (Zugriff am: 30. April 2026).
- [20] Parlament Österreich, *Bundesminister Hanke: Werden wichtige Infrastrukturprojekte rasch umsetzen (PK0204/12.03.2026) | Parlament Österreich*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.parlament.gv.at/aktuelles/pk/jahr_2026/pk0204 (Zugriff am: 25. März 2026).
- [21] W. Aldrian, A. Bantle und J. Juhart, "CO2 reduction in tunnel construction from a material technology point of view", Jg. 15, Nr. 6, S. 799–810, 2022, doi: 10.1002/geot.202200036.
- [22] J. Sauer, "Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur" Dissertation, Technische Universität München, München, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediatum.ub.tum.de/node?id=1295092>
- [23] L. Huang, R. A. Böhne, A. Bruland, P. D. Jakobsen und J. Lohne, "Environmental impact of drill and blast tunnelling: life cycle assessment", Jg. 86, S. 110–117, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.08.083.
- [24] Carbotech AG, INFRAS und EcoExistence, "Umweltbilanz Bahninfrastruktur: Inventare Bau Infrastruktur und illustrative Betrachtung Entwicklung", Basel, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://carbotech.ch/cms/wp-content/uploads/Schlussbericht_LCA_Bau_Bahninfrastruktur.pdf. Zugriff am: 18. März 2026.
- [25] S. Bleiker, T. Pohl, T. Stürzinger und D. Osterwalder, *Grundlagen für Referenz- und Zielwerte für graue Emissionen von Infrastrukturbauten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/fm1Hh9vy4TVE/grundlagen-fuer-referenz-und-zielwerte-fuer-graue-emissionen-von-infrastrukturbauten.pdf> (Zugriff am: 18. März 2026).

- [26] B. W. Hopf, "Ökobilanzierung im Tunnelbau: Fallstudie zur neuen Österreichischen Tunnelbaumethode und offenen Bauweise" Masterarbeit, TU Graz, Graz, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.tugraz.at/publications/wxrel-jv349>
- [27] *ÖNORM B 2203-1: 2023 03 01, Untertagebauarbeiten, Teil 1: Zyklischer Vortrieb*, Austrian Standard International.
- [28] *ÖNORM B 2061: 2020 05 01, Preisermittlung für Bauleistungen - Verfahrensnorm*, Austrian Standard International.
- [29] W. Schubert und H. Lauffer, "NATM – from a construction method to a system / NÖT – von der Bauweise zum System", Jg. 5, Nr. 5, S. 455–463, 2012, doi: 10.1002/geot.201200032.
- [30] *ÖNORM EN 17472: 2022 08 15, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren*, Austrian Standard International.
- [31] J. Grossarth, "Nachhaltigkeit und Lebenszyklusbetrachtung im Bauwesen" in *Bioökonomie und Zirkulärwirtschaft im Bauwesen*, J. Grossarth, Hg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024, S. 217–266, doi: 10.1007/978-3-658-40198-6_7.
- [32] L. Hausberger, "Ökobilanz von Eisenbahn-Hochleistungsinfrastrukturen: Analyse von Oberbauten im Tunnel und auf freier Strecke / Lukas Hausberger, BSc" Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://ulb-dok.uibk.ac.at/ulbtirolhs/content/titleinfo/7802366>
- [33] T. Zinke, "Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken" PhD-Thesis, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften; Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [34] V. Wurglitsch, "Ökobilanzierung im Tunnelbau – Herausforderungen und Optimierungspotenziale des Datenmanagements anhand eines Beispielprojekts", Technische Universität Wien, Wien, 2026.
- [35] L. Hausberger, "Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastrukturen: Analyse von ökologischen Potentialen von der Netzwerkentwicklung bis zum Baustoff / Dipl.-Ing. Lukas Hausberger, BSc" Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://ulb-dok.uibk.ac.at/urn/urn:nbn:at:at-ubi:1-189743>
- [36] United Nations, "Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development: Resolution Adopted by the General Assembly", 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Zugriff am: 18. Mai 2026.
- [37] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., "Empfehlungen zur Nachhaltigkeit im Untertagebau: Teil 1: Rahmenbedingungen, Herausforderungen, Lösungsansätze und Projektbewertung", 2025.
- [38] United Nations Environment Programme, *2.1 Embodied versus Operational Carbon Emissions in Buildings*. [Online]. Verfügbar unter: <https://globalabc.org/buildingmaterialsandclimate/chapte-2-life-cycle-thinking/2-1->

- embodied-versus-operational-carbon-emissions-in-buildings.html (Zugriff am: 18. Mai 2026).
- [39] United Nations Environment Programme, "Global Status Report for Buildings and Construction 2024/25: Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast", Paris, 2025.
- [40] A. Schubert, M. Schlicke und K. Nübel, *Planungsprinzipien zur Erzielung von Nachhaltigkeit im Ingenieurbau: Nachhaltigkeit von Bauwerken im Lebenszyklus*, 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.cee.ed.tum.de/fileadmin/w00cbe/gbft/Tagungen/GT2024/GT2024-12-Nuebel_Schubert_Schlicke.pdf
- [41] R. a. M. ltd, *Construction Global Market Opportunities and Strategies to 2034*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5895047/construction-global-market-opportunities> (Zugriff am: 18. Mai 2026).
- [42] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, "Bedeutung des Bauwesens", *Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen*, 21. März 2018, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmwsb.bund.de/DE/bauen/bauwesen/bedeutung-bauwesen/bedeutung-bauwesen_artikel.html. Zugriff am: 20. Mai 2026.
- [43] Statista, *Österreich - Bruttowertschöpfung Bauwesen 2024* | Statista. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/944660/umfrage/bruttowertschoepfung-im-bauwesen-in-oesterreich/> (Zugriff am: 18. Mai 2026).
- [44] Fairfield Market Research, "Tunnel Construction Market", *Harshad*, 13. Nov. 2024, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fairfieldmarketresearch.com/report/tunnel-construction-market>. Zugriff am: 18. Mai 2026.
- [45] International Tunneling und Underground Space Association, "Tunnel Market Survey 2016", Châtelaine, 2016.
- [46] International Tunneling und Underground Space Association, "Tunnel Market Survey 2019", Châtelaine, 2019.
- [47] SCHIG mbH, "Treibhausgasemissionen durch Schieneninfrastrukturbau: Ermittlung von Emissionskennwerten für die Bewertungsprozesse im Zuge der Erarbeitung des Zielnetzes 2040", 16. Dez. 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.schig.com/fileadmin/Media/Blogs/2023/20221216_BER_THG-Emissionen_Bau_v0.pdf. Zugriff am: 23. März 2026.
- [48] I. Rapp, "Drei Cheops-Pyramiden: Wie der Bau des Brenner Basistunnels das Padastertal verändert", *Tiroler Tageszeitung Online*, 25. Aug. 2025, 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tt.com/artikel/30915680/drei-cheops-pyramiden-wie-der-bau-des-brenner-basistunnels-das-padastertal-veraendert>. Zugriff am: 19. Mai 2026.
- [49] K. Bergmeister, R. Murr, W. Pacher und H. Kogler, *Ressourceneffizienter Tunnelbau – Zero Waste: Verwertung von Tunnelausbruch beim Brenner Basistunnel*. [Online].

- Verfügbar unter: <https://www.gsv.co.at/wp-content/uploads/2017%2009%2014%20MURR%20und%20PACHER.pdf> (Zugriff am: 19. Mai 2026).
- [50] H. Ortner, *Abstract Volume of GeoTirol2016 - Annual Meeting of DGGV and PAN-GEO Austria*. [Online]. Verfügbar unter: https://opac.geologie.ac.at/ais312/dokumente/PANGEO_2016_Abstractvolume.pdf (Zugriff am: 19. Mai 2026).
- [51] K. Voit, J. Hron und K. Bergmeister, "Das Potenzial rezyklierter Gesteinskörnungen: Für einen nachhaltigen Betonbau", *The Journal of OIAV*, Jg. 2022, 167. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oia.v.at/wp-content/uploads/2022/12/018_voit_hron_bergmeister.pdf
- [52] World Commission on Environment and Development, "Our Common Future", World Commission on Environment and Development, Genf, Ber. A/42/427, 1987. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.brundtland.co.za/wp-content/uploads/2022/08/Brundtland-Report-1987-Our-Common-Future.pdf>. Zugriff am: 1. Juni 2026.
- [53] L. Hausberger, S. Auderer, A. Häberlein, F. Noldin, H. Storch und F. Gschösser, "Sustainability Assessment of Conventional Tunnel Excavation: Analysis and Results", *Geomechanics and Tunnelling*, akzeptiert zur Veröffentlichung, in Druck (in press), 2026.
- [54] P. Duarte, A. Thomas und M. Cooke, *Sustainability and the Tunnelling Industry: UNDER CITY Colloquium*. [Online]. Verfügbar unter: <https://tunneltalk.com/images/TunnelTech/Sustainability-Duarte-et-al-Dubrovnik-Croatia-April2012.pdf> (Zugriff am: 19. Mai 2026).
- [55] R. Heissenberger, U. H. Grunicke, J. Raschendorfer und C. Holzer, "Sustainable Tunnelling – An infrastructure operator's, planner's, contractor's and scientist's perspective", Jg. 15, Nr. 6, S. 811–820, 2022, doi: 10.1002/geot.202200058.
- [56] W. Eckbauer, R. Insam und D. Zierl, "Planning optimisation for the Brenner Base Tunnel considering both maintenance and sustainability / Planungsoptimierungen beim Brenner-Basistunnel aus Sicht der Instandhaltung und Nachhaltigkeit", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 7, Nr. 5, S. 601–609, 2014, doi: 10.1002/geot.201400030.
- [57] F. Gschösser, *Fernpasstunnel Ökobilanzstudie 2023: Land Tirol - Landesstrassenverwaltung B179 Fernpassstrasse*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.tirol.gv.at/fileadmin/buergerservice/Beauftragte_Gutachten_Studien_Umfragen/20230620_Fernpasstunnel_OEkobilanz_2023.pdf (Zugriff am: 18. März 2026).
- [58] T. Schadow, "Ressourcenschonung im Bauwesen – Aspekte aus der Planungspraxis", *Bautechnik*, Jg. 99, Nr. 1, S. 50–56, 2022, doi: 10.1002/bate.202100110.
- [59] L. Hausberger, C. Ressler, T. Cordes und F. Gschösser, "Detaillierte Ökobilanzdaten für spezifische Betonsorten hergestellt in Österreich", 2024, best.202400078, doi: 10.1002/best.202400078.
- [60] GEO Partner AG, *Umweltrelevante Erfahrungen beim Tunnelbau mit Sprengvortrieb*. [Online]. Verfügbar unter:

- [https://www.kvu.ch/getdownloadfile.cfm?filename=180409065659_Bericht_WS_Tunne
lausbruchmaterial_2017_Stand_2018_03_08.pdf](https://www.kvu.ch/getdownloadfile.cfm?filename=180409065659_Bericht_WS_Tunne
lausbruchmaterial_2017_Stand_2018_03_08.pdf).
- [61] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., "Empfehlung Verwertung von Tunnelausbruchmaterial", 2024.
- [62] Umweltbundesamt, "KreislaufBAUwirtschaft: Projekt-Endbericht", Wien, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0757.pdf>.
- [63] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft, "Kreislaufwirtschaft & Produktionstechnologien, national 2024: Gemeinsam auf dem Weg zur Ressourcenwende - Ausschreibungsleitfaden", Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) / FFG, Wien, 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://fdoc.ffg.at/s/vdb/public/node/content/XfESwS0RR0CAx-Kqd74puQ/1.2?a=true>. Zugriff am: 1. Juni 2026.
- [64] P. Maydl, "Sustainability in infrastructure construction – on the transferability of assessment concepts for buildings to civil engineering works / Nachhaltigkeit im Infrastrukturbau – Zur Übertragbarkeit von Bewertungskonzepten für Gebäude auf den Tiefbau", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 7, Nr. 5, S. 577–592, 2014, doi: 10.1002/geot.201400039.
- [65] Bundeskanzleramt der Republik Österreich, *RIS - Bundesvergabegesetz 2018 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 22.05.2026*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20010295> (Zugriff am: 22. Mai 2026).
- [66] S. Engelhardt, J. Schwarz und M. Thewes, "The lifecycle cost concept for implementation of economic sustainability in tunnel construction / Das Lebenszykluskostenkonzept zur Umsetzung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken", *Geomechanics and Tunnelling*, Jg. 7, Nr. 5, S. 593–600, 2014, doi: 10.1002/geot.201400026.
- [67] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V., "Empfehlungen zur Nachhaltigkeit im Untertagebau: Teil 2: Treibhausgasbilanzierung für die Herstellungs- und Errichtungsphase", 2025.
- [68] A. Bischofberger, "Nachhaltigkeit im Tunnelbau – Einsatzpotential des ressourceneffizienten Tübbings im maschinellen Tunnelbau" Masterarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2024.
- [69] K. Bergmeister, F. Fingerloos und J.-D. Wörner, Hg., *Beton-Kalender 2014*. Wiley, 2013.
- [70] J. Sprenger, "Treibhausgas-Bilanz von Tunnelinnenschalen" Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck, 2023.
- [71] IBO, *Ökobilanzen für Infrastrukturprojekte der ÖBB*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibo.at/wissensverbreitung/ibomagazin-online/ibo-magazin-artikel/data/oekobilanzen-fuer-infrastrukturprojekte-der-oebb> (Zugriff am: 2. April 2026).
- [72] Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs, *Construction Products Regulation (CPR)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://single-market->

- economy.ec.europa.eu/sectors/construction/construction-products-regulation-cpr_en (Zugriff am: 20. Mai 2026).
- [73] L. Hausberger und et al., *Projektantrag Collective Research Forschungsprojekt "LZinfra" - Lebenszyklustool zur Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastrukturen: Erstantrag*. [Online]. Verfügbar unter: <https://projekte.ffg.at/projekt/5137754> (Zugriff am: 11. Mai 2026).
- [74] G. Girmscheid, *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*, 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [75] M. Flora und M. Türtscher, "Angewandter Tunnelbau: Studienblätter zur Vorlesung", Universität Innsbruck, 2024.
- [76] Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, "Geotechnische Planung von Untertagebauten: Zyklischer und Kontinuierlicher Vortrieb: Gebirgscharakterisierung und Vorgangsweise zur nachvollziehbaren Festlegung von bautechnischen Maßnahmen während der Planung und Bauausführung", Salzburg, 2023.
- [77] ASFINAG, *ASFINAG | Medien-DB | Fotoware: Arlbergtunnel Sanierung und Sicherheitsausbau* - © ASFINAG. [Online]. Verfügbar unter: <https://mediendb.asfinag.at/contents/rootChannel/b6cbc2057cdd47a4a814d25018f656a4/metadata> (Zugriff am: 27. Mai 2026).
- [78] bmvit INFOTHEK, *Die ASFINAG sprengt sich durch den Berg: Über 100.000 Kubikmeter Ausbruchmaterial lagern bereits auf der Deponie Finais*. - © ASFINAG / Ramsbacher. [Online]. Verfügbar unter: <https://infothek.bmimi.gv.at/asfinag-perjentunnel-s16-tunnelroehre/> (Zugriff am: 27. Mai 2026).
- [79] M. Ganster, "Contribution of modern blasting technology to achieve accurate contour profiles in tunneling", *Geomechanics and Tunneling*, Jg. 15, Nr. 6, S. 745–755, 2022, doi: 10.1002/geot.202200037.
- [80] ITA, "ITA Report n° 24: Permanent Sprayed Concrete Linings", Châtelaine, 2020.
- [81] B. Lindlar, M. Jahn und J. Schlumpf, "Sika Spritzbeton Handbuch", Zürich, 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://che.sika.com/dms/getdocument.get/fb45e79f-1e96-3490-9e3d-5f85dc392c52/ch_con_Spritzbetonbuch_Sika.pdf. Zugriff am: 1. Juni 2026.
- [82] G. Girmscheid, *Bauverfahren des Spezieltiefbaus*, 15. Aufl. Zürich: Eigenverlag des IBI an der ETH Zürich, 2013.
- [83] *ÖNORM EN 1997-1: 2014 11 15, Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln*, Austrian Standard International.
- [84] C. Diewald, "Die Anwendbarkeit europäischer Tunnelinnenschalenvarianten auf Grundlage einer vergleichenden Untersuchung" Masterarbeit, Technische Universität Wien, Wien, 2024.
- [85] *Richtlinie Innenschalenbeton: 2012 12*, Österreichische Bautechnik Vereinigung.
- [86] ASFINAG, *ASFINAG | Medien-DB | Fotoware: LED Beleuchtung Tunnel Wilten* - © ASFINAG. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://mediendb.asfinag.at/contents/rootChannel/2a2d9ffabedf4b7fba51219b45fa2578/metadata> (Zugriff am: 23. Mai 2026).
- [87] ÖBB-Infrastruktur AG, *Mediengalerie Koralmbahn: Visualisierung des Koralmtunnels im Lavanttal* - © ÖBB/isochrom. [Online]. Verfügbar unter: <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrecken/suedstrecke-wien-villach/koralmbahn/mediengalerie-koralm> (Zugriff am: 23. Mai 2026).
- [88] *RVS 09.01.22: Tunnelquerschnitte*, Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2010 03.
- [89] *RVS 09.02.22: Tunnelausrüstung*, Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2014 06.
- [90] Bundeskanzleramt der Republik Österreich, *RIS - Straßentunnel-Sicherheitsgesetz - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 22.04.2026*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20004722&FassungVom=2026-04-22> (Zugriff am: 23. Mai 2026).
- [91] *Regelwerke: 10.01.02.01 Tunnelbau / Entwurf - Grundsätze - Querschnitt / Profil*, ÖBB-Infrastruktur Aktiengesellschaft.
- [92] H. Loy, "Hochleistungsbahnen: Studienblätter zur Vorlesung", Universität Innsbruck, 2024.
- [93] ASFINAG, "Planungshandbuch Tunnel-Bau: Technische Richtlinie und Regelpläne", Wien, 2024.
- [94] *Standardisierte Leistungsbeschreibung - Verkehr und Infrastruktur (LB-VI), Version 6*, Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr (FSV), Wien.
- [95] R. Frischknecht, *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [96] W. Klöpffer und B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10303941>
- [97] *ÖNORM EN ISO 14040: 2021 03 01, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, Austrian Standards International.
- [98] *ÖNORM EN ISO 14044: 2021 03 01, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, Austrian Standards International.
- [99] *ÖNORM EN 15804: 2022 02 15, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, Austrian Standards International.
- [100] F. Gschösser, *Baubetrieb und Bauwirtschaft I Vorlesungsskript WS 2025/2026: Teil 2: Bauwirtschaft*, 2025.
- [101] *ÖNORM A 2063-1: 2021 03 15, Austausch von Daten in elektronischer Form für die Phasen Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung (AVA) - Teil 1: Austausch von Leistungsbeschreibungs-, Ausschreibungs-, Angebots-, Auftrags- und Abrechnungsdaten*, Austrian Standard International.

- [102] FSV Organisation. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fsv.at/organisation/organisationdetail.aspx?IDOrganisation=30371585-1bc7-47d4-914e-c7814c4b90dd> (Zugriff am: 2. April 2026).
- [103] ORIS SAS, *Welche Rolle spielt die Ökobilanz bei linearer Infrastruktur?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oris-connect.com/de/blog/welche-rolle-spielt-die-okobilanz-bei-linearer-infrastruktur> (Zugriff am: 2. April 2026).
- [104] ecoinvent Association, *ecoinvent Database 3.10*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Zugriff am: 23. November 2025).
- [105] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, *ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekobaudat.de/> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [106] *Richtlinie Tunnelabdichtung: 2012 12*, Österreichische Bautechnik Vereinigung.
- [107] Bauverlag BV GmbH, *Baugeräteleiste: BGL 2025*. [Online]. Verfügbar unter: <https://app.bgl-online.info/de> (Zugriff am: 15. Mai 2026).
- [108] G. Girmscheid, *Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [109] *prSIA 196: 2024-05: Baulüftung im Untertagebau*, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein.
- [110] RIS, *Bauarbeiterschutzverordnung § 96 - Bundesrecht konsolidiert*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/eli/bgbl/1994/340/P96/NOR40161947> (Zugriff am: 2. April 2026).
- [111] RIVA Stahl GmbH, *Betonstahl in Matten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kiwa.com/globalassets/germany/veroeffentlichte-epds/epd-riva-131-de.pdf/> (Zugriff am: 19. April 2026).
- [112] Pittini Group, *Baustahl, elektrogeschweißte Matte, Gitterträger*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pittini.com/wp-content/uploads/sites/21/Pittini-Gruppe-elektrogeschweisste-matten-und-gittertrager-DEU.pdf> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [113] Bau EPD GmbH, *Veröffentlichte EPDs | Betonstähle Stahl- und Walzwerk Marienhütte G.m.b.H.* [Online]. Verfügbar unter: https://www.bau-epd.at/fileadmin/user_upload/epds_Deutsch/BAU-EPD-MARIENHUETTE-2025-1-ECOINVENT-Baustahl-20250624-Webseite.pdf (Zugriff am: 17. März 2026).
- [114] Pittini Group, *Warmgewalzter Stahl, Rundstahl in Stäben*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.pittini.com/wp-content/uploads/sites/21/Pittini-Gruppe-rundstahl-vom-coil-und-in-staben-EPD-zertifizierung-DEU.pdf> (Zugriff am: 17. März 2026).
- [115] Sandvik, *DSI OMEGA-BOLT®*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mining.sandvik/siteassets/product-documents/ground-support/epd_omega-bolt_pl_2024.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [116] Sandvik, *Omega-Bolt® Auracore*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.mining.sandvik/siteassets/product-documents/ground-support/epd_omega-bolt-auracore_pl_2025.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).

- [117] DSI Underground Austria GmbH, *Scandinavian Tunneling Bolt (STB)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epd-global.com/getfile.php/13243855-1766150820/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-14529-14985_Scandinavian-Tunneling-Bolt--STB-.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [118] Pretec Norge AS, *Self Drilling Anchor Pc-Coat®*. [Online]. Verfügbar unter: https://pretec.no/wp-content/uploads/2025/02/NEPD-8850-8511_Self-Drilling-Anchor-Pc-Coat-.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2025).
- [119] MINOVA Arnall, *Minova SDA system for self-drilling micropiles, soil nails & rock bolts*. [Online]. Verfügbar unter: https://geomek.se/wp-content/uploads/2024/09/ITB-EPD_140-Minova-update-v2.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [120] Bau EPD GmbH, *CEM II/A-S 42,5 R: Baunit GmbH*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bau-epd.at/fileadmin/user_upload/epds_Deutsch/BAU-EPD-BAUMIT-Zement-2025-01-Ecoinvent-CEM_II_A-S_42_5_R-20250723-Webseite.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [121] European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd., *Concrete admixtures – Air entrainers*. [Online]. Verfügbar unter: https://muster-epd.deutschebauchemie.de/fileadmin/user_upload/EFCA-model-EPD_air_entrainers_final_2026-12-15.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [122] Mapei, *Rockbolt* (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [123] Mapei, *Nonset 50*. [Online]. Verfügbar unter: https://cdnmedia.mapei.com/docs/librariesprovider41/products-documents/7_nepd-9043-9043-1_nonset-50_be227c9ec08b415f8b04ed0cd55d88ad.pdf?sfvrsn=1f3ae638_0 (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [124] Pretec Norge AS, *Spiling bolt*. [Online]. Verfügbar unter: https://pretec.no/wp-content/uploads/2024/04/NEPD-4930-4272_Spiling-bolt.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [125] Pretec Norge AS, *Rebar bolt / Spiling bolt - B500NC Pc-Coat® Ø16 - Ø32*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epd-global.com/getfile.php/13205273-1741716663/EPDer/Byggevarer/St%C3%A5lkonstruksjoner/NEPD-8841-8504_Rebar-bolt---Spiling-bolt---B500NC-Pc-Coat---16---32.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [126] Sphera Solutions GmbH, *Abwasserrohr PE-HD*. [Online]. Verfügbar unter: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=db7d83d8-6a14-48a1-8fc7-2fa442e4ec87&version=20.24.070&stock=OBD_2024_I&lang=de (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [127] NAUE GmbH & Co. KG, *Secutex®*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.naue.com/de/download/environmental-product-declaration-epd-secutex/?wpdmdl=10539&ind=1683636702000&refresh=1515c9fa&filename=00049_F_EN_EPD_Secutex_140121.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [128] NAUE GmbH & Co. KG, *Carbofol®*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.naue.com/download/environmental-product-declaration-epd->

- carbofol/?wpdmdl=10560&ind=1683637175109&refresh=1f974ff7&filename=00046_F_EN_EPD_Carbofol_180121.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [129] Deutsche Bauchemie e.V., *Modifizierte mineralische Mörtel der Gruppe 1*. [Online]. Verfügbar unter: https://muster-epd.deutschebauchemie.de/fileadmin/user_upload/European_Model_EPD_Modified_mineral_mortar_group_1_2022-09-26.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [130] E. Steiner, "Güterverkehr: Studienblätter zur Vorlesung", Universität Innsbruck, 2024.
- [131] Statistisches Bundesamt, *Verkehr NST-2007: Einheitliches Güterverzeichnis für die Verkehrsstatistik* – 2007. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Tabellen/nsz-2007.pdf?__blob=publicationFile (Zugriff am: 13. Mai 2026).
- [132] Statistik Austria, *Verkehrsstatistik 2023*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.statistik.at/fileadmin/publications/Verkehr2023barr.pdf> (Zugriff am: 13. Mai 2026).
- [133] Statistik Austria, *Klassifikationsdatenbank: NST 2007 - Struktur*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.klassifikationsdatenbank.at/KDBWeb/kdb_VersionAuswahl.do (Zugriff am: 13. Mai 2026).
- [134] L. Hausberger, *Ökobilanzdaten LKW- & PKW-Verkehr: Interne Studie*. Universität Innsbruck, 2025.
- [135] L. Hausberger, *Ökobilanzdaten Bauprozesse: Baumaschine & Strom: Interne Studie*. Universität Innsbruck, 2025.
- [136] *ÖBV Merkblatt GWP-Bewertung im Infrastrukturbau: 2025 05*, Österreichische Bautechnik Vereinigung.
- [137] K. Zeugner, M. Zeugner, T. Grochar, M. Krug, M. Maurer und K. Hammermüller, *Genial! Duo - Geographie, Wirtschaftskunde*, 2. Aufl. Wien: bvl Bildungsv Verlag Lemberger; Ed. Hölzel, 2021.
- [138] Freie Universität Berlin, *Tabelle - Gesteinsdichten*. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.cms.fu-berlin.de/geo/fb/e-learning/petrograph/tabellen/gesteinsdichte.html> (Zugriff am: 15. Mai 2026).
- [139] R. Pankratz, "Leistungsermittlung im zyklischen Vortrieb" Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2013. [Online]. Verfügbar unter: <https://pure.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/2285358/AC10785208n01.pdf>
- [140] C. S. Kirchttag, "Verwertung von Tunnelausbruch: Für den Vortrieb eingebrachte Materialien und deren Auswirkungen auf die Verwertung" Masterarbeit, Montanuniversität Leoben, Leoben, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://pure.unileoben.ac.at/ws/files/8304081/AC16431539.pdf>
- [141] Sandvik Mining and Construction Tools AB, *Top Hammer drill bits*. [Online]. Verfügbar unter:

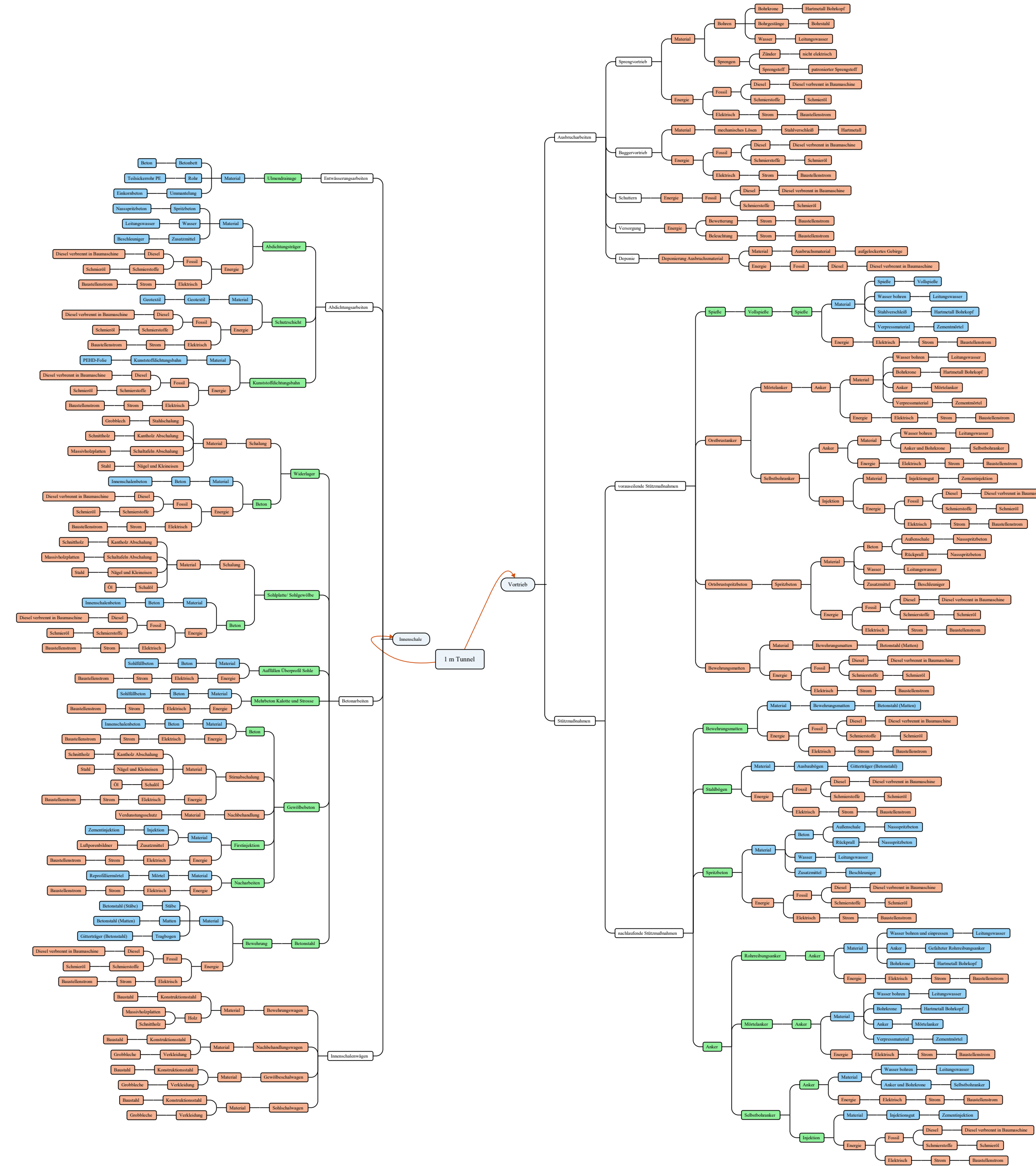
- <https://manage.epdhub.com/declarations/file/download/epdSigned/lang/5892/en/>
(Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [142] Austin Powder GmbH, *Emulex 2*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epd-global.com/getfile.php/13176300-1741650063/EPDer/Byggevarer/NEPD-6647-5830_Emulex-2.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [143] Orica Norway, *Exel™ Neo*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.epd-global.com/getfile.php/13176275-1741650022/EPDer/Byggevarer/NEPD-7474-6859_Exel-Neo-----Non-electric-initiation-system.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [144] European Federation of Concrete Admixtures Associations Ltd., *Concrete admixtures – Set Accelerators*. [Online]. Verfügbar unter: https://muster-epd.deutschebauchemie.de/fileadmin/user_upload/EFCA-model-EPD_set_accelerators_final_2026-12-15.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [145] Binderholz GmbH, *Binderholz solid wood panel*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.binderholz.com/fileadmin/user_upload/pdf/pruefzeugnisse-zulassungen/EPD-binderholz-massivholzplatte.pdf (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [146] Fritz EGGER GmbH & Co. OG, *EGGER Schnittholz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://downloads.egger-cdn.com/b52b4ddf-c787-4fbf-b407-dd0d2b213458/fb8b10ad-22f6-4e75-8bf7-6d3f1d0a10b6> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [147] Fapricela - Industria de Trefilaria, SA, *Nails*. [Online]. Verfügbar unter: <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/EPDs/636e04a6-4325-4593-57db-08de16e61985/Documents> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [148] Master Builders Solutions, *MasterFinish RL 224*. [Online]. Verfügbar unter: https://assets.ctfassets.net/ctspkgm1yw3s/7DqHcFK4iJWDxJW22pOznw/9d984d8d75a76eadda602b78ecc0c404/MasterFinish_RL_224_EPd_HUB-2504_2025-01-27.pdf
(Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [149] voestalpine AG, *Grobblech*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/stahl/content/download/61003/file/2023-EPD-Grobblech-voestalpine-DE-17042023.pdf> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [150] MUREXIN GmbH, *Verdunstungsschutz LF 30*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.murexin.at/produkte/verdunstungsschutz-lf-30/> (Zugriff am: 10. Juni 2026).
- [151] Marti Gruppe, *Innovation im Brenner Basistunnel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=ksWmb6TTbeQ> (Zugriff am: 15. Juni 2026).
- [152] Schatz GmbH, *Sohlgewölbeschalung inkl. Schreitwerk für Semmering – Basistunnel*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tbschatz.at/sohlgewoelbeschalung-inkl-schreitwerk-fuer-semmering-basistunnel/> (Zugriff am: 15. Juni 2026).
- [153] Give Steel A/S, *Lackierter Baustahl*. [Online]. Verfügbar unter: https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=9db2875b-1e6e-4940-bf63-953043cfef20&version=00.07.000&stock=OBD_2024_I&lang=de
(Zugriff am: 10. Juni 2026).

- [154] PERI, *Bewehrungswagen für den Riedberg Tunnel im Einsatz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.peri.ch/de/projekte/riedberg-tunnel.html#impressionen> (Zugriff am: 15. Juni 2026).
- [155] PERI, "Verschiedene Tunnelquerschnitte mit erstem vollhydraulischen Schalwagen mit Raupenantrieb", *PERI*, 1. Jan. 2023, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.peri.at/aktuelles/news-presse/verschiedene-tunnelquerschnitte-mit-erstem-vollhydraulischen-schalwagen-mit-raupenantrieb.html#medien>. Zugriff am: 15. Juni 2026.
- [156] Implenia AG, *Tunnel-Werkzeuge auf Mass*. [Online]. Verfügbar unter: <https://implenia.com/medien/artikel/tunnel-werkzeuge-auf-mass/> (Zugriff am: 15. Juni 2026).
- [157] PRé Sustainability, *SimaPro LCA Software 9.6.0.1*. [Online]. Verfügbar unter: <https://simapro.com/> (Zugriff am: 12. März 2026).
- [158] Intergovernmental Panel on Climate Change, "The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity" in *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 2023, S. 923–1054, doi: 10.1017/9781009157896.009.
- [159] H. Kannewitz, *PENRT - nbau. NACHHALTIG BAUEN*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nbau.org/glossary/penrt/> (Zugriff am: 19. Juni 2026).
- [160] ESU-services GmbH, *Bewertungsmethoden in der Ökobilanzierung: Anhang zu Offerten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://esu-services.ch/fileadmin/download/tender/ESU-Beschreibung-Bewertungsmethoden.pdf> (Zugriff am: 19. Juni 2026).
- [161] S. Brockhaus, "Bodenversauerung: Ursachen und Folgen des sauren Bodens", *Utopia GmbH*, 27. Apr. 2019, 2019. [Online]. Verfügbar unter: https://utopia.de/ratgeber/bodenversauerung-ursachen-und-folgen-des-sauren-bodens_135415/. Zugriff am: 19. Juni 2026.
- [162] Greenhouse Sustainability, *Welche Kategorien von Umweltauswirkungen gibt es? - Nachhaltigkeit im Treibhaus*. [Online]. Verfügbar unter: <https://greenhouse-sustainability.com/de/artikel/kategorien-von-umweltauswirkungen/> (Zugriff am: 15. Juni 2026).
- [163] F. Gschösser und J. Wall, "EU-Taxonomie im Bauprojekt - von der Ausschreibung zur Umsetzung: Perspektive eines bauausführenden Generalunternehmens", *bau aktuell*, Jg. 17, Nr. 2, S. 75–80, 2026.
- [164] W. Wittke, B. Wittke-Schmitt, M. Wittke, P. Wittke-Gattermann und R. Druffel, "Einsparung von Energie und Rohstoffen und Verringerung des CO₂-Fußabdrucks durch Innovationen im Tunnelbau", *tunnel*, 21. Mai 2022, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tunnel->

- online.info/de/artikel/tunnel_Einsparung_von_Energie_und_Rohstoffen_und_Verringerung_des_CO2-Fussabdrucks-3770211.html. Zugriff am: 17. März 2026.
- [165] M. Weigert, L. Winkler und R. Obernosterer, "CO2-Neutrale Baustelle", *The Journal of OIAV*, Nr. 166, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oiaav.at/wp-content/uploads/2021/09/17_baustelle.pdf
- [166] A. C. Vienna, "Geotechnik als Klimaschlüssel im Bau: Bis zu 40 % Reduktion des CO2-Fußabdrucks bis 2030 möglich", *Austria Center Vienna*, 8. Juni 2026, 2026. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acv.at/de/news/geotechnik-als-klimaschlüssel-im-bau-bis-zu-40-reduktion-des-co2-fusabdrucks-bis-2030-moglich/>. Zugriff am: 23. Juni 2026.
- [167] B. Wietek, *Beton - Stahlbeton - Faserbeton: Eigenschaften und Unterschiede*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2019.
- [168] *Nitratfreies Sprengen: Grüne Sprengstofflösungen für den Tunnelbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://implenia.com/de-at/vision-underground/nitratfreies-sprengen/> (Zugriff am: 17. März 2026).
- [169] Wien Energie GmbH, *Stromerzeugung in Österreich 2025*. [Online]. Verfügbar unter: <https://positionen.wienerstadtwerke.at/wissenshub/grafiken/stromerzeugung-in-osterreich> (Zugriff am: 23. Juni 2026).
- [170] Bundesministerium für Wirtschaft, Energie und Tourismus, *Woher kommt Österreichs Strom?* - energie.gv.at. [Online]. Verfügbar unter: <https://energie.gv.at/versorgung/woher-kommt-oesterreichs-strom> (Zugriff am: 23. Juni 2026).

10 Anhang

Nachfolgend werden die betrachteten Systemgrenzen sowie die detaillierten ökobilanziellen Ergebnisse angehängt.





Transportmittel	Bezüge	Prozess	Ge-Raum-Element	Zustimmung	Art	Materialspezifikation	WSP-gesamt	WSP	WSP2	WSP3	WSP4	WSP5	WSP6	WSP7	WSP8	WSP9	WSP10	WSP11	WSP12	WSP13	WSP14	WSP15	WSP16	WSP17	WSP18	WSP19	WSP20	WSP21	WSP22	WSP23	WSP24	WSP25	WSP26	WSP27	WSP28	WSP29	WSP30	WSP31	WSP32	WSP33	WSP34	WSP35	WSP36	WSP37	WSP38	WSP39	WSP40	WSP41	WSP42	WSP43	WSP44	WSP45	WSP46	WSP47	WSP48	WSP49	WSP50	WSP51	WSP52	WSP53	WSP54	WSP55	WSP56	WSP57	WSP58	WSP59	WSP60	WSP61	WSP62	WSP63	WSP64	WSP65	WSP66	WSP67	WSP68	WSP69	WSP70	WSP71	WSP72	WSP73	WSP74	WSP75	WSP76	WSP77	WSP78	WSP79	WSP80	WSP81	WSP82	WSP83	WSP84	WSP85	WSP86	WSP87	WSP88	WSP89	WSP90	WSP91	WSP92	WSP93	WSP94	WSP95	WSP96	WSP97	WSP98	WSP99	WSP100	WSP101	WSP102	WSP103	WSP104	WSP105	WSP106	WSP107	WSP108	WSP109	WSP110	WSP111	WSP112	WSP113	WSP114	WSP115	WSP116	WSP117	WSP118	WSP119	WSP120	WSP121	WSP122	WSP123	WSP124	WSP125	WSP126	WSP127	WSP128	WSP129	WSP130	WSP131	WSP132	WSP133	WSP134	WSP135	WSP136	WSP137	WSP138	WSP139	WSP140	WSP141	WSP142	WSP143	WSP144	WSP145	WSP146	WSP147	WSP148	WSP149	WSP150	WSP151	WSP152	WSP153	WSP154	WSP155	WSP156	WSP157	WSP158	WSP159	WSP160	WSP161	WSP162	WSP163	WSP164	WSP165	WSP166	WSP167	WSP168	WSP169	WSP170	WSP171	WSP172	WSP173	WSP174	WSP175	WSP176	WSP177	WSP178	WSP179	WSP180	WSP181	WSP182	WSP183	WSP184	WSP185	WSP186	WSP187	WSP188	WSP189	WSP190	WSP191	WSP192	WSP193	WSP194	WSP195	WSP196	WSP197	WSP198	WSP199	WSP200	WSP201	WSP202	WSP203	WSP204	WSP205	WSP206	WSP207	WSP208	WSP209	WSP210	WSP211	WSP212	WSP213	WSP214	WSP215	WSP216	WSP217	WSP218	WSP219	WSP220	WSP221	WSP222	WSP223	WSP224	WSP225	WSP226	WSP227	WSP228	WSP229	WSP230	WSP231	WSP232	WSP233	WSP234	WSP235	WSP236	WSP237	WSP238	WSP239	WSP240	WSP241	WSP242	WSP243	WSP244	WSP245	WSP246	WSP247	WSP248	WSP249	WSP250	WSP251	WSP252	WSP253	WSP254	WSP255	WSP256	WSP257	WSP258	WSP259	WSP260	WSP261	WSP262	WSP263	WSP264	WSP265	WSP266	WSP267	WSP268	WSP269	WSP270	WSP271	WSP272	WSP273	WSP274	WSP275	WSP276	WSP277	WSP278	WSP279	WSP280	WSP281	WSP282	WSP283	WSP284	WSP285	WSP286	WSP287	WSP288	WSP289	WSP290	WSP291	WSP292	WSP293	WSP294	WSP295	WSP296	WSP297	WSP298	WSP299	WSP300	WSP301	WSP302	WSP303	WSP304	WSP305	WSP306	WSP307	WSP308	WSP309	WSP310	WSP311	WSP312	WSP313	WSP314	WSP315	WSP316	WSP317	WSP318	WSP319	WSP320	WSP321	WSP322	WSP323	WSP324	WSP325	WSP326	WSP327	WSP328	WSP329	WSP330	WSP331	WSP332	WSP333	WSP334	WSP335	WSP336	WSP337	WSP338	WSP339	WSP340	WSP341	WSP342	WSP343	WSP344	WSP345	WSP346	WSP347	WSP348	WSP349	WSP350	WSP351	WSP352	WSP353	WSP354	WSP355	WSP356	WSP357	WSP358	WSP359	WSP360	WSP361	WSP362	WSP363	WSP364	WSP365	WSP366	WSP367	WSP368	WSP369	WSP370	WSP371	WSP372	WSP373	WSP374	WSP375	WSP376	WSP377	WSP378	WSP379	WSP380	WSP381	WSP382	WSP383	WSP384	WSP385	WSP386	WSP387	WSP388	WSP389	WSP390	WSP391	WSP392	WSP393	WSP394	WSP395	WSP396	WSP397	WSP398	WSP399	WSP400	WSP401	WSP402	WSP403	WSP404	WSP405	WSP406	WSP407	WSP408	WSP409	WSP410	WSP411	WSP412	WSP413	WSP414	WSP415	WSP416	WSP417	WSP418	WSP419	WSP420	WSP421	WSP422	WSP423	WSP424	WSP425	WSP426	WSP427	WSP428	WSP429	WSP430	WSP431	WSP432	WSP433	WSP434	WSP435	WSP436	WSP437	WSP438	WSP439	WSP440	WSP441	WSP442	WSP443	WSP444	WSP445	WSP446	WSP447	WSP448	WSP449	WSP450	WSP451	WSP452	WSP453	WSP454	WSP455	WSP456	WSP457	WSP458	WSP459	WSP460	WSP461	WSP462	WSP463	WSP464	WSP465	WSP466	WSP467	WSP468	WSP469	WSP470	WSP471	WSP472	WSP473	WSP474	WSP475	WSP476	WSP477	WSP478	WSP479	WSP480	WSP481	WSP482	WSP483	WSP484	WSP485	WSP486	WSP487	WSP488	WSP489	WSP490	WSP491	WSP492	WSP493	WSP494	WSP495	WSP496	WSP497	WSP498	WSP499	WSP500	WSP501	WSP502	WSP503	WSP504	WSP505	WSP506	WSP507	WSP508	WSP509	WSP510	WSP511	WSP512	WSP513	WSP514	WSP515	WSP516	WSP517	WSP518	WSP519	WSP520	WSP521	WSP522	WSP523	WSP524	WSP525	WSP526	WSP527	WSP528	WSP529	WSP530	WSP531	WSP532	WSP533	WSP534	WSP535	WSP536	WSP537	WSP538	WSP539	WSP540	WSP541	WSP542	WSP543	WSP544	WSP545	WSP546	WSP547	WSP548	WSP549	WSP550	WSP551	WSP552	WSP553	WSP554	WSP555	WSP556	WSP557	WSP558	WSP559	WSP560	WSP561	WSP562	WSP563	WSP564	WSP565	WSP566	WSP567	WSP568	WSP569	WSP570	WSP571	WSP572	WSP573	WSP574	WSP575	WSP576	WSP577	WSP578	WSP579	WSP580	WSP581	WSP582	WSP583	WSP584	WSP585	WSP586	WSP587	WSP588	WSP589	WSP590	WSP591	WSP592	WSP593	WSP594	WSP595	WSP596	WSP597	WSP598	WSP599	WSP600	WSP601	WSP602	WSP603	WSP604	WSP605	WSP606	WSP607	WSP608	WSP609	WSP610	WSP611	WSP612	WSP613	WSP614	WSP615	WSP616	WSP617	WSP618	WSP619	WSP620	WSP621	WSP622	WSP623	WSP624	WSP625	WSP626	WSP627	WSP628	WSP629	WSP630	WSP631	WSP632	WSP633	WSP634	WSP635	WSP636	WSP637	WSP638	WSP639	WSP640	WSP641	WSP642	WSP643	WSP644	WSP645	WSP646	WSP647	WSP648	WSP649	WSP650	WSP651	WSP652	WSP653	WSP654	WSP655	WSP656	WSP657	WSP658	WSP659	WSP660	WSP661	WSP662	WSP663	WSP664	WSP665	WSP666	WSP667	WSP668	WSP669	WSP670	WSP671	WSP672	WSP673	WSP674	WSP675	WSP676	WSP677	WSP678	WSP679	WSP680	WSP681	WSP682	WSP683	WSP684	WSP685	WSP686	WSP687	WSP688	WSP689	WSP690	WSP691	WSP692	WSP693	WSP694	WSP695	WSP696	WSP697	WSP698	WSP699	WSP700	WSP701	WSP702	WSP703	WSP704	WSP705	WSP706	WSP707	WSP708	WSP709	WSP710	WSP711	WSP712	WSP713	WSP714	WSP715	WSP716	WSP717	WSP718	WSP719	WSP720	WSP721	WSP722	WSP723	WSP724	WSP725	WSP726	WSP727	WSP728	WSP729	WSP730	WSP731	WSP732	WSP733	WSP734	WSP735	WSP736	WSP737	WSP738	WSP739	WSP740	WSP741	WSP742	WSP743	WSP744	WSP745	WSP746	WSP747	WSP748	WSP749	WSP750	WSP751	WSP752	WSP753	WSP754	WSP755	WSP756	WSP757	WSP758	WSP759	WSP760	WSP761	WSP762	WSP763	WSP764	WSP765	WSP766	WSP767	WSP768	WSP769	WSP770	WSP771	WSP772	WSP773	WSP774	WSP775	WSP776	WSP777	WSP778	WSP779	WSP780	WSP781	WSP782	WSP783	WSP784	WSP785	WSP786	WSP787	WSP788	WSP789	WSP790	WSP791	WSP792	WSP793	WSP794	WSP795	WSP796	WSP797	WSP798	WSP799	WSP800	WSP801	WSP802	WSP803	WSP804	WSP805	WSP806	WSP807	WSP808	WSP809	WSP810	WSP811	WSP812	WSP813	WSP814	WSP815	WSP816	WSP817	WSP818	WSP819	WSP820	WSP821	WSP822	WSP823	WSP824	WSP825	WSP826	WSP827	WSP828	WSP829	WSP830	WSP831	WSP832	WSP833	WSP834	WSP835	WSP836	WSP837	WSP838	WSP839	WSP840	WSP841	WSP842	WSP843	WSP844	WSP845	WSP846	WSP847	WSP848	WSP849	WSP850	WSP851	WSP852	WSP853	WSP854	WSP855	WSP856	WSP857	WSP858	WSP859	WSP860	WSP861	WSP862	WSP863	WSP864	WSP865	WSP866	WSP867	WSP868	WSP869	WSP870	WSP871	WSP872	WSP873	WSP874	WSP875	WSP876	WSP877	WSP878	WSP879	WSP880	WSP881	WSP882	WSP883	WSP884	WSP885	WSP886	WSP887	WSP888	WSP889	WSP890	WSP891	WSP892	WSP893	WSP894	WSP895	WSP896	WSP897	WSP898	WSP899	WSP900	WSP901	WSP902	WSP903	WSP904	WSP905	WSP906	WSP907	WSP908	WSP909	WSP910	WSP911	WSP912	WSP913	WSP914	WSP915	WSP916	WSP917	WSP918	WSP919	WSP920	WSP921	WSP922	WSP923	WSP924	WSP925	WSP926	WSP927	WSP928	WSP929	WSP930	WSP931	WSP932	WSP933	WSP934	WSP935	WSP936	WSP937	WSP938	WSP939	WSP940	WSP941	WSP942	WSP943	WSP944	WSP945	WSP946	WSP947	WSP948	WSP949	WSP950	WSP951	WSP952	WSP953	WSP954	WSP955	WSP956	WSP957	WSP958	WSP959	WSP960	WSP961	WSP962	WSP963	WSP964	WSP965	WSP966	WSP967	WSP968	WSP969	WSP970	WSP971	WSP972	WSP973	WSP974	WSP975	WSP976	WSP977	WSP978	WSP979	WSP980	WSP981	WSP982	WSP983	WSP984	WSP985	WSP986	WSP987	WSP988	WSP989	WSP990	WSP991	WSP992	WSP993	WSP994	WSP995	WSP996	WSP997	WSP998	WSP999	WSP1000	WSP1001	WSP1002	WSP1003	WSP1004	WSP1005	WSP1006	WSP1007	WSP1008	WSP1009	WSP1010	WSP1011	WSP1012	WSP1013	WSP1014	WSP1015	WSP1016	WSP1017	WSP1018	WSP1019	WSP1020	WSP1021	WSP1022	WSP1023	WSP1024	WSP1025	WSP1026	WSP1027	WSP1028	WSP1029	WSP1030	WSP1031	WSP1032	WSP1033	WSP1034	WSP1035	WSP1036	WSP1037	WSP1038	WSP1039	WSP1040	WSP1041	WSP1042	WSP1043	WSP1044	WSP1045	WSP1046	WSP1047	WSP1048	WSP1049	WSP1050	WSP1051	WSP1052	WSP1053	WSP1054	WSP1055	WSP1056	WSP1057	WSP1058	WSP1059	WSP1060	WSP1061	WSP1062	WSP1063	WSP1064	WSP1065	WSP1066	WSP1067	WSP1068	WSP1069	WSP1070	WSP1071	WSP1072	WSP1073	WSP1074	WSP1075	WSP1076	WSP1077	WSP1078	WSP1079	WSP1080	WSP1081	WSP1082	WSP1083	WSP1084	WSP1085	WSP1086	WSP1087	WSP1088	WSP1089	WSP1090	WSP1091	WSP1092	WSP1093	WSP1094	WSP1095	WSP1096	WSP1097	WSP1098	WSP1099	WSP1100	WSP1101	WSP1102	WSP1103	WSP1104	WSP1105	WSP1106	WSP1107	WSP1108	WSP1109	WSP1110	WSP1111	WSP1112	WSP1113	WSP1114	WSP1115	WSP1116	WSP1117	WSP1118	WSP1119	WSP1120	WSP1121	WSP1122	WSP1123	WSP1124	WSP1125	WSP1126	WSP1127	WSP1128	WSP1129	WSP1130	WSP1131	WSP1132	WSP1133	WSP1134	WSP1135	WSP1136	WSP1137	WSP1138	WSP1139	WSP1140	WSP1141	WSP1142	WSP1143	WSP1144	WSP1145	WSP1146	WSP1147	WSP1148	WSP1149	WSP1150	WSP1151	WSP1152	WSP1153	WSP1154	WSP1155	WSP1156	WSP1157	WSP1158	WSP1159	WSP1160	WSP1161	WSP1162	WSP1163	WSP1164	WSP1165	WSP1166	WSP1167	WSP1168	WSP1169	WSP1170	WSP1171	WSP1172	WSP1173	WSP1174	WSP1175	WSP1176	WSP1177	WSP1178	WSP1179	WSP1180	WSP1181	WSP1182	WSP1183	WSP1184	WSP1185	WSP1186	WSP1187	WSP1188	WSP1189	WSP1190	WSP1191	WSP1192	WSP1193	WSP1194	WSP1195	WSP1196	WSP1197	WSP1198	WSP1199	WSP1200	WSP1201	WSP1202	WSP1203	WSP1204	WSP1205	WSP1206	WSP1207	WSP1208	WSP1209	WSP1210	WSP1211	WSP1212	WSP1213	WSP1214	WSP1215	WSP1216	WSP1217	WSP1218
-----------------	--------	---------	-----------------	------------	-----	-----------------------	------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

[illegible]



Transportart	Reihe	Prozess	Ge-Region	Stromkreis	Zustellung	Art	Materialposition	WSP-gesamt	WSP	WSP2	WSP3	WSP4	WSP5	WSP6	WSP7	WSP8	WSP9	WSP10	WSP11	WSP12	WSP13	WSP14	WSP15	WSP16	WSP17	WSP18	WSP19	WSP20	WSP21	WSP22	WSP23	WSP24	WSP25	WSP26	WSP27	WSP28	WSP29	WSP30	WSP31	WSP32	WSP33	WSP34	WSP35	WSP36	WSP37	WSP38	WSP39	WSP40	WSP41	WSP42	WSP43	WSP44	WSP45	WSP46	WSP47	WSP48	WSP49	WSP50	WSP51	WSP52	WSP53	WSP54	WSP55	WSP56	WSP57	WSP58	WSP59	WSP60	WSP61	WSP62	WSP63	WSP64	WSP65	WSP66	WSP67	WSP68	WSP69	WSP70	WSP71	WSP72	WSP73	WSP74	WSP75	WSP76	WSP77	WSP78	WSP79	WSP80	WSP81	WSP82	WSP83	WSP84	WSP85	WSP86	WSP87	WSP88	WSP89	WSP90	WSP91	WSP92	WSP93	WSP94	WSP95	WSP96	WSP97	WSP98	WSP99	WSP100	WSP101	WSP102	WSP103	WSP104	WSP105	WSP106	WSP107	WSP108	WSP109	WSP110	WSP111	WSP112	WSP113	WSP114	WSP115	WSP116	WSP117	WSP118	WSP119	WSP120	WSP121	WSP122	WSP123	WSP124	WSP125	WSP126	WSP127	WSP128	WSP129	WSP130	WSP131	WSP132	WSP133	WSP134	WSP135	WSP136	WSP137	WSP138	WSP139	WSP140	WSP141	WSP142	WSP143	WSP144	WSP145	WSP146	WSP147	WSP148	WSP149	WSP150	WSP151	WSP152	WSP153	WSP154	WSP155	WSP156	WSP157	WSP158	WSP159	WSP160	WSP161	WSP162	WSP163	WSP164	WSP165	WSP166	WSP167	WSP168	WSP169	WSP170	WSP171	WSP172	WSP173	WSP174	WSP175	WSP176	WSP177	WSP178	WSP179	WSP180	WSP181	WSP182	WSP183	WSP184	WSP185	WSP186	WSP187	WSP188	WSP189	WSP190	WSP191	WSP192	WSP193	WSP194	WSP195	WSP196	WSP197	WSP198	WSP199	WSP200	WSP201	WSP202	WSP203	WSP204	WSP205	WSP206	WSP207	WSP208	WSP209	WSP210	WSP211	WSP212	WSP213	WSP214	WSP215	WSP216	WSP217	WSP218	WSP219	WSP220	WSP221	WSP222	WSP223	WSP224	WSP225	WSP226	WSP227	WSP228	WSP229	WSP230	WSP231	WSP232	WSP233	WSP234	WSP235	WSP236	WSP237	WSP238	WSP239	WSP240	WSP241	WSP242	WSP243	WSP244	WSP245	WSP246	WSP247	WSP248	WSP249	WSP250	WSP251	WSP252	WSP253	WSP254	WSP255	WSP256	WSP257	WSP258	WSP259	WSP260	WSP261	WSP262	WSP263	WSP264	WSP265	WSP266	WSP267	WSP268	WSP269	WSP270	WSP271	WSP272	WSP273	WSP274	WSP275	WSP276	WSP277	WSP278	WSP279	WSP280	WSP281	WSP282	WSP283	WSP284	WSP285	WSP286	WSP287	WSP288	WSP289	WSP290	WSP291	WSP292	WSP293	WSP294	WSP295	WSP296	WSP297	WSP298	WSP299	WSP300	WSP301	WSP302	WSP303	WSP304	WSP305	WSP306	WSP307	WSP308	WSP309	WSP310	WSP311	WSP312	WSP313	WSP314	WSP315	WSP316	WSP317	WSP318	WSP319	WSP320	WSP321	WSP322	WSP323	WSP324	WSP325	WSP326	WSP327	WSP328	WSP329	WSP330	WSP331	WSP332	WSP333	WSP334	WSP335	WSP336	WSP337	WSP338	WSP339	WSP340	WSP341	WSP342	WSP343	WSP344	WSP345	WSP346	WSP347	WSP348	WSP349	WSP350	WSP351	WSP352	WSP353	WSP354	WSP355	WSP356	WSP357	WSP358	WSP359	WSP360	WSP361	WSP362	WSP363	WSP364	WSP365	WSP366	WSP367	WSP368	WSP369	WSP370	WSP371	WSP372	WSP373	WSP374	WSP375	WSP376	WSP377	WSP378	WSP379	WSP380	WSP381	WSP382	WSP383	WSP384	WSP385	WSP386	WSP387	WSP388	WSP389	WSP390	WSP391	WSP392	WSP393	WSP394	WSP395	WSP396	WSP397	WSP398	WSP399	WSP400	WSP401	WSP402	WSP403	WSP404	WSP405	WSP406	WSP407	WSP408	WSP409	WSP410	WSP411	WSP412	WSP413	WSP414	WSP415	WSP416	WSP417	WSP418	WSP419	WSP420	WSP421	WSP422	WSP423	WSP424	WSP425	WSP426	WSP427	WSP428	WSP429	WSP430	WSP431	WSP432	WSP433	WSP434	WSP435	WSP436	WSP437	WSP438	WSP439	WSP440	WSP441	WSP442	WSP443	WSP444	WSP445	WSP446	WSP447	WSP448	WSP449	WSP450	WSP451	WSP452	WSP453	WSP454	WSP455	WSP456	WSP457	WSP458	WSP459	WSP460	WSP461	WSP462	WSP463	WSP464	WSP465	WSP466	WSP467	WSP468	WSP469	WSP470	WSP471	WSP472	WSP473	WSP474	WSP475	WSP476	WSP477	WSP478	WSP479	WSP480	WSP481	WSP482	WSP483	WSP484	WSP485	WSP486	WSP487	WSP488	WSP489	WSP490	WSP491	WSP492	WSP493	WSP494	WSP495	WSP496	WSP497	WSP498	WSP499	WSP500	WSP501	WSP502	WSP503	WSP504	WSP505	WSP506	WSP507	WSP508	WSP509	WSP510	WSP511	WSP512	WSP513	WSP514	WSP515	WSP516	WSP517	WSP518	WSP519	WSP520	WSP521	WSP522	WSP523	WSP524	WSP525	WSP526	WSP527	WSP528	WSP529	WSP530	WSP531	WSP532	WSP533	WSP534	WSP535	WSP536	WSP537	WSP538	WSP539	WSP540	WSP541	WSP542	WSP543	WSP544	WSP545	WSP546	WSP547	WSP548	WSP549	WSP550	WSP551	WSP552	WSP553	WSP554	WSP555	WSP556	WSP557	WSP558	WSP559	WSP560	WSP561	WSP562	WSP563	WSP564	WSP565	WSP566	WSP567	WSP568	WSP569	WSP570	WSP571	WSP572	WSP573	WSP574	WSP575	WSP576	WSP577	WSP578	WSP579	WSP580	WSP581	WSP582	WSP583	WSP584	WSP585	WSP586	WSP587	WSP588	WSP589	WSP590	WSP591	WSP592	WSP593	WSP594	WSP595	WSP596	WSP597	WSP598	WSP599	WSP600	WSP601	WSP602	WSP603	WSP604	WSP605	WSP606	WSP607	WSP608	WSP609	WSP610	WSP611	WSP612	WSP613	WSP614	WSP615	WSP616	WSP617	WSP618	WSP619	WSP620	WSP621	WSP622	WSP623	WSP624	WSP625	WSP626	WSP627	WSP628	WSP629	WSP630	WSP631	WSP632	WSP633	WSP634	WSP635	WSP636	WSP637	WSP638	WSP639	WSP640	WSP641	WSP642	WSP643	WSP644	WSP645	WSP646	WSP647	WSP648	WSP649	WSP650	WSP651	WSP652	WSP653	WSP654	WSP655	WSP656	WSP657	WSP658	WSP659	WSP660	WSP661	WSP662	WSP663	WSP664	WSP665	WSP666	WSP667	WSP668	WSP669	WSP670	WSP671	WSP672	WSP673	WSP674	WSP675	WSP676	WSP677	WSP678	WSP679	WSP680	WSP681	WSP682	WSP683	WSP684	WSP685	WSP686	WSP687	WSP688	WSP689	WSP690	WSP691	WSP692	WSP693	WSP694	WSP695	WSP696	WSP697	WSP698	WSP699	WSP700	WSP701	WSP702	WSP703	WSP704	WSP705	WSP706	WSP707	WSP708	WSP709	WSP710	WSP711	WSP712	WSP713	WSP714	WSP715	WSP716	WSP717	WSP718	WSP719	WSP720	WSP721	WSP722	WSP723	WSP724	WSP725	WSP726	WSP727	WSP728	WSP729	WSP730	WSP731	WSP732	WSP733	WSP734	WSP735	WSP736	WSP737	WSP738	WSP739	WSP740	WSP741	WSP742	WSP743	WSP744	WSP745	WSP746	WSP747	WSP748	WSP749	WSP750	WSP751	WSP752	WSP753	WSP754	WSP755	WSP756	WSP757	WSP758	WSP759	WSP760	WSP761	WSP762	WSP763	WSP764	WSP765	WSP766	WSP767	WSP768	WSP769	WSP770	WSP771	WSP772	WSP773	WSP774	WSP775	WSP776	WSP777	WSP778	WSP779	WSP780	WSP781	WSP782	WSP783	WSP784	WSP785	WSP786	WSP787	WSP788	WSP789	WSP790	WSP791	WSP792	WSP793	WSP794	WSP795	WSP796	WSP797	WSP798	WSP799	WSP800	WSP801	WSP802	WSP803	WSP804	WSP805	WSP806	WSP807	WSP808	WSP809	WSP810	WSP811	WSP812	WSP813	WSP814	WSP815	WSP816	WSP817	WSP818	WSP819	WSP820	WSP821	WSP822	WSP823	WSP824	WSP825	WSP826	WSP827	WSP828	WSP829	WSP830	WSP831	WSP832	WSP833	WSP834	WSP835	WSP836	WSP837	WSP838	WSP839	WSP840	WSP841	WSP842	WSP843	WSP844	WSP845	WSP846	WSP847	WSP848	WSP849	WSP850	WSP851	WSP852	WSP853	WSP854	WSP855	WSP856	WSP857	WSP858	WSP859	WSP860	WSP861	WSP862	WSP863	WSP864	WSP865	WSP866	WSP867	WSP868	WSP869	WSP870	WSP871	WSP872	WSP873	WSP874	WSP875	WSP876	WSP877	WSP878	WSP879	WSP880	WSP881	WSP882	WSP883	WSP884	WSP885	WSP886	WSP887	WSP888	WSP889	WSP890	WSP891	WSP892	WSP893	WSP894	WSP895	WSP896	WSP897	WSP898	WSP899	WSP900	WSP901	WSP902	WSP903	WSP904	WSP905	WSP906	WSP907	WSP908	WSP909	WSP910	WSP911	WSP912	WSP913	WSP914	WSP915	WSP916	WSP917	WSP918	WSP919	WSP920	WSP921	WSP922	WSP923	WSP924	WSP925	WSP926	WSP927	WSP928	WSP929	WSP930	WSP931	WSP932	WSP933	WSP934	WSP935	WSP936	WSP937	WSP938	WSP939	WSP940	WSP941	WSP942	WSP943	WSP944	WSP945	WSP946	WSP947	WSP948	WSP949	WSP950	WSP951	WSP952	WSP953	WSP954	WSP955	WSP956	WSP957	WSP958	WSP959	WSP960	WSP961	WSP962	WSP963	WSP964	WSP965	WSP966	WSP967	WSP968	WSP969	WSP970	WSP971	WSP972	WSP973	WSP974	WSP975	WSP976	WSP977	WSP978	WSP979	WSP980	WSP981	WSP982	WSP983	WSP984	WSP985	WSP986	WSP987	WSP988	WSP989	WSP990	WSP991	WSP992	WSP993	WSP994	WSP995	WSP996	WSP997	WSP998	WSP999	WSP1000	WSP1001	WSP1002	WSP1003	WSP1004	WSP1005	WSP1006	WSP1007	WSP1008	WSP1009	WSP1010	WSP1011	WSP1012	WSP1013	WSP1014	WSP1015	WSP1016	WSP1017	WSP1018	WSP1019	WSP1020	WSP1021	WSP1022	WSP1023	WSP1024	WSP1025	WSP1026	WSP1027	WSP1028	WSP1029	WSP1030	WSP1031	WSP1032	WSP1033	WSP1034	WSP1035	WSP1036	WSP1037	WSP1038	WSP1039	WSP1040	WSP1041	WSP1042	WSP1043	WSP1044	WSP1045	WSP1046	WSP1047	WSP1048	WSP1049	WSP1050	WSP1051	WSP1052	WSP1053	WSP1054	WSP1055	WSP1056	WSP1057	WSP1058	WSP1059	WSP1060	WSP1061	WSP1062	WSP1063	WSP1064	WSP1065	WSP1066	WSP1067	WSP1068	WSP1069	WSP1070	WSP1071	WSP1072	WSP1073	WSP1074	WSP1075	WSP1076	WSP1077	WSP1078	WSP1079	WSP1080	WSP1081	WSP1082	WSP1083	WSP1084	WSP1085	WSP1086	WSP1087	WSP1088	WSP1089	WSP1090	WSP1091	WSP1092	WSP1093	WSP1094	WSP1095	WSP1096	WSP1097	WSP1098	WSP1099	WSP1100	WSP1101	WSP1102	WSP1103	WSP1104	WSP1105	WSP1106	WSP1107	WSP1108	WSP1109	WSP1110	WSP1111	WSP1112	WSP1113	WSP1114	WSP1115	WSP1116	WSP1117	WSP1118	WSP1119	WSP1120	WSP1121	WSP1122	WSP1123	WSP1124	WSP1125	WSP1126	WSP1127	WSP1128	WSP1129	WSP1130	WSP1131	WSP1132	WSP1133	WSP1134	WSP1135	WSP1136	WSP1137	WSP1138	WSP1139	WSP1140	WSP1141	WSP1142	WSP1143	WSP1144	WSP1145	WSP1146	WSP1147	WSP1148	WSP1149	WSP1150	WSP1151	WSP1152	WSP1153	WSP1154	WSP1155	WSP1156	WSP1157	WSP1158	WSP1159	WSP1160	WSP1161	WSP1162	WSP1163	WSP1164	WSP1165	WSP1166	WSP1167	WSP1168	WSP1169	WSP1170	WSP1171	WSP1172	WSP1173	WSP1174	WSP1175	WSP1176	WSP1177	WSP1178	WSP1179	WSP1180	WSP1181	WSP1182	WSP1183	WSP1184	WSP1185	WSP1186	WSP1187	WSP1188	WSP1189	WSP1190	WSP1191	WSP1192	WSP1193	WSP1194	WSP1195	WSP1196	WSP1197	WSP1198	WSP1199	WSP1200	WSP1201	WSP1202	WSP1203	WSP1204	WSP1205	WSP1206	WSP1207	WSP1208	WSP1209	WSP1210	WSP1211	WSP1212	WSP1213	WSP1214	WSP1215	WSP1216	WSP1217	WSP12
--------------	-------	---------	-----------	------------	------------	-----	------------------	------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	-------



[illegible]

Trassenabschnitt		Ordnung	Prozess	GS-Region/ Stützstellen	Zuordnung	Art	Materialpositionierung		GRP-gesamt kg CO2 eq	WDP m³ depm³	PERNT MJ	PER1 MJ	SM kg	ATAS m³	HTF-C kg	HTF-H kg	AP m³	PM m³	SOP m³	GRP-gesamt kg CO2 eq	WDP m³ depm³	PERNT MJ	PER1 MJ	SM kg	ATAS m³	HTF-C kg	HTF-H kg	AP m³	PM m³	SOP m³
EQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ausbruch																														
Kante + Strasse																														
Verteilt	Sprengvortrieb	Stahlschalung Wasser Sprungpfahl Zunder Dübel Schmalzschiff Strom	Zwischensumme																											
Baggervortrieb	Dübel Schmalzschiff Strom	Zwischensumme																												
Schützen	Dübel Schmalzschiff	Zwischensumme																												
Versorgung	Bewehrung Licht	Zwischensumme																												
Befe-Sohle																														
Verteilt	Sprengvortrieb	Stahlschalung Wasser Sprungpfahl Zunder Dübel Schmalzschiff Strom	Zwischensumme																											
Baggervortrieb	Dübel Schmalzschiff Strom	Zwischensumme																												
Schützen	Dübel Schmalzschiff	Zwischensumme																												
Versorgung	Bewehrung Licht	Zwischensumme																												
Stützstellen																														
Bewehrung Spritzbeton	Ma 8500 bis 4,5 kg/m², Lsgp. o. Bogen	Stahl Dübel Schmidt Strom	Zwischensumme																											
Ma 8500 bis 4,5 kg/m², Lsgp.	Stahl Dübel Schmidt Strom	Zwischensumme																												
Ma 8500 bis 3,1 kg/m², Ortsbr.	Stahl Stahl-Reinigungs-Depotierung Schmidt Strom	Zwischensumme																												
Ma 8500 bis 4,5 kg/m², Spß80	Stahl Dübel Schmidt Strom	Zwischensumme																												
Bögen	Stahl Dübel Schmidt Strom	Zwischensumme																												
Spritzbeton	SpC Frisch. Kämpfe. Unter dr-25 cm im B.W.	Dübel Schmidt Strom Spritzbetonmenge Wasser Beschleuniger Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) - Recycling/Depotierung	Zwischensumme																											
SpC Bohle. dr-25 cm im B.W.	Dübel Schmidt Strom Spritzbetonmenge Wasser Beschleuniger Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) - Recycling/Depotierung	Zwischensumme																												
SpC zum Verfüllen	Dübel Schmidt Strom Spritzbetonmenge Wasser Beschleuniger Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) Spritzbetonmenge (Rückspalt, Verlust) - Recycling/Depotierung	Zwischensumme																												
Anker	Selbstbohrtanker 250 kN	Anker Bohrstift Stahlschalung Dübel Schmidt Strom Bohrschlamm Bohrsch																												

Statement zur Verwendung künstlicher Intelligenz

Für das Verfassen dieser Masterarbeit wurden die in der folgenden Tabelle angeführten KI-Werkzeuge verwendet. Die KI-generierten Inhalte wurden von mir geprüft und ich übernehme die volle Verantwortung für alle Inhalte der vorliegenden Arbeit.

Tabelle zur Angabe der Verwendung von KI-Werkzeugen:

KI-Werkzeug	Wie verwendet	Qualitätssicherung / Restrisiko
DeepL	Übersetzung von Absätzen im Abstract	Es wurden nur Texte übernommen, die mir bekannt und klar waren.
DeepL	Übersetzung von englischsprachigen Quellen für ein besseres Verständnis und Zitate	Alle technischen Fachbegriffe, sofern notwendig oder vorhanden, wurden eigenständig und sinngemäß in die deutsche Sprache adaptiert.
ChatGPT / GPT5.3 Gemini / Gemini 3	Ideensammlung Einleitung und Grundlagenkapitel	Die finalen Formulierungen wurden nach der Inspiration eigenständig entwickelt und kritisch reflektiert.
ChatGPT / GPT5.3 Gemini / Gemini 3	Strukturanpassung nach eigenständigem Input für klare Zusammenhänge	Die strukturellen Anpassungen wurden kritisch hinterfragt und nur situativ nach der Kapitelvollendung verwendet.
ChatGPT / GPT5.3 Gemini / Gemini 3	Rechtschreib- und Grammatikprüfung, sowie sprachliche Glättung	Aussagen wurden auf ihre Notwendigkeit und Korrektheit geprüft und gegebenenfalls angepasst. Alle Anpassungen wurden stilistisch angepasst und entsprechen meiner eigenen sprachlichen Intention.
ChatGPT / GPT5.3	KI-gestützte Adaptierung bestehender lizenzfreier Grafiken	Die verwendeten Ausgangsgrafiken wurden unter Beachtung der jeweiligen Lizenzbedingungen ausgewählt. Sämtliche adaptierten Bildinhalte wurden eigenständig inhaltlich geprüft.

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Magister-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation eingereicht.

Innsbruck am

.....

Felix Noldin, BSc