

Diplomarbeit

Nachhaltigkeit im Tunnelbau – Einsatzpotential des ressourceneffizienten Tübbings im maschinellen Tunnelbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Sustainability in tunnelling – application potential of the resource-efficient tubing in mechanised tunnelling

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieurin

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Astrid Diana Bischofberger, BSc

Matr.Nr.: 11770898

Betreuung: Univ.Prof. Dr.-Ing. **Frank Lulei**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Alexander Bender**, BSc
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft
Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/235-1, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Jänner 2024

Danksagung

An erster Stelle der Danksagung steht meine Großmutter Lydia. Die Sommer, die ich gemeinsam mit dir auf der Alpe verbrachte, gehören zu den prägendsten Zeiten meines bisherigen Lebens. Von dir habe ich mehr gelernt, als ich je von einem Menschen gelernt habe und lernen werde.

Weiter möchte ich mich bei meinen Eltern, Karin und Markus, bedanken. Nur durch euch war mein Studium in dieser Art und Weise möglich. Eine große Unterstützung während der gesamten Arbeit war mir mein Freund Josef. Die langen Gespräche mit dir und deine gewieften Vorschläge waren während der Bearbeitung immer wie Zunder für neue Ideen.

Auf Seiten der Universität bedanke ich mich bei meinem Betreuer Alexander Bender. Danke, Alex, dass du mich zu jedem Zeitpunkt der Arbeit in meinem Tun unterstützt und bestätigt hast. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.Ing. Frank Lulei, ohne dessen couragierte Übernahme des Instituts diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Die große Expertise seitens der Kollegen bei der STRABAG und jenen des Instituts für Tragkonstruktionen war für die Arbeit essentiell. Ohne ihr Mitwirken wäre die Qualität und Aussagekraft nicht jene, die nun vorliegt.

Zuletzt möchte ich mich bei all den Menschen bedanken, die sich für Klima und Umwelt engagieren. Nach der Bearbeitung dieser Arbeit wird mir noch klarer, wie aussichtslos und zermürend das Beschäftigen mit diesem Thema manchmal sein kann. Umso wichtiger ist es, dass es Menschen gibt, die nicht die Verantwortung von sich wegschieben, sondern das Problem mit vollem Einsatz angehen.

Danke!

Kurzfassung

Schlagwörter: Maschineller Tunnelbau, Tübbingausbau, Ökobilanz, CO₂-Emissionen

Aufgrund der zunehmenden Ressourcenknappheit und der Notwendigkeit, die gesteckten Klimaziele zu erreichen, wächst der Druck auf die Tunnelbranche, nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Der Begriff der Nachhaltigkeit spaltet sich dabei in die drei Ebenen der Ökologie, Ökonomie und des Sozialen auf. Für die ganzheitliche Erfassung eines Bauwerks stehen für jeden dieser Aspekte Bewertungs- beziehungsweise (bzw.) Quantifizierungsinstrumente zur Verfügung. Besonderes Augenmerk wird auf die Ökobilanzierung gelegt. Sie dient der Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines Bauwerks auf seine Umwelt. Dies ist für die Baubranche in Österreich von besonderer Bedeutung, da die Produktion von Baumaterialien einen erheblichen Teil der Treibhausgas-Emissionen im Land ausmacht. Durch die Verknüpfung Europas und die fortschreitende Urbanisierung steigt der Bedarf an Infrastrukturbauwerken. Besondere Knotenpunkte bilden hierbei Tunnelbauwerke. Je nach Anforderungen werden diese in konventioneller oder maschineller Bauweise vorgetrieben. Zwar unterscheiden sich diese Methoden in ihren Arbeitsschritten- und -abfolgen grundlegend, dennoch eint sie die Tatsache, dass es strikte Rahmenbedingungen einzuhalten gibt. Die Integration neuer Maßnahmen in diese bestehenden Systeme stellt eine Herausforderung dar. Trotzdem gibt es bereits eine Vielzahl von innovativen Ansätzen, welche Nachhaltigkeit und Tunnelbau verbinden.

Die Forschungsk Kooperation der TU Wien mit der STRABAG AG Tunnelling Division reiht sich in diese Maßnahmen ein. Durch diese Zusammenarbeit entstand die Idee des ressourceneffizienten Tübbings für den maschinellen Tunnelbau. Die Basis für das Projekt ist eine zusätzliche Bewehrung der hoch belasteten Längsfugen, die zu einer Querschnittsreduktion der Bauteile führt. In beanspruchten Bereichen des Tunnels, wie z.B. in Störzonen, werden die verstärkten Tübbinge eingebaut. In den Regelbereichen entfällt die Zusatzbewehrung. Dadurch ergeben sich ökologische Vorteile gegenüber herkömmlichen Ausbauten. Um diese zu quantifizieren, wird eine Ökobilanz erstellt.

Zur Ausarbeitung potentieller ökologischer Einsparungen, wurden sieben Tunnelquerschnitte miteinander verglichen. Diese unterscheiden sich anhand von Geometrie und Bewehrung. Zur Betrachtung standen die Auswirkungen der Ausbauten auf die CO₂-Äquivalente-Emissionen sowie den benötigten Energie Einsatz. Für den Europäischen Raum ergibt sich unter den Varianten eine Spannweite von 11,53 bis 14,99 t CO₂-Äq./m Tunnel. Bei einer Betrachtung der DACH-Region zeigen sich zusätzliche Unterschiede. So schneiden Österreich und die Schweiz im Vergleich zu Europa deutlich besser ab. Besonders der Energiebedarf während der Errichtung des Bauwerks hat sich hierbei als entscheidender Faktor in der Bilanzierung hervorgetan. Um die Ergebnisse der Ökobilanz in einen baupraktischen Kontext zu setzen, wird ein Beispielprojekt mit den Querschnittsvarianten untersucht. Dabei wird deutlich, dass sich große ökologische Einsparungen durch den ressourceneffizienten Tübbing erzielen lassen.

Abstract

Keywords: mechanical tunnel construction, tunnel lining, tubbing, life-cycle-assessment, CO₂-Emissions

Due to the increasing scarcity of resources and the need to achieve the climate targets that have been set, the pressure on the tunnelling industry to develop sustainable solutions is growing. The concept of sustainability is divided into the three levels of ecology, economy and social aspects. Assessment and quantification tools are available for each of these aspects for the holistic analysis of a structure. Particular attention is paid to life cycle assessment. It is used to evaluate the ecological impact of a building on its environment. This is of particular importance for the construction industry in Austria, as the production of building materials accounts for a significant share of greenhouse gas emissions in the country. The demand for infrastructure structures is increasing due to the linking of Europe and increasing urbanisation. Tunnels are particularly important in this context. Depending on the requirements, these are driven using conventional or mechanised construction methods. Although these methods differ fundamentally in their work steps and processes, they are united by the fact that strict framework conditions must be met. Integrating new measures into these existing systems is a challenge. Nevertheless, there are already a number of innovative approaches that combine sustainability and tunnelling.

The research cooperation between the TU Vienna and the STRABAG AG Tunnelling Division is part of these efforts. This collaboration gave rise to the idea of resource-efficient tubbing segments for mechanised tunnelling. The basis for the project is additional reinforcement of the highly stressed longitudinal joints, which leads to a reduction in the cross-section of the components. The reinforced segments are installed in heavily stressed areas of the tunnel, such as in disturbed zones. Additional reinforcement is not required in the regular areas. This results in ecological advantages compared to conventional linings. In order to quantify these benefits, a life cycle assessment is performed.

To work out potential ecological savings, seven tunnel cross-sections were compared with each other. These differ in terms of geometry and reinforcement. The effects of the tunnel extensions on CO₂ emissions and the required energy consumption were analysed. For the European region, there is a range of 11.53 to 14.99 t CO₂-eq./m of tunnel among the variations. An analysis of the DACH region reveals additional differences. Austria and Switzerland perform significantly better compared to Europe. Energy requirements in particular have emerged as a decisive factor in the assessment. In order to place the results of the life cycle assessment in a practical construction context, a theoretical project with the cross-sectional variants is analysed. It becomes clear that large ecological savings can be achieved through resource-efficient tubbing segments. In view of the increasing importance of sustainability in all areas of the construction industry, there is potential for the use of alternatively reinforced segments.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Motivation	11
1.2	Forschungsfragen	12
1.3	Forschungsmethodik	12
1.4	Begriffsbestimmungen	13
2	Grundlagen zu den Themen Nachhaltigkeit und Tunnelbau	17
2.1	Klimawandel und Klimaziele	17
2.2	Der Begriff der Nachhaltigkeit	18
2.2.1	Ökologische Nachhaltigkeit und Life-Cycle-Assessment	19
2.2.2	Ökonomische Nachhaltigkeit	20
2.2.3	Soziale Nachhaltigkeit	21
2.3	Tunnelbau	24
2.3.1	Tunnelbauweisen	26
2.3.2	Maschinelles Tunnelbau	29
2.4	Ansätze der nachhaltigen Gestaltung des Tunnelbaus	33
2.4.1	Lebenszyklusphasen	33
2.4.2	Planungsphase (Modul A0):	34
2.4.3	Herstellungsphase (Modul A1–A3)	36
2.4.4	Errichtungsphase (Modul A4–A5)	38
2.4.5	Nutzungsphase (Modul B1–B8)	40
2.4.6	Entsorgungsphase (Modul C1–C4)	42
2.4.7	Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (Modul D) und sonstige Maßnahmen	42
2.5	Maßnahmen im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit	47
2.6	Zusammenfassung	48
3	Tunnelquerschnitt mit ressourceneffizientem Tübbing	51
3.1	Tübbinge	51
3.1.1	Funktionen	52
3.1.2	Auskleidungssysteme und Geometrie	52
3.1.3	Einwirkungen und Bemessung	54
3.1.4	Beton und Bewehrung	54
3.1.5	Fugen	58
3.1.6	Dichtheitsfunktion	60
3.1.7	Produktion und Einbau	61
3.2	Ringspalt	63
3.3	Forschungsprojekt Ressourceneffizienter Tübbing (RET)	65
3.3.1	Spezifikationen des Ressourceneffizienter Tübbing (RET)	65
3.3.2	Ökologische Vorteile des RET	66
3.4	Zusammenfassung	69

4	Ökobilanzierung und Vergleich	71
4.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	71
4.1.1	Ziel der Studie	71
4.1.2	Untersuchungsrahmen der Studie und funktionelle Einheit	72
4.1.3	Systemgrenzen	77
4.2	Sachbilanz	81
4.2.1	Tübbing – Beton	81
4.2.2	Tübbing – Bewehrung	82
4.2.3	Ringspalt	83
4.2.4	Tunnelvortriebsanlage	83
4.3	Wirkungsabschätzung	84
4.3.1	Wirkungskategorien	84
4.3.2	Sensitivitätsanalyse	85
4.4	Auswertung und Ergebnisse	88
4.4.1	Wirkungskategorie Klimawandel – Allgemein	88
4.4.2	Wirkungskategorie Klimawandel – Tunnelquerschnittsvarianten	91
4.4.3	Wirkungskategorie Ressourceneinsatz	92
4.4.4	Sensitivitätsprüfung	96
4.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	100
5	Einsatzpotential für den ressourceneffizienten Tübbing	103
5.1	Ökologisches Einsatzpotential anhand eines Projektes	103
5.1.1	Untersuchte Tunnelquerschnitte	103
5.1.2	Darlegung der Ergebnisse	104
5.2	Diskussion des Einsatzpotentials	109
5.2.1	Baubetriebliche Aspekte	109
5.2.2	Nachhaltigkeitsaspekte	109
5.2.3	Ökonomische Aspekte	109
6	Zusammenfassung und Ausblick	111
6.1	Beantwortung der Forschungsfragen	113
6.2	Ausblick	117
A	Berechnungen zur Sachbilanz	133
B	Angesetzte Werte – Sensitivitätsanalyse	135

Kapitel 1

Einleitung

Das Thema Tunnelbau zeigt sich in Österreich mit großer Präsenz. Mehrere sich in Bau befindliche Jahrhundertprojekte tragen dazu bei, Österreich zukünftig lokal, national und international noch besser zu vernetzen. Neben dem Schwerpunkt Tunnelbau hat in den letzten Jahren das Thema Nachhaltigkeit am Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft Einzug gehalten. Zusätzlich zur monetären und terminlichen Optimierung wird hier die Forschung immer mehr in Richtung eines ganzheitlich ressourcensparenden Bauprozesses gelenkt. Das wird dann relevant, wenn bedacht wird, dass das Bauwesen von Natur aus ein ressourcenintensiver Wirtschaftszweig ist. Da die Abhängigkeit von natürlichen Ressourcen immer weiter steigt, und die Verfügbarkeit immer geringer wird, stellt sich dem Tunnelbau von Morgen die Frage, wie diesem Dilemma entgegnet werden kann. Besonders der maschinelle Tunnelbau ist aufgrund seiner bautechnisch bedingten unflexiblen Querschnittsform empfindlich gegenüber systembedingter Überdimensionierung und daraus resultierendem Ressourcenverbrauch. Das ist der Tatsache geschuldet, dass die Dimensionierung des Tübbingausbaus auf die Störzonen entlang eines Tunnels ausgelegt ist. Zonen, in denen kein oder nur ein schlankerer Ausbau ausreichend wäre, müssen trotzdem mit dem gleichen massiven Tübbing ausgekleidet werden. Der Ressourceneffizienter Tübbing (RET) stellt eine mögliche Lösung dieses Problems dar.

Zur Klärung, welches Einsatzpotential der RET hat und welche Emissionen und Ressourcen gespart werden können, stehen am Anfang der Arbeit die Grundlagen für die Themen Nachhaltigkeit und Tunnelbau. Aufbauend darauf wird gezeigt, welche Maßnahmen schon *heute* für den nachhaltigen Tunnelbau im Einsatz sind. Kernstück vorliegender Diplomarbeit bildet die Analyse des RETs in Hinblick auf die Einsparungsmöglichkeiten von CO₂-Emissionen. Dafür wurde für sieben Tunnelquerschnitte, darunter solche mit RET-Ausbau, eine Ökobilanz erstellt. Der Abschnitt von einem Meter Tunnel stellt hierbei die Vergleichsbasis dar. Um zu überprüfen, welche Auswirkungen der ressourceneffiziente Tübbing auf der Projektebene bewirkt, werden die Ergebnisse der Bilanz auf fiktive Tunnel umgelegt. Damit werden ökologische Einsatzpotentiale identifiziert. Ebenfalls die anderen Aspekte der Nachhaltigkeit – Ökonomie und Soziales – stehen zur Diskussion.

1.1 Motivation

Mit Blick auf die Welt stellt sich mir als angehende Ingenieurin¹ die Frage, wie das weltweit benötigte Bauvolumen zur Schaffung einer chancengleichen Umwelt für Menschen angesichts des immer lauter werdenden Rufs nach Ressourcenknappheit sowie Umwelt- und Klimakrise unter einen Hut gebracht werden kann. Das dient als Motivation innovative Lösungen zu entwickeln. Dabei gliedert sich der RET in den Lösungsansatz ein. Besonders interessant ist für mich die Untersuchung, wie ein ressourceneffizienter Ausbau die Nachhaltigkeit beeinflusst, insbesondere in Bezug auf das klimaschädliche Treibhausgas CO₂. Die Aufteilung der Emissionen auf die

¹In dieser Arbeit werden aus Gründen der besseren Lesbarkeit geschlechtsspezifische Formulierungen vermieden. Soweit personenbezogene Bezeichnungen verwendet werden, gelten sie für alle Geschlechter gleichermaßen.

Bestandteile eines Tübbings – Stahl und Beton – ist ein weiterer spannender Punkt. Es ist zu prüfen, ob durch die zusätzliche Bewehrung eine Verlagerung der CO₂-Emissionen vom Beton auf den Stahl stattfindet oder ob insgesamt eine ökologische Verbesserung erzielt wird. Neben dem RET besteht meinerseits großes Interesse daran, wie sich Nachhaltigkeit und Tunnelbau vereinen lassen. Welche Ideen existieren bereits, um bestehende Strukturen zu innovieren und optimieren? Wie sieht die Zukunft des Tunnelbaus aus? Diese ganzheitliche Betrachtung der Entwicklungen bildet den Antrieb dieser Arbeit.

1.2 Forschungsfragen

Gemeinsam mit Herrn Dipl.-Ing. Alexander Bender (Betreuer – TU Wien) wurden am Anfang der Arbeit vier Forschungsfragen formuliert, die am Ende der Arbeit beantwortet werden.

1. Durch welche Maßnahmen können die Emissionen des Tunnelbaus mit heutigem Stand der Technik bereits reduziert werden?
2. Welche Bestandteile haben den größten GWP-Anteil bei einem herkömmlichen Tunnelquerschnitt im kontinuierlichen Vortrieb?
3. Inwiefern wirkt sich die ressourceneffiziente Bauweise des RET auf die Ökobilanz des Tunnelquerschnitts aus?
4. Wie gestaltet sich das Einsatzpotential des ressourceneffizienten Tübbing im Tunnelbau von Morgen?

1.3 Forschungsmethodik

Zu Beginn der Arbeit wurde eine umfangreiche Literaturanalyse durchgeführt. Diese hatte einerseits zum Ziel, die Grundlagen zu den Themen Nachhaltigkeit und Tunnelbau zu erfassen und andererseits eine Orientierung zu geben, welche Maßnahmen bereits heute zur Reduktion von Emissionen im Tunnelbau eingesetzt werden. Die daraus gewonnenen Ergebnisse werden den Lebenszyklusphasen bzw. Modulen des Tunnelbauwerks zugeordnet und diskutiert. In weiterer Folge konzentriert sich die Bearbeitung auf das Tunnelausbauelement *Tübbing*. Aufbauend auf den Grundlagen werden die Eigenschaften von RET im Vergleich zu konventionellen Tunnelbauweisen dargestellt. Um die ökologischen Vorteile des Systems weiter herauszuarbeiten, wird eine Ökobilanz nach *ÖNORM EN ISO 14040* [72] durchgeführt. Es werden sieben Tunnelquerschnitte betrachtet, die sich in Geometrie und Bewehrung unterscheiden. In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden die konkreten Eingangsdaten für die Variantenanalyse festgelegt. Für diese wurden im weiteren Verlauf Systemgrenzen definiert, die klar angeben, was in der Ökobilanz betrachtet und was vernachlässigt wird. Die so identifizierten Prozesse und Flüsse weisen für die verwendete Datenbank einen großen Wertebereich auf. In der Sensitivitätsanalyse werden die verwendeten Datensätze statistisch aufbereitet. Durch Eingabe dieser in die Ökobilanzsoftware *openLCA* wird der Vergleich der Tunnelquerschnitte erstellt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die CO₂-Emissionen gelegt, die während des Lebenszyklus der Bauwerke emittiert werden. Diese beziehen sich auf die betrachtete Einheit von 1 m Tunnel. Da für zukünftige Anwendungen des RETs die gesamte Projektebene bewertet werden soll, werden im nächsten Arbeitsschritt 5 Tunnel mit den bilanzierten Tunnelquerschnitten untersucht. Dazu müssen Annahmen über die Länge des Tunnels, die Störzonen sowie den Regelbereich getroffen werden. Anschließend erfolgt eine Berechnung des ökologischen Optimierungspotenzials. Daraus ergeben sich die Ergebnisse für

das betrachtete Projekt. Diese fließen in die Diskussion der Einsatzmöglichkeiten von alternativ bewehrten Tübbing ein. Dabei wird erörtert, wie sich das System in die heutigen Bauprozesse einfügt und welche Vorteile sich für weitere Bereiche des Bauwesens, wie z.B. die Vergabe von Bauleistungen, ergeben.

1.4 Begriffsbestimmungen

Im Folgenden werden Begriffe zu den Themen Nachhaltigkeit und Tunnelbau definiert. Das bildet den Grundstock für das einheitliche Verständnis der Arbeit. Der Großteil angeführter Definitionen entspringt Normen oder einschlägiger Fachliteratur zu den betrachteten Bereichen:

Allokation: Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Prozesses zum untersuchten Produktsystem.²

Ausbau: Laut *ÖNORM B 2203-2* [65] wird unter dem Begriff die Stützung des Hohlraums zusammengefasst.³

Bohrdurchmesser: Dieser Begriff beschreibt den gebohrten Durchmesser des Tunnels beim maschinellen Vortrieb mit einer Tunnelvortriebsmaschine (TVM).^{1,4}

Chip: Chips sind 2 bis 3 cm große Splitterstücke des Gesteins, die durch das Anpressen des Bohrkopfes am Gebirge entstehen.⁴

CO₂-Äquivalente: CO₂-Äquivalente werden verwendet, um die Emissionen verschiedener Treibhausgase in einer gemeinsamen Einheit auszudrücken. Für diese Ökobilanz wird das Erderwärmungspotential mit dem Zeithorizont von 100 Jahren – das Global Warming Potential 100 – betrachtet.⁵

Konsistenzprüfung: Durch dieses Verfahren wird überprüft, ob getroffene Annahmen, gewählte Methoden und verwendete Daten über die Ökobilanz hinweg gleichartig sind. Ebenfalls Teil der Prüfung ist, ob die Ergebnisse den gesteckten Zielen der Bilanz entsprechen.²

Kritische Prüfung: Hierbei liegt der Fokus auf der Prüfung der Grundsätze, denen eine Ökobilanz entsprechen muss. Dies ist für eine nationale und internationale Vergleichbarkeit bedeutend.²

Lunker: Lunker sind Schadensbilder, die durch Lufteinschlüsse während der Tübbingproduktion entstehen. Sie befinden sich an der Oberfläche der Bauteile.⁶

Nachläufereinrichtung (NLE): Unter den Begriff Nachläufereinrichtung werden alle Einrichtungen zusammengefasst, die für den Betrieb der TVM notwendig sind. Darunter fallen Arbeitsbühnen, Ver- und Entsorgung sowie Geräte zur Einbringung des Ausbaus.⁷

Rohstoff: Unter diese Definition fällt jenes primäre und sekundäre Material, welches zur Herstellung eines Produktes verwendet wird.²

Sensitivitätsanalyse: Dieser Teil der Ökobilanz ist für die Beurteilung der Wirkung gewählter Daten und deren Einfluss auf die erhaltenen Ergebnisse verantwortlich.²

²Vgl. [72] *ÖNORM EN ISO 14040*: 2021-03-01, S. 11 ff.

³Vgl. [65] *ÖNORM B 2203-2*: 2005-01-01, S. 5 ff.

⁴Vgl. [36] Goger, S. 182

⁵[44] Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 22

⁶Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 3

⁷Vgl. [74] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 5

Stützmittel: Diese Elemente dienen den Stützungsmaßnahmen des Hohlraumes. Beispiele sind Anker, Stahlbögen, Spritzbeton und Bewehrung, geschlossene Stahlringe, Sohlfertigteile und Tübbinge.

Systemgrenze: Systemgrenzen geben klare Bedingungen vor, anhand derer entschieden wird, ob ein betrachteter Prozess in ein System fällt oder nicht.²

Tunnelvortriebsmaschine (TVM): Tunnelvortriebsmaschine sind Maschinen, die mit Bohrkopf und Schneiderad Material lösen. Die dafür benötigten Arbeitsschritte laufen kontinuierlich durch hubweises Vorschieben des Abbauwerkzeugs ab.^{1,4}

Vollständigkeitsprüfung: Dieses Verfahren dient zur Feststellung, ob die Informationen aus den Phasen einer Ökobilanz für die Ableitung von Schlussfolgerungen in Übereinstimmung mit der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sind.²

Wirkungsindikator: Durch die Wirkungsindikatoren werden die Einflüsse der Wirkungskategorien quantifizierbar.²

Wirkungskategorie: Dieser Überbegriff vereint Umweltthemen. Durch diese Zusammenfassung können sie konkreten Ergebnissen der Sachbilanz zugeschrieben werden.²

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modelling
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DSM	Doppelschildmaschine
EPD	Environmental Product Declaration
FDM	Finite Differenz Methode
FEM	Finite Elemente Methode
GWP	Global Warming Potential
KMUs	Klein- und Mittelunternehmen
KSM	Kombinationsschildmaschine
LCA	Life-Cycle-Assessment
LCC	Life-Cycle-Costing
MCA	Multi-Criteria Analysis
min.	mindestens
Mio.	Millionen
MSV	Multi Service Vehicle
NFRD	Non-Financial Reporting Directive
NLE	Nachläufereinrichtung
NÖT	Neue Österreichische Tunnelbauweise
RET	Ressourceneffizienter Tübbing
SDG	Sustainable Development Goals
SM	Schildmaschine
TBM	Tunnelbohrmaschine
THG	Treibhausgas

TQS Tunnelquerschnitt

TVA Tunnelvortriebsanlage

TVM Tunnelvortriebsmaschine

UVP Umweltverträglichkeitsprüfung

z.B. zum Beispiel

Kapitel 2

Grundlagen zu den Themen Nachhaltigkeit und Tunnelbau

Damit aufgearbeitet werden kann, wie Nachhaltigkeit und Tunnelbau zusammenspielen, müssen vorerst einige Grundlagen und Definitionen eingeführt werden. Beginnend mit den Auswirkungen des Klimawandels und den daraus entstandenen Klimazielen, wird nochmals die Relevanz des Themas dargelegt. Über die Begrifflichkeiten von Nachhaltigkeit und Tunnelbau wird ein Grundstock an Informationen für diese Arbeit geschaffen. Durch die angestellte Literaturanalyse werden Maßnahmen dargelegt, die bereits *heute* für einen nachhaltigeren Tunnelbau von Morgen im Einsatz sind.

2.1 Klimawandel und Klimaziele

Der vom Menschen verursachte Temperaturanstieg wird auf 0,2°C pro Jahrzehnt abgeschätzt. Manche Regionen, wie beispielsweise die Arktis, erfahren zwei- bis dreimal so hohe Werte.⁸ Verlust an Biodiversität, Wasserknappheit, Landverlust, Klimaflüchtlinge, Veränderung von Ökosystemen und Extremwetterereignisse sind nur einige Folgen dieser Entwicklungen.^{8, 9} Um die Auswirkungen so gering wie möglich zu halten, müssen die anthropogenen Emissionen reduziert werden. So rechnen zahlreiche Modelle damit, dass um die Klimaerwärmung auf 1,5°C zu begrenzen, bis 2025 die CO₂-Emissionen ihren Höhepunkt erreichen und bis 2030 um mindestens (min.) 45% verhindert werden müssen.^{10, 11}

Damit diese notwendigen Entwicklungen verpflichtenden Charakter bekommen, gilt seit 2016 das Pariser Abkommen. Darin fordert das *Intergovernmental Panel on Climate Change* [44] eine klare Unterschreitung von 2°C Temperaturanstieg bis 2050. Dies geschieht, indem alle 5 Jahre strengere Maßnahmen in Richtung Klimaneutralität gesetzt werden. Außerdem müssen ab 2024 alle Mitgliedsstaaten Auskunft darüber leisten, inwiefern sie zur Reduktion der Treibhausgase beitragen bzw. wie sie ihre Resilienz gegenüber dem Klimawandel stärken.

Wie sich in der Praxis zeigt, kommt die Dringlichkeit dieser Forderungen oft nicht bei den Staaten an. Zahlreiche Artikel und Analysen weisen darauf hin, dass die derzeitigen Maßnahmen nicht dazu ausreichen, die gesetzten Ziele zu erreichen. Manche Quellen gehen sogar von einer Steigerung um bis zu 3°C bis 2050 aus.^{9, 12, 13} Neben der Reduktion der Emissionen steht die Adaption an die Klimaänderungen zur Option. In diesem Szenario spielt die Baubranche mit der Schaffung klimaresilienter Infrastruktur eine entscheidende Rolle. Das wird ebenfalls in den 17 nachhaltigen Entwicklungszielen, den sogenannten Sustainable Development Goals (SDG),

⁸Vgl. [44] Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 8

⁹Vgl. [103] Waaghals, Pereira et al., S. 43 f

¹⁰Vgl. [96] United Nations, S. 1

¹¹Vgl. [44] Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 16

¹²Vgl. [33] Globescan, S. 11

¹³Vgl. [95] United Nations, S. 54

der Agenda 2030 gefordert. Diese Ziele sind in Abb. 2.1 zu sehen. Sie verlangen unter anderem lebenswerte Städte bzw. Lebensräume und zukunftsfähige Industrie und Infrastruktur.¹⁴ Neben den SDGs 9 und 11, die direkt mit dem Bauwesen in Verbindung stehen, sind die restlichen Ziele ebenfalls von Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung des Bausektors. Was *nachhaltig* in diesem Zusammenhang bedeutet, wird im folgenden Kapitel erläutert.



Abb. 2.1: Nachhaltige Entwicklungsziele (SDGs) der Agenda 2030 (Quelle: Bundeskanzleramt [12])

2.2 Der Begriff der Nachhaltigkeit

Krisen sind der Menschheit nichts Neues, genau so wenig wie Ressourcen-Knappheiten. So ist die Ersterwähnung des Begriffs *Nachhaltigkeit* ursprünglich von Carlowitz [13] aus dem Jahr 1713 in Zuge einer Holz-Knappheit gefallen. In seiner Festschrift *Sylvicultura oeconomica* schlägt Carlowitz [13] eine Forstwirtschaft vor, in der nur so viel Holz geschlagen werden darf, wie im gleichen Maße nachwächst. Dieses Prinzip lässt sich auf aktuelle ökologische Problemstellungen wie Wasser- und Landknappheit ummünzen. Über die Jahre hat sich der Begriff jedoch weiterentwickelt. Zu der ökologischen Betrachtung kamen Mitte der 1990er Jahre die ökonomische und soziale Komponente hinzu. Dieses „Drei-Säulen-Modell“ bildet die Grundlage zahlreicher Nachhaltigkeitsmodelle für Wirtschaft, Politik und Gesellschaft.¹⁵ Ein prominentes Beispiel ist die von den Vereinten Nationen 1992 abgehaltene *Agenda 21*, in der die größten Herausforderungen des 21. Jahrhundert diskutiert und mögliche Lösungsansätze dargelegt wurden.¹⁶ Auf der Agenda stand unter anderem die Entwicklung einer nachhaltigen Bauindustrie. Kernthemen einer solchen sind die Stärkung von heimischen Materialien und lokal verfügbaren Ressourcen, die Anpassung von Standards und Regelwerken zur Förderung energieeffizienter Technologien, die Anpassung von Flächenwidmungsplänen an ökologisch empfindsame Gebiete und die Schaffung des Zugangs an Know-How von leistbaren Bauweisen und Materialien an die gesamte Bevölkerung.¹⁷

¹⁴Vgl. [95] United Nations, S. 44 ff.

¹⁵Vgl. [49] Kleine, S. 5

¹⁶Vgl. [94] United Nations, S. 3

¹⁷Vgl. [94] United Nations, S. 59 ff.

Die Komplexität des Themas macht die Isolierung eines einzigen Themenbereichs schwierig, denn genauso wenig wie die drei Säulen unabhängig voneinander zu betrachten sind, ist eine klare Abgrenzung des Bauwesens in diesem Zusammenhang möglich. Dennoch wird im Folgenden versucht, die für das Bauwesen besonders relevanten Aspekte herauszuarbeiten. Schwerpunkt ist neben der Definition die bautechnisch relevante Quantifizierung der Säulen. Hierfür stehen aus heutiger Sicht drei Werkzeuge zur Verfügung:¹⁸

- Life-Cycle-Assessment (LCA)
- Life-Cycle-Costing (LCC)
- Multi-Criteria Analysis (MCA)

Um zu erklären, wie die einzelnen Bewertungsmethoden funktionieren, wird in den kommenden Kapiteln auf ihren Aufbau eingegangen. Ein weiterer Punkt ist, wie die Nachhaltigkeit in der jeweiligen Systematik abgebildet wird. Schließlich stehen die Ergebnisse der Bewertungsmethoden und deren Auswirkungen auf Bautätigkeiten zur Diskussion.

2.2.1 Ökologische Nachhaltigkeit und Life-Cycle-Assessment

Laut Nowak bedeutet ökologische Nachhaltigkeit den „*weitsichtigen und rücksichtsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen*“ [56]. Die Baubranche ist prädestiniert für einen hohen Ressourcenverbrauch. Die Baumaterialien Stahl bzw. Eisen und Zement sind für 21,8% der österreichischen Treibhausgas (THG)-Emissionen verantwortlich. Es besteht somit großer Bedarf daran zu wissen, wie sich ein Bauwerk auf seine Umwelt auswirkt. Dabei reicht natürlich nicht nur die Ebene der eingesetzten Materialien aus. Vielmehr muss die Gesamtheit des Bauwerks über seinen ganzen Lebenszyklus betrachtet werden.

Eine LCA, auch Ökobilanz genannt, soll eine möglichst ganzheitliche, transparente und umweltbezogene Lebenswegbetrachtung eines Objektes sein. Die normative Grundlage dafür bietet die *ÖNORM EN ISO 14040* [72]. Sie beschreibt den grundsätzlichen Aufbau einer Ökobilanz. Diese gliedert sich in:¹⁹

Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens: Im ersten Teil werden Ziele, Zielgruppe, Systemgrenzen, und Anforderungen an die Datenqualität der Ökobilanz festgelegt. Ebenfalls zu bestimmen gilt es, wie genau es die betrachteten Aspekte zu analysieren gilt.

Sachbilanz: Die Sachbilanz dient der Datenerhebung, Datenberechnung und Allokation von Flüssen und Emissionen. Durch das Erlangen und Einarbeiten von Daten, während der Erstellung der Bilanz, läuft die Erstellung iterativ ab.

Wirkungsabschätzung: Zweck dieses Abschnittes ist die Beurteilung der Umweltwirkungen. Diese werden Anhand der Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Verknüpfung derer mit Umwelt-Indikatoren abgeschätzt. Durch diese Abschätzung können potentielle Wirkungen auf das System beurteilt werden.

Auswertung: Mit der letzten Phase der Ökobilanz werden Sachbilanz und Wirkungsabschätzung zusammengeführt. Es wird gezeigt, wie die erlangten Ergebnisse bzw. Erkenntnisse im Einklang mit den definierten Zielen stehen. Das kann mithilfe einer Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und bzw. oder Konsistenzprüfung geschehen. Auf Grundlage dessen, werden Empfehlungen abgegeben. Es gilt zu beachten, dass die Auswertung immer relativ zu betrachten ist und keine tatsächlichen Wirkungen widerspiegelt.

¹⁸Vgl. [42] Huymajer et al., S. 11

¹⁹Vgl. [72] ÖNORM EN ISO 14040: 2021-03-01, S. 21 ff.

Für standardisierte Vorgehensweisen in den einzelnen Phasen gibt die *ÖNORM EN ISO 14044* [73] Anforderungen und Anleitungen. In ihr sind konkrete Schritte zur Erstellung einer Ökobilanz gegeben. Es wird dennoch darauf verwiesen, dass die Ausarbeitung, je nach Untersuchungsgegenstand, stark variieren kann.²⁰

Der erstellte Bericht über die Ökobilanz ist kritisch zu überprüfen, sodass die Vergleichbarkeit auf nationaler und internationaler Ebene gegeben ist. Die wesentlichen Einsatzgebiete der Ergebnisse einer Ökobilanz sind die Verbesserung von Produkten, strategische Planung, politische Entscheidungsprozesse und Marketing.²¹ Ebenfalls dient sie dem ökologischen Vergleich von Baustoffen, Bauwerken oder anderen Bauleistungen.

Um die Ökobilanz quantifizierbar zu machen, werden Indikatoren und Parameter zur Bewertung der Wirkung von Baumaterialien bzw. Bauprodukten benötigt. Hersteller solcher Produkte sind dazu angehalten, eine sogenannte Environmental Product Declaration (EPD) zu erstellen. Grundlegende Regeln hierfür sind in der *ÖNORM EN 15804* [68] enthalten. Mithilfe der Indikatoren werden durch die erstellten Deklarationen Aussagen zu Umwelteinwirkungen, dem Energie- und Ressourceneinsatz, der Abfallkategorie und sonstigen Abgabeströmen getroffen. Für jede dieser Kategorien sind in Tab. 2.1 Beispiele der insgesamt 36 eingesetzten Indikatoren bzw. Parameter gegeben.²² Die Indikatoren der Umweltkategorie werden einer Wirkungskategorie zugewiesen. Die Parameter für Ressourceneinsatz, Abfall und Output-Flüsse dienen der Beschreibung der jeweiligen Kategorie.

Je nach Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens werden unterschiedliche Indikatoren für eine Ökobilanz herangezogen. Wie aus Huymajer et al. [42] hervorgeht, ist für das Bauwesen vor allem das Treibhauspotential, auch genannt Global Warming Potential (GWP) von Interesse. Die Einheit, in der das GWP gemessen bzw. bewertet wird, ist *kg CO₂-Äquivalente*. Der Indikator ist in Tab. 2.1 ersichtlich. Diese CO₂-Äquivalente dienen dazu, verschiedene Treibhausgase wie Kohlenstoffdioxid, Methan, Lachgas und fluorierte Gase in ihrer Auswirkung auf das Klima vergleichbar zu machen.²³

2.2.2 Ökonomische Nachhaltigkeit

Nowak beschreibt ökonomische Nachhaltigkeit als die „*Maximierung des ökonomischen Ertrags bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der benötigten Eingangsressourcen* [57]“. Die Optimierung der Kosten eines Infrastrukturbauwerkes über die gesamte Lebensdauer ist von großer Bedeutung. Bei der langen Nutzungsdauern von Tunnel, kommt dem Betrieb solcher Bauwerke besondere Bedeutung zu.²⁴ Ein Aspekt, den es speziell bei Tunnelbauprojekten im Hinterkopf zu behalten gilt, ist die makroskopische Auswirkung auf die Wirtschaft. So sollte man nicht nur die projektgebundenen Kosten betrachten, sondern zusätzlich den nachhaltigen Effekt des Projektes auf eine Volkswirtschaft abschätzen.²⁵ Die Lebenszykluskosten werden mit der Methode der LCC ermittelt. Hierbei werden die Errichtungskosten laut *ÖNORM B 1801-1* [62] und die Folgekosten laut *ÖNORM B 1801-2* [63] den drei übergeordneten Lebenszyklusphasen zugeschrieben. Diese gliedern sich laut *ÖNORM B 1801-4* [64] in:

- Errichtungs- bzw. Erstellungsphase
- Nutzungs- bzw. Betriebsphase

²⁰Vgl. [73] *ÖNORM EN ISO 14044*: 2021-03-01, S. 11

²¹Vgl. [72] *ÖNORM EN ISO 14040*: 2021-03-01, S. 17

²²Vgl. [68] *ÖNORM EN 15804*: 2022-02-15, S. 45 ff.

²³Vgl. [93] Umweltbundesamt

²⁴Vgl. [81] Resch et al., S. 7

²⁵Vgl. [42] Huymajer et al., S. 18

Tab. 2.1: Beispiele für Indikatoren und Parameter (Quelle: modifiziert nach ÖNORM EN 15804 [68, 45 ff.]

Wirkungskategorie	Indikator der Umweltwirkungen	Einheit (angegeben je funktionale oder deklarierte Einheit)
Klimawandel-gesamt	Treibhauspotential insgesamt (GWP-gesamt)	kg CO ₂ -Äq.
Ozonabbau	Potential des Abbaus der stratosphärischen Ozonschicht (ODP, en: Ozone Depletion Potential)	kg CFC-11-Äq.
Versauerung	Versauerungspotential (AP: Acidification Potential)	mol ⁺ -Äq.
Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		Einheit (ausgedrückt als funktionale/ deklarierte Einheit)
Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie (Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Primärenergieträger) (energetische + stoffliche Nutzung)		MJ, unterer Heizwert
Einsatz von Sekundärstoffen		kg
Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen		m ³
Parameter zur Beschreibung der Abfallkategorien		Einheit (ausgedrückt als funktionale/ deklarierte Einheit)
Deponierter gefährlicher Abfall		kg
Deponierter nicht gefährlicher Abfall		kg
Radioaktiver Abfall		kg
Parameter zur Beschreibung der Output-Flüsse		Einheit (ausgedrückt als funktionale/ deklarierte Einheit)
Komponenten für die Weiterverwertung		kg
Stoffe zum Recycling		kg
Stoffe für die Energierückgewinnung		kg

- Abbruch- bzw. Rückbauphase.

Aufgrund der langen Betriebsphase von Tunnel und anderer strategisch wichtigen Infrastruktur sollte bereits während der Planung großes Augenmerk auf diesen Aspekt gelegt werden. Wie aus Abb. 2.2 ersichtlich ist, nehmen die Planungskosten nur einen Bruchteil der Gesamtkosten in Anspruch, haben aber dennoch großen Einfluss auf den Verlauf der Lebenszykluskosten des Infrastrukturbauwerks. Ebenfalls gezeigt wird, dass die Kosten, sobald der Bau begonnen hat, nur noch schwer zu beeinflussen sind. Des Weiteren ist bei der Kostenaufteilung nicht klar, ob die Errichtungs- oder Folgekosten den größten Anteil an den Gesamtkosten haben. Darüber herrscht Uneinigkeit unter den Experten.²⁶ Klar erkenntlich ist, dass die Abbruchkosten nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Ergebnis der LCC ist eine Ganglinie über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Darin abgebildet sind die Kosten, die zum jeweiligen Zeitpunkt entstanden sind. Mit dieser Art der Darstellung wird analysiert, wann welche Art von monetären Aufwänden entsteht. So sind bessere Einschätzungen bzgl. der Finanzierung des Bauwerks und Steuerung der Betriebskosten möglich.

2.2.3 Soziale Nachhaltigkeit

Nowak beschreibt die soziale Nachhaltigkeit, als „bewusste Organisation von sozialen und kulturellen Systemen [58]“. Die Gebäude, in denen wir leben, und die Infrastruktur, die wir nutzen,

²⁶Vgl. [42] Huymajer et al., S. 18

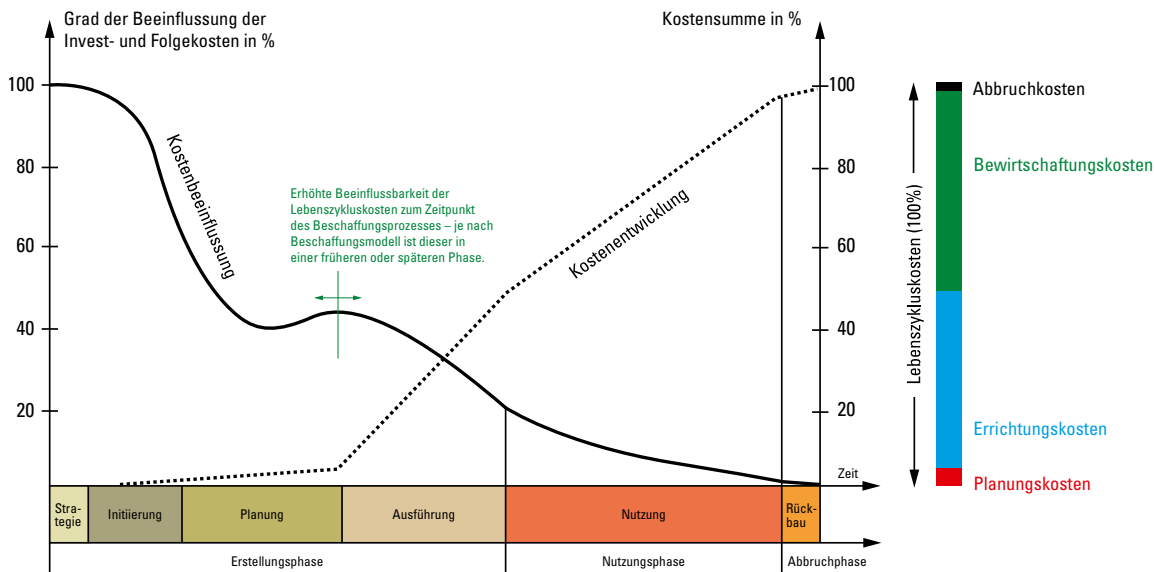


Abb. 2.2: Beeinflussbarkeit der Lebenszykluskosten (Quelle: Resch et al. [81, S. 8])

stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit unserem sozialen Leben. Die Baubranche spielt mit der nachhaltigen Schaffung solcher Systeme eine maßgebende Rolle. Trotz dieser einschneidenden Relevanz findet die soziale Nachhaltigkeit oft nur wenig Platz in der Literatur.^{26, 27}

Um zukünftig bessere Entscheidungen für die Gesamtheit der Gesellschaft zu treffen, werden MCAs, auch Multi-Criteria Decision-Making Methods (MCDM) oder Integrated Life-Cycle Analysis (ILCA) genannt, eingesetzt. Ähnlich wie bei Ausschreibungen werden dabei im Vorfeld gewichtete Kriterien zur Beurteilung von Projekten festgelegt. Diese Kriterien sind laut *ÖNORM EN 16309* [69] für Gebäude:

Zugänglichkeit: Unter diesen Punkt fallen alle Aspekte, die beschreiben, wie leicht ein Gebäude erreichbar und nutzbar ist. Darunter fallen die Annäherung an ein Gebäude und der Zugang zu Gebäude-Dienstleistungen.

Anpassungsfähigkeit: In dieser Kategorie wird die Eignung eines Bauwerks beschreiben, sich auf Nutzungsänderungen einzustellen. Für eine solche Betrachtung müssen am Anfang der Bewertung Szenarien definiert werden, anhand derer die Eignung gemessen werden kann. Besonders für Tunnel ist die technische Anpassungsfähigkeit, aufgrund der sich ändernden Normen über die lange Nutzung, von großer Bedeutung.

Gesundheit und Behaglichkeit: Mit diesem Aspekt werden Merkmale bzgl. Wärmetechnik, Innenluftqualität, Akustik, visuellen Eigenschaften und Platzbedarf abgedeckt.

Auswirkungen auf benachbarte Gebäude: Dieser Abschnitt geht auf die Emissionen des Bauwerks ein. Es werden insbesondere jene aus Lärm, Außenluft, Boden, Wasser, Licht, Stößen und Erschütterungen betrachtet.

Inspektion, Wartung, Reinigung, Instandsetzung (Instandhaltung) und Instandhaltbarkeit: In diesem Teil wird die Qualität des Bauwerks in Hinblick darauf bewertet, wie leicht es für Nutzer ist, es in einem funktionstüchtigen Zustand zu erhalten.

²⁷Vgl. [86] Sierra et al., S. 2

Sicherheit und Schutz: Teil dieser Bewertung ist die Fähigkeit eines Gebäudes gegen Umwelt Risiken und Kriminalität Stand zu halten. Die Auswirkungen solcher Ereignisse sollten so gering wie möglich sein.

Den angeführten Kriterien sind weitere Indikatoren untergeordnet, welche die gestellten Anforderungen nochmals spezifizieren. Sie haben keinen quantifizierbaren Wert, sondern gleichen vielmehr einer beschreibenden Bewertung. Im Idealfall wird die konkrete Auswahl der Kriterien von Jenen bestimmt, die durch das Vorhaben am meisten beeinflusst werden. Im Zusammenhang mit Infrastrukturbauwerken beschäftigen die Punkte ökonomische und lokale Entwicklung, Mobilität und Erreichbarkeit, ökologische Gesundheit und Sicherheit die Betroffenen am meisten.²⁸ Je nach Projekt variieren die bewerteten Gesichtspunkte. Somit stellt die soziale Komponente der Nachhaltigkeit eine Besonderheit dar, da sie nicht anhand eines Kriteriums bzw. Kennwertes festgemacht werden kann. Dadurch, und durch die Tatsache, dass bei solchen Bewertungen immer ein subjektiver Teil mit einfließt, ist die Quantifizierung des Bauwerks und die Zufriedenstellung aller Beteiligten schwer.²⁸

Ergebnis einer MCA sind die bewerteten Kriterien. Anhand der vorher festgelegten Gewichtung werden Aussagen und Entscheidungen über die Betrachtung getroffen. Grafisch werden diese Analysen meist in Form von Netzdiagrammen dargestellt. Wie in Abb. 2.3 zu sehen ist, kann eine MCA, neben sozialen Aspekten, wie Sicherheitsgefühl, Zugänglichkeit oder sozialer Entwicklung, ebenso die LCC und LCA beinhalten. Dadurch werden ganzheitliche Aussagen über ein Projekt getroffen. Durch eine Punktebewertung, in diesem Beispiel von 0 – sehr schlecht – bis 5 – sehr gut – entsteht eine optische Interpretation der Ergebnisse.

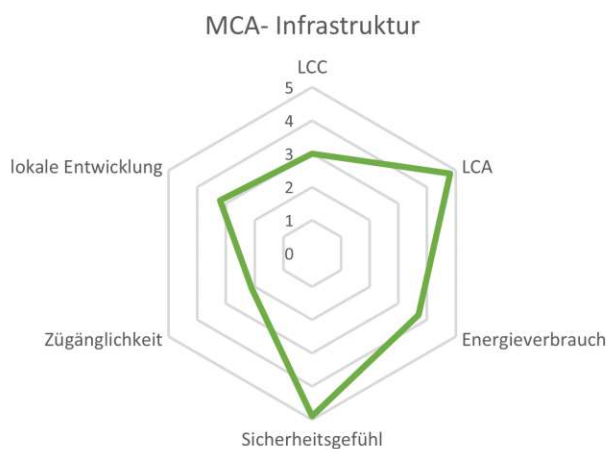


Abb. 2.3: Beispiel eines Netzdiagramms zur Bewertung von Infrastruktur

Die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte sind in der Tunnelbranche immer mehr von Bedeutung. Nun gilt es zu klären, welchen Stellenwert der Tunnelbau in diesem Gefüge hat. Dafür wird im Folgenden auf die volkswirtschaftliche Relevanz und die Emissionen des Sektors und typische Bauweisen eingegangen.

²⁸Vgl. [86] Sierra et al., S. 2 ff.

2.3 Tunnelbau

Der Tunnelbau spielt nicht nur historisch durch die Entwicklung der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise hierzulande eine bedeutende Rolle. Derzeit wird in Wien die U-Bahnlinie U5 gebaut, um den bestehenden Personentransport zu entlasten und neue städtische Verbindungen zu schaffen. Sie steht sinnbildlich für den weltweiten Trend der Urbanisierung und dem daraus resultierenden Bedarf an nachhaltigen Mobilitätslösungen. Österreichweit versprechen Projekte wie der Koralmtunnel, der Semmering-Basistunnel und der Brenner-Basistunnel eine Reduzierung des Gütertransportes auf Straßen. Diese Tunnel sind nicht nur von nationalem Interesse. Sie stellen wichtige Schlüsselemente des transeuropäischen Kernnetzes – TEN-V – dar. Aufgrund der zentralen Lage in Europa verlaufen vier der neun geplanten Netzkorridore durch Österreich, wie aus Abb. 2.4 hervorgeht. Der durch Tirol verlaufende *Skandinavisch-Mediterrane Korridor* verbindet skandinavische Städte mit italienischen Häfen. Der *Rhein-Donau Korridor* erstreckt sich von Frankfurt bzw. Straßburg bis hin zum Schwarzen Meer und führt einen Teil der Strecke durch Salzburg, Oberösterreich, Niederösterreich, Wien und das Burgenland. Der Ostseeraum und die Adria sind durch den von Nordosten bis Südwesten Österreichs gelegenen *Baltisch-Adriatischen Korridor* verknüpft. Ganz im Osten Österreichs liegen Teile des *Balkan-/ Ost- Med Korridors*.²⁹

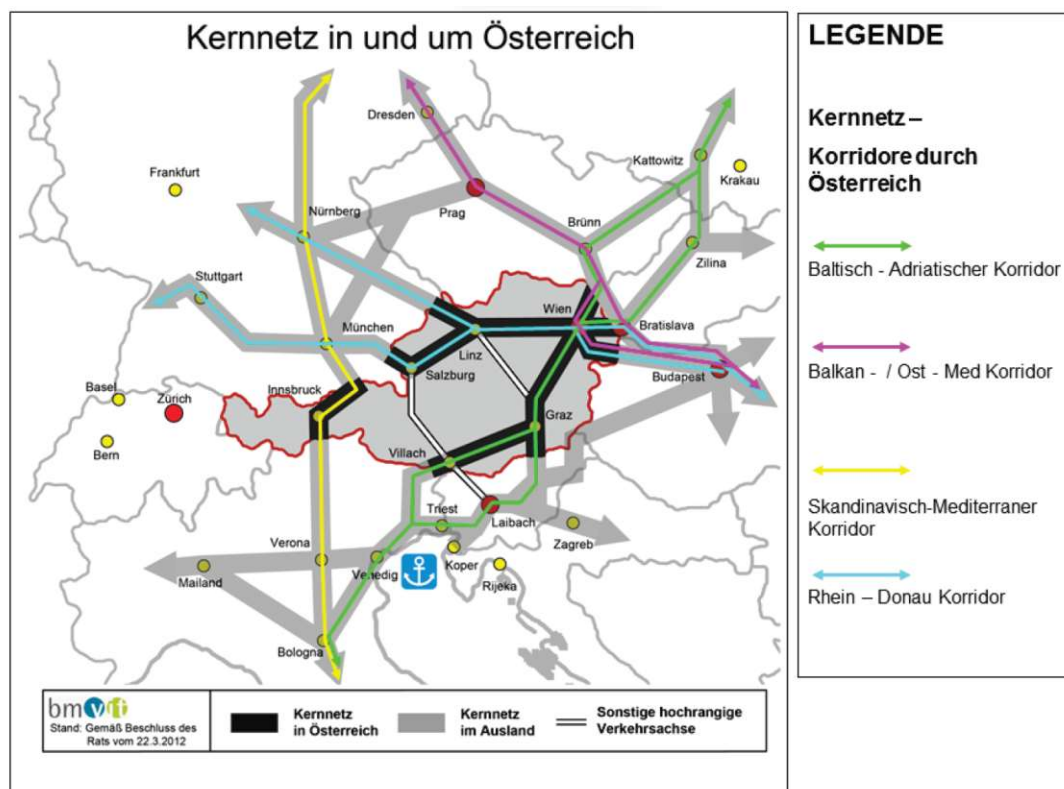


Abb. 2.4: Kernnetz-Korridore durch Österreich (Quelle: BMK [6, S. 6])

Volkswirtschaftlich repräsentiert der Tunnelbau ca. 0,1% des Bruttoinlandsprodukts Europas. Es wird von einem weiteren Wachstum, das 2,5% höher ist als das durchschnittliche Wachstum der Baubranche, ausgegangen.³⁰ Das rührt aus der oben angeführten Tatsache, dass durch die

²⁹Vgl. [24] European Commission, S. 3 ff.

³⁰Vgl. [46] International Tunneling and Underground Space Association, S. 8 ff.

fortschreitende Urbanisierung und Globalisierung eine leistungsstarke Verbindung von Städten immer wichtiger wird.

Trotz seiner vergleichsweise geringen Größe im Verhältnis zu anderen Ländern war Österreich 2019 nach der Türkei das europäische Land mit den meisten aufgefahrenen Kilometern.³⁰ Das spiegelt sich in Abb. 2.5 wieder. Daraus geht ebenfalls hervor, dass im Bereich der Eisenbahntunnel laut Brill [10] derzeit mehr Tunnelkilometer gebaut werden, als sich in Betrieb befinden. Die 406 Kilometer Autobahn- bzw. Schnellstraßentunnel sind für die Optimierung von Instandhaltungs- und Betriebsmaßnahmen relevant. Insgesamt zeigt sich das große Potential, dass von einer nachhaltigen Gestaltung der Tunnelbranche ausgeht.

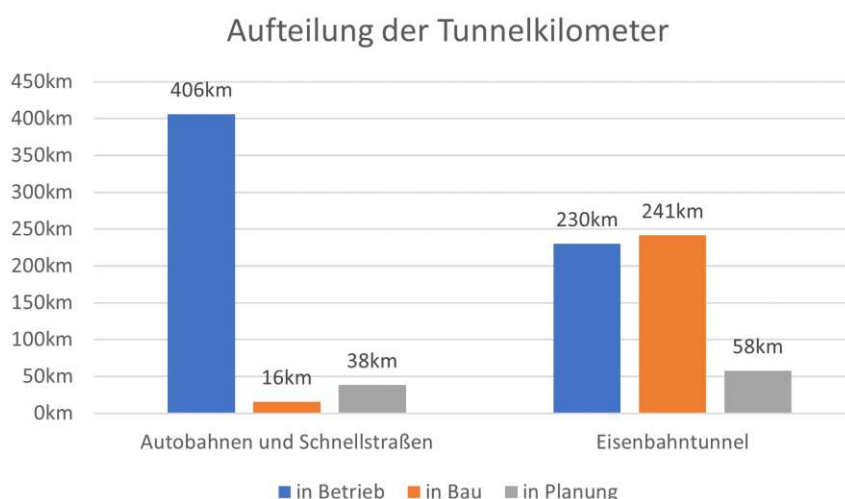


Abb. 2.5: Ausbauübersicht der Tunnelkilometer in Österreich (Quelle: Brill [10] und BMK [4, S. 12])

Entgegen der unbestreitbaren Notwendigkeit des Baus neuer Infrastruktur stellt sich dennoch die Frage, inwiefern das Handeln der Baubranche Einfluss auf die Umwelt nimmt. Im Zuge des Dekarbonisierungspfades bis 2050 verfehlt das Bauwesen seine vorgelegten Ziele derzeit um die Hälfte.³¹ Dies vor dem Hintergrund das ca. 40% der weltweiten THG-Emissionen – inklusive dem Betrieb und der Erhaltung von Bauwerken – aus dem Bausektor stammen,³¹ führt die Dringlichkeit eines Handels nochmals vor Augen. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Ausführungsphase selbst nur für einen Bruchteil der genannten Emissionen verantwortlich ist. Je nach gesetzter Systemgrenze variieren die dazugehörigen Werte.

Großen Anteil an den Emissionen haben eingesetzte Baumaterialien. Den Löwenanteil tragen Stahl- und Zementindustrie bei. 2021 entfallen auf den Energie- und Industriesektor 37% der österreichischen THG-Emissionen. Davon sind 46% auf die Stahl- und Eisenerzeugung und 13% auf die Zementherzeugung zurückzuführen. Das ist aus Abb. 2.6 ersichtlich. Damit sind sie gemeinsam für ca. 59% der industriellen THG-Emissionen verantwortlich. Ebenfalls für die Baumaterialien relevant sind die Emissionen aus der Kalk- (4%), Ziegel- (0,8%) und Glasherstellung (0,2%).

Bis 2030 sollen, bezogen auf das Jahr 2019, 61% der Emissionen aus der Industrie gestrichen werden. Diese Zahlen sind für den Tunnelbau dahingehend von Relevanz, da, unabhängig von der Bauweise, ein Großteil des Tragwerks bzw. des Ausbaus von Tunnelbauwerken durch bewehrten Beton realisiert wird. Die Literatur ist sich uneinig darüber, ob der Großteil der Emissionen in der Errichtungs- oder Nutzungsphase des Tunnels entsteht. Das hat mitunter damit zu

³¹Vgl. [97] United Nations Environment Programme, S. 34 ff.

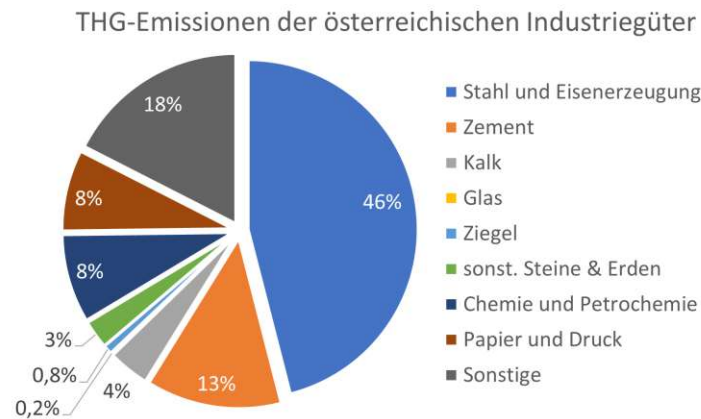


Abb. 2.6: Emissionen, der österreichischen Industriegütererzeugung (Quelle: modifiziert nach Diendorfer et al. [18, 14 ff.])

tun, dass sich die Tunnel in ihren Abmessungen, Ausbauten, Anforderungen und Nutzungen grundlegend unterscheiden. Weiter ist anzumerken, dass je nach gesetzter Systemgrenze andere Werte für die Emissionen ermittelt werden.³² Das macht selbst den Vergleich zweier identischer Tunnelquerschnitte in gleicher Tunnelbauweise schwierig. Außerdem gilt es zu beachten, dass abhängig von der geografischen Lage und den geologischen Gegebenheiten des Tunnels die geforderten Tunnelbaumethoden grundlegend variieren.

2.3.1 Tunnelbauweisen

Es gibt eine Vielzahl an Methoden zur Herstellung eines Tunnels. Abb. 2.7 ermöglicht eine Übersicht der gängigen Bauweisen. Nach der Beeinflussung der Oberfläche werden geschlossene, offene und Absenkbauweise unterschieden. Diese können jeweils in weitere Vortriebsarten und Bauweisen geteilt werden. Die Auswahl der Bauweise hängt neben den spezifischen Projektanforderungen laut Girmscheid [32] unter anderem von folgenden Faktoren ab:³³

- Geologie
- Trennflächengefüge
- Wasseraufkommen
- Ausbruchsquerschnitt
- Tunnellänge
- Überlagerungshöhe.

Für das tiefgreifende Verständnis der weiteren Arbeit ist vor allem die geschlossene Bauweise relevant. Allen voran ist der kontinuierliche bzw. maschinelle Vortrieb von Belangen. Auf diesen wird in vorliegender Diplomarbeit genauer eingegangen. Die anderen Bauweisen werden in ihren Grundzügen umrissen.

Der Name der geschlossenen Bauweise ist der Tatsache geschuldet, dass sich das gesamte Tunnelbauwerk, während der Bauphase und im weiteren Verlauf, unter der geschlossenen Oberfläche

³²Vgl. [42] Huymajer et al., S. 14

³³Vgl. [32] Girmscheid

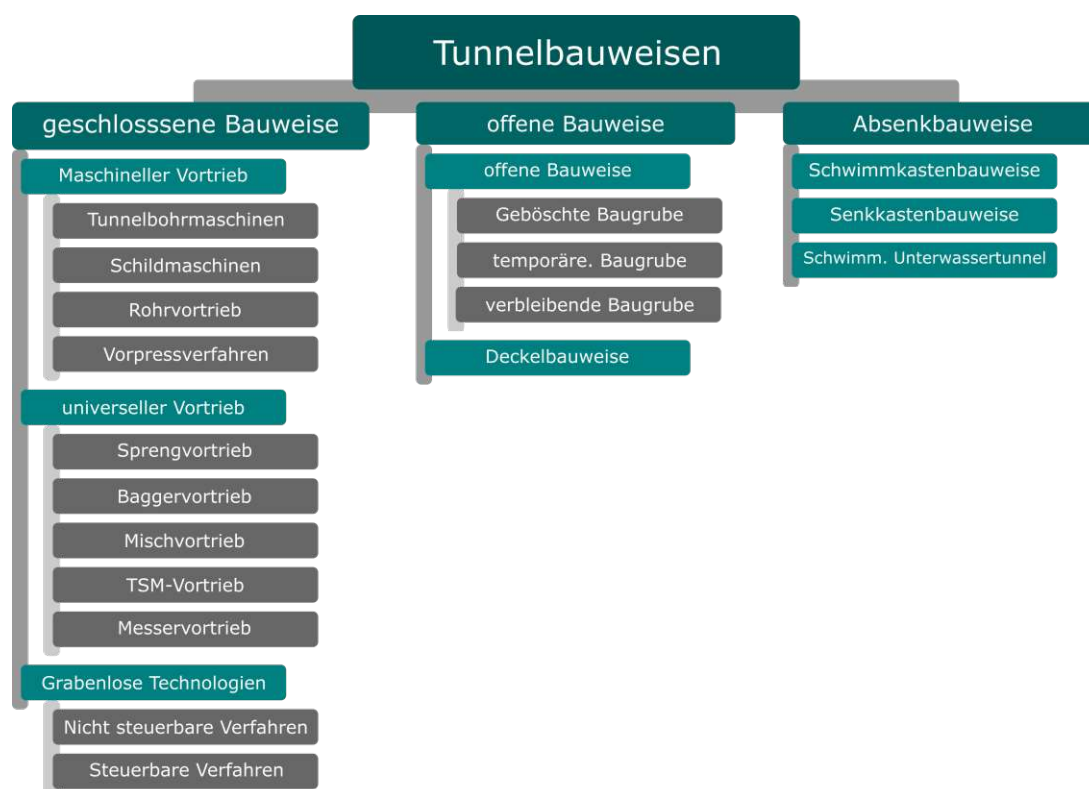


Abb. 2.7: Übersicht Tunnelbauweisen

befindet. Sie kann weiter unterteilt werden in den universellen und maschinellen Vortrieb. Auch grabenlose Technologien fallen unter die Definition der geschlossenen Bauweise, werden in dieser Arbeit allerdings nicht näher behandelt. Der konventionelle bzw. universelle Vortrieb wird mit spezialisierten Einzelgeräten bewerkstelligt. Im Gegensatz zur maschinellen Bauweise laufen die einzelnen Arbeitsschritte hintereinander, sozusagen zyklisch, ab. Die wichtigsten Schritte sind:

- Lösen
- Schuttern
- Sichern
- Ausbau.

Das Lösen des Materials an der Ortsbrust kann mit Sprengvortrieb, Baggervortrieb, Mischvortrieb, Teilschnittmaschinen-Vortrieb oder Messervortrieb geschehen. Abgesehen vom Messervortrieb ist ein großer Vorteil dieser Verfahren die flexible Querschnittsgestaltung.³⁴ Die eingesetzten Stützmittel umfassen Spritzbeton, Systemankerungen, Injektionen und Streckenbögen.³⁵

Der bekannteste Vertreter der zyklischen Bauweise ist die *Neue Österreichische Tunnelbauweise* (NÖT). Im Gegensatz zu anderen historischen Bauweisen, wie der alten Österreichischen Bauweise oder der Deutschen Bauweise, die sehr massive Ausbauten in den Tunnel einbringen, setzt die NÖT auf das Mittragen des Gebirges, wie aus Abb. 2.8 hervorgeht. Somit werden schlankere Ausbauten realisiert und wertvolle Ressourcen gespart.³⁵ Ein Weiterdenken dieses Ansatzes führt zur zusätzlichen Optimierung des Tragwerks mithilfe von ressourceneffizienten Tübbingen.

³⁴Vgl. [36] Goger, S. 74

³⁵Vgl. [1] Adam, S. 73 ff.

Zukünftig besteht die Möglichkeit mit weniger Material die gleiche Tragwirkung des Ausbaus zu erreichen.

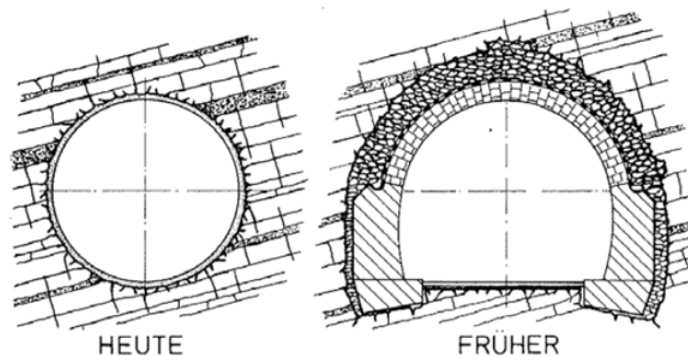


Abb. 2.8: Unterschiede Tunnelausbau – NÖT und historische Bauweisen (Quelle: Adam [1, S. 76])

Bei der offenen Bauweise, auch *Cut and Cover* Bauweise genannt, kommt es zu einem Einschnitt der Oberfläche. Abhängig davon, ob die Herstellung des späteren Bauwerks ab der Sohle der Baugrube, oder von der Oberfläche abwärts erfolgt, können die konventionelle offene Tunnelbauweise (Bottom-Up) und Deckelbauweise (Top-Down) unterschieden werden.³⁶

konventionelle offene Tunnelbauweise (Bottom-Up): Bei dieser Bauweise ist die Baugrube über die gesamte Dauer der Bauzeit offen. Aufgrund dessen ist eine dementsprechende Baugrubenumschließung zu wählen. Je nach Anforderungen und Rahmenbedingungen kommen geböschte Baugruben, temporäre Sicherungen oder verbleibende Sicherungen zum Einsatz.³⁶ Ungebunden von der Baugrubenumschließung sind die wesentlichen Bauverfahrensschritte:³⁷

- Herstellen der Baugrubensicherung und Aushub bis auf die Sohle
- Herstellen der Sauberkeitsschicht und betonieren – bei Grundwasser zusätzlich die Sicherung – des Fundaments
- Schalen und betonieren des restlichen Tunnelquerschnitts
- Abdichten des Tunnels
- Überschütten des Tunnels

Deckelbauweise (Top-Down): Im Unterschied zur konventionellen offenen Bauweise, wird bei der Deckelbauweise immer eine verbleibende Baugrubenumschließung hergestellt. Diese ist Teil des späteren Tragwerks. Ein weiteres Kennzeichen ist, dass die Tunnelfirste eingebaut wird sobald der Aushub das entsprechende Niveau erreicht hat. Der restliche Aushub findet unter dem entstandenen Deckel statt.

Die Absenkbauweise kommt bei Tunnelbauwerken zum Einsatz, die sich in einem Gewässer, meist Meerengen oder großen Flüssen, befinden. Aufgrund der geografischen Lage spielt sie in Österreich daher keine Rolle. Unterteilt werden kann sie in Schwimmkastenbauweise, Senkkastenbauweise und schwimmende Tunnel. Letztere sind zum Zeitpunkt des Verfassens der Diplomarbeit nur konzeptionell und nicht baupraktisch umgesetzt.

³⁶Vgl. [1] Adam, S. 170

³⁷Vgl. [36] Goger, S. 186

Schwimmkastenbauweise: Diese Art der Absenkbauweise wird derzeit bei der Erstellung des 18 km langen Fehmarnbelt-Tunnel zwischen Deutschland und Dänemark eingesetzt.³⁸ Die Herstellung solcher Tunnel läuft in folgenden Schritten ab:³⁹

Gründung: An der späteren Position des Tunnels wird ein Graben ausgehoben, in dem Flach- und bzw. oder Tiefgründungen hergestellt werden.

Herstellung der Tunnelemente: Tunnelemente (bis zu 217 m lang)³⁸, die wiederum aus mehreren Segmenten bestehen, werden in einem nur für diesen Zweck errichteten Trockendock hergestellt.

Einschwimmen und Absenken: Die fertig zusammengesetzten Elemente werden wasserdicht verschlossen und an ihren Bestimmungsort geschwommen. Dort werden sie abgesenkt und luftdicht mit dem bereits vorhandenen Element verbunden.

Überschütten: Das positionierte Tunnelement wird mit einer ca. 1,5 m hohen Deckschicht überschüttet. Diese Schicht schützt den Tunnel vor Ankerwurf.

Senkkastenbauweise: Eine weitere Variante zum Bau von Absenktunnel ist die Senkkastenbauweise. Aufgrund der Herstellung werden zwei Methoden unterschieden:

- Druckluftsenkkasten
- Offener Senkkasten

Beim Druckluftsenkkasten erfolgt der Aushub im Trockenen in einer mit Überdruck beaufschlagten Kammer. Durch den Abbau des Materials senkt sich der Baukörper immer weiter bis auf die gewünschte Tiefe. Aus Arbeitnehmerschutz sind Arbeiten nur bis zu einer Tiefe von 30 m unter der Wasseroberfläche möglich.⁴⁰

Der Aushub bei offenen Senkkästen erfolgt unter der Wasseroberfläche im Schutze einer Baugrubenumschließung, die unkontrollierten Wasserzutritt verhindert. Nach der Herstellung einer dichten Sohle, findet der weitere Bauablauf im Trockenen statt.⁴⁰

2.3.2 Maschineller Tunnelbau

Der maschinelle Tunnelbau zeichnet sich durch einen erhöhten Mechanisierungsgrad und einen geringeren Personaleinsatz aus. Eine weitere Eigenart ist, dass aufgrund der geringen systembedingten Anpassungsfähigkeit der Geräte, nur eine limitierte Flexibilität des aufzufahrenden Querschnitts gegeben ist. Anhand des eingesetzten Verfahrens und der Gerätschaften wird der maschinelle Vortrieb unterschieden in:⁴¹

- Tunnelvortriebsmaschinen
 - Tunnelbohrmaschine
 - Schildmaschine
 - Kombinationsschildmaschine
- Rohrvortrieb
- Vorpressverfahren.

³⁸Vgl. [53] LOK Report

³⁹Vgl. [36] Goger, S. 193 ff.

⁴⁰Vgl. [84] Schmidt et al., S. 653 ff.

⁴¹Vgl. [36] Goger, S. 113

Von den genannten Vortriebsarten und Verfahren gibt es eine Vielzahl an technischen Ausführungsvarianten. Je nach geforderten Ansprüchen wird der jeweilige Maschinentyp adaptiert. Das ist mit hohen Kosten verbunden. Die Anschaffungskosten des maschinellen Tunnelbaus sind somit höher als jene des universellen Vortriebs. Monetär gerechtfertigt wird der Einsatz kostspieliger Maschinen durch die geringeren Betriebskosten während der Bauphase. Ab welcher Tunnellänge der maschinelle Vortrieb günstiger ist, variiert dabei von Projekt zu Projekt.

Aufgrund ihres Tunnel-Ausbaus sind vor allem der Vortrieb durch TVM und Rohrvortrieb für diese Diplomarbeit interessant. Die konstruktiven Ausführungsformen betreffend, bedienen sie sich an Rohren oder Kreissegmenten aus Stahlbeton für die Auskleidung und Tragwerksherstellung der Tunnel. Sie bilden damit die Grundlage für den Einsatz ressourcenoptimierter Bauweisen.

Vortrieb mit einer Tunnelvortriebsmaschine

Diese Art des maschinellen Tunnelbaus hat sich Mitte des 20. Jhdts. entwickelt. Seitdem hat sich eine Vielzahl an unterschiedlichen Typen hervorgetan.⁴² Eine Übersicht wird in Abb. 2.9 gegeben. In dieser Grafik ist durch ein Kreissymbol neben dem Maschinentyp markiert, ob eine TVM Tübbinge benötigt. Es geht hervor, dass bis auf die offene TBM sowie der Erweiterungstunnelbohrmaschine alle Maschinentypen Tübbinge für die Fortbewegung bzw. den Ausbau benötigen. Nachfolgend wird, gegliedert nach Abb. 2.9, beschrieben, wann welcher Maschinentyp zum Einsatz kommt, und wie der Vortrieb funktioniert:

Tunnelbohrmaschine: Tunnelbohrmaschinen kommen zum Einsatz, wenn die Ortsbrust nicht gestützt werden muss, sprich bei standfestem Gestein. Bei der offenen TBM erfolgt die systematische Sicherung, falls erforderlich, mit Ausbaubögen, Verbaublechen, Ankern und Spritzbeton. Zur Herstellung des Anpressdrucks an der Ortsbrust, sowie für das Weiterkommen, pressen bei diesem Maschinentyp hydraulische Platten, die sogenannten Gripper, gegen das Gebirge.⁴³ Im Gegensatz dazu steht die TBM mit Schildmantel. Diese benötigt für die Sicherung und Fortbewegung der Maschine Tübbinge.⁴³ Sie kommt in Gebirgen zum Einsatz, die sich durch Gestein mit geringer Standzeit auszeichnen.

Doppelschildmaschine: Je nach Standfestigkeit des Gebirges wird bei dieser Art der Tübbing zur Abstützung der Vortriebspresen verwendet. In ausreichend standfesten Gebirge bewegt sich die Maschine mithilfe von Grippern vorwärts.

Schildmaschine: Schildmaschinen werden in nicht dauerhaft standfesten Verhältnissen eingesetzt. Abhängig davon, ob der Abbau voll- oder teilflächig stattfindet und wie die Ortsbrust gestützt wird, werden eine Vielzahl an verschiedenen Maschinentypen unterschieden. Das geht aus Abb. 2.9 hervor. Es eint sie die Tatsache, dass zur Sicherung und Fortbewegung der Maschine Tübbinge eingesetzt werden müssen.

Kombinationsschildmaschine: Kombinationsschildmaschinen kommen dann zum Einsatz, wenn die Baugrundverhältnisse stark variieren. Binnen kurzer Zeit kann von einem in den anderen Maschinentyp umgerüstet werden.⁴⁴ Auch hier werden stets Tübbinge eingesetzt.

Aufgrund der Vielzahl, der zu bewältigenden Aufgaben, sowie den beengten Platzverhältnissen, erstrecken sich TVMs mit der dazugehörigen NLE bis zu 200 m von der Ortsbrust in den Tunnel hinein. Dabei hat jeder Abschnitt eine eigene Aufgabe. Laut *ÖNORM B 2203-2* [65] bzw. *ÖGG* [61] sind TVMs, unabhängig von der Art, in 4 Arbeitsbereiche gegliedert:

- Bereich über und vor dem Abbauwerkzeug

⁴²Vgl. [1] Adam, S. 132

⁴³Vgl. [15] DAUB, S. 12 f.

⁴⁴Vgl. [36] Goger, S. 152

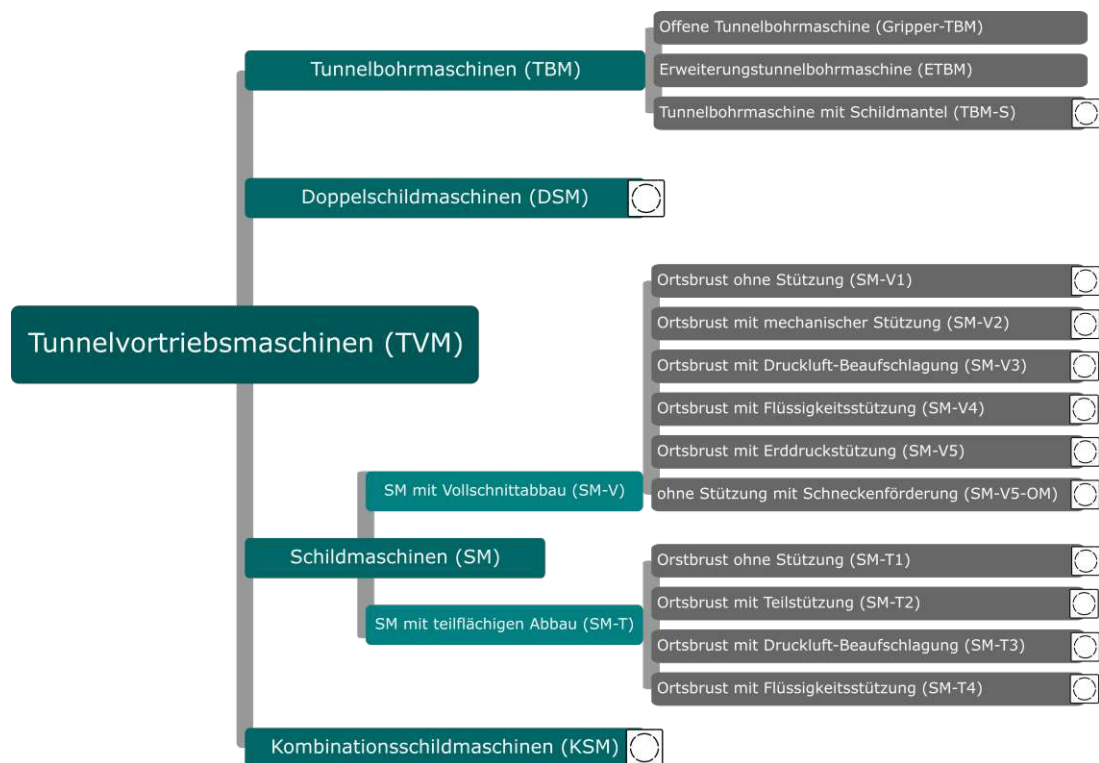


Abb. 2.9: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach DAUB [15, S. 11])

- A1: im Bereich der TBM bzw. Tübbingausbau und Sohlbettung
- A2: im Bereich der NLE
- A3: hinter der NLE

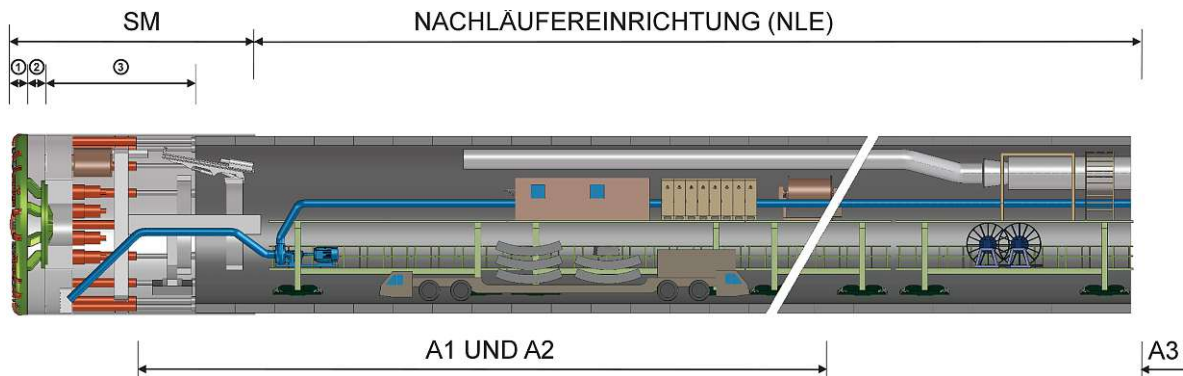
Beispielhaft sind die Bereiche anhand einer SM mit Flüssigkeitsstützung in Abb. 2.10 dargestellt. Wie zu sehen ist, macht das Abbauwerkzeug nur einen geringen Teil der Maschine aus. Der Großteil des Platzes wird von der NLE eingenommen. Mithilfe des abgebildeten Maschinentyps wird im Folgenden der Vortriebsvorgang, inklusive dem Ausbau mit Tübbing, erklärt:⁴⁵

Abbau und Ortsbruststützung: Im Bereich A1 der SM wird der Querschnitt vollflächig durch das Abbauwerkzeug abgetragen. Das abgebaute Material vermengt sich zum Zwecke der Ortsbruststützung mit einer Bentonitmischung. Diese baut entweder durch Regulierung der Zu- und Abläufe des Aushub-Bentonitgemisches – Slurry Shield –, oder durch ein Druckluftpolster – Hydroschild – den benötigten Stützdruck an der Ortsbrust auf. Zur Aufbereitung wird das Gemisch, auch Bohrspülung genannt, in eine Separationsanlage befördert. Dort werden Feststoffe entfernt und verlorene Bentonitsuspension ersetzt. In einem kontinuierlichen Kreislauf wird frische Suspension an die Ortsbrust gepumpt, um den Stützdruck weiter zu gewährleisten.

Schreitvorgang: Die für den Vortrieb benötigte Vorschubkraft stammt aus hydraulischen Pressen. Diese stützen sich in Längsrichtung des Tunnels auf dem bereits fertiggestellten Ausbau, bestehend aus Tübbing, ab. Die Pressen setzen im eingezogenen Zustand auf den letzten eingebauten Tübbing auf und fahren sich bis zur vorgesehenen Hublänge aus.

⁴⁵Vgl. [36] Goger, S. 138 ff.

Tübbingeinbau: Nach Erreichen der Hublänge, ziehen sich die Zylinder ein. In den Spalt zwischen eingezogenen Zylindern und bereits bestehenden Ausbau wird mithilfe eines Erektors der neue Tübbingring, bestehend aus mehreren Kreissegmenten, gesetzt. Aufgrund eines bautechnisch bedingten Überprofils bleibt ein Spalt zwischen Tübbing und Gebirge. Dieser sogenannte Ringspalt muss zur kraftschlüssigen Verbindung des Tunnelbauwerks mit seiner Umgebung verfüllt werden. Nach Erhärten des Ringspaltmaterials ist das Bauwerk für weitere Ausbauten bereit.



Legende

Arbeitsbereiche A1 und A2 Bereich für Tübbingeinbau und Tübbingbettung

Arbeitsbereich A3 Bereich hinter der NLE

- ① Schneidradbereich
- ② Abbaukammer mit Überdruck
- ③ Maschinenbereich ohne Überdruck

Abb. 2.10: Arbeitsbereiche einer SM mit Flüssigkeitsstützung (Quelle: ÖNORM B 2203-2 [65])

Rohrvortrieb

Anders als bei einer TVM wird der Rohrvorrieb, auch Microtunneling genannt, durch Abstützung an einem Widerlager realisiert. Hierbei werden Rohre von einem Startschacht in einen Zielschacht gepresst. Wenn eine Rohrlänge vorgetrieben wurde, wird ein neues Rohrelement in den Startschacht eingehoben und mit dem bereits im Boden befindlichen Element verbunden. Um bei langen Strecken die Mantelreibung des Bodens überwinden zu können, müssen Zwischenpressstationen angedacht werden. Durch eine elastische Verbindung der einzelnen Rohre ist eine Kurvenfahrt um Hindernisse bis zu einem gewissen Radius möglich. Der Vortrieb kann bemannt oder unbemannt erfolgen.⁴⁶

Die Rohr-Elemente sind zwischen 2,5 und 5,5 m lang und haben einen Durchmesser von 0,8 bis 4,4 m. In den meisten Fällen sind die Rohre aus Stahlbeton gefertigt.⁴⁷ Durch ihre kreisförmige Querschnittsform haben sie Ähnlichkeiten zu den beim Vortrieb mit TVM eingesetzten Tübbing. Das wirft die Frage auf, inwiefern eine ressourcenoptimierte Bauweise für diese Art des Vortriebs den Verbrauch an Rohstoffen verringern kann.

Vorpressverfahren

Beim Vorpressverfahren wird ein bereits fertig hergestellter Baukörper in den Boden eingepresst. Das Verfahren ist stark durch Baugrundverhältnisse und Abmessungen des Bauwerks beschränkt.

⁴⁶Vgl. [36] Goger, S. 158

⁴⁷Vgl. [36] Goger, S. 163 ff.

Vorteile des Verfahrens sind eine hohe Vorfertigungsrate, keine bzw. nur kurze Beschränkung des oben liegenden Verkehrs, Verringerung der Gefahren im Lichtraumprofil und keine Probleme mit dem Grundwasser.⁴⁷

2.4 Ansätze der nachhaltigen Gestaltung des Tunnelbaus anhand der Lebenszyklusphasen

Das Thema Nachhaltigkeit hat in letzten Jahren eine verstärkte Präsenz in den Fachzeitschriften des Bauwesens. Nicht zuletzt wegen globalen Ereignissen wie der Coronakrise, oder dem noch immer andauernden Krieg in der Ukraine, ist ein immer größer werdendes Bewusstsein für Abhängigkeiten der Wirtschaft und sozial nachhaltigen Lieferketten entstanden.

Obgleich der Brisanz der sozialen Nachhaltigkeit zeigt sich aus der Literaturrecherche klar, dass ökologische und ökonomische Aspekte an erster Stelle stehen. Aufgrund dessen ist die soziale Komponente in den kommenden Kapiteln weniger vertreten. Das hat laut Meinung der Autorin nichts mit der Wichtigkeit dieses Themas zu tun, sondern lässt sich auf die wenigen Schnittstellen zwischen Technik und Geisteswissenschaft in der Literatur zurückführen.

Die Forderungen der United Nations zur Senkung der CO₂-Emissionen sind klar: mehr Einsatz von heimischen Materialien und lokal verfügbaren Ressourcen. Für den Tunnelbau muss überprüft werden, welche der empfohlenen Maßnahmen – z.B. der vermehrte Einsatz von Holz als Baustoff – sinnvoll und praktikabel sind. Trotz spezieller Gegebenheiten und Randbedingungen etablieren sich bereits konkrete Ansätze für die Integration des Drei-Säulen-Modells im Tunnelbau. Diese Ansätze bzw. Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln herausgearbeitet.

2.4.1 Lebenszyklusphasen

Bei der folgenden Betrachtung der einzelnen Maßnahmen steht die Nachhaltigkeit im Vordergrund. So bietet sich eine Gliederung über den Lebenszyklus mithilfe der *ÖNORM EN 15978* [67]: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden – Umweltqualität* an. In ihr sind die einzelnen Lebenszyklusphasen definiert. Wie aus Abb. 2.11 ersichtlich ist, gliedert sich der Lebenszyklus in folgende Abschnitte:⁴⁸

Planungsphase (Modul A0): Diese Phase beschäftigt sich mit jenen Arbeiten, die noch jeglicher Materialherstellung und Bautätigkeit stattfinden. Sie schließt planende und entwerfende Tätigkeiten mit ein und hat somit keinen direkten Einfluss auf die Umweltauswirkungen. Deshalb fließt sie laut *ÖNORM EN 15978* [67] nicht in die umweltbezogene Qualität eines Gebäudes ein.

Herstellungsphase (Modul A1–A3): Die erste Phase des physischen Lebenszyklus erstreckt sich über die Module der Rohstoffbeschaffung, des Transports zur Produktionsstätte und die Produktion des Baumaterials bzw. der Dienstleistung. Die Betrachtung dieses Abschnittes endet am Ort der Produktion des fertigen Produktes.

Errichtungsphase (Modul A4–A5): Die Errichtungsphase inkludiert den Transport von der Produktionsstätte zum Errichtungsort. Ebenfalls innerhalb der Systemgrenze dieser Phase liegen die Errichtung und der Einbau bis zur Fertigstellung der Bauleistung.

Nutzungsphase (Modul B1–B8): Neben der Nutzung selbst beinhaltet diese Phase die Instandhaltung, die Instandsetzung, den Austausch und die Modernisierung des Bauwerks. Ebenfalls in diese Systemgrenze zu zählen sind Energie- und Wasserverbrauch im Betrieb.

⁴⁸Vgl. [67] *ÖNORM EN 15978 – 1: 2021-10-01*, S.33 ff.



Abb. 2.11: Übersicht der Lebenszyklusphasen und Module (Quelle: ÖNORM EN 15978 [67])

Entsorgungsphase (Modul C1–C4): Die letzte Phase des Lebenszyklus schließt den Rückbau bzw. Abriss, den Transport, die Abfallbehandlung und die Beseitigung des Bauwerks mit ein.

Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (Modul D): Nicht alle ökologisch relevanten Tätigkeiten beschränken sich auf Lebenszyklusphasen. Deshalb wird in der Phase D das Potential der Wiederverwertung, der Rückgewinnung und des Recyclings bewertet. Auch andere Vorteile, die sich über alle Phasen erstrecken, fallen für diese Arbeit unter diesen Abschnitt.

Eine Gliederung der Maßnahmen nur anhand der Lebenszyklusphasen ist laut Autorin nicht ausreichend, da sich die Maßnahmen nicht nur darin unterscheiden *wann* sondern in welcher *Art* sie auftreten. Beispielsweise wirkt der Einsatz von alternativ betriebenen Baugeräten auf einer anderen Ebene wie die Unterstützung des Planungsprozesses mit BIM. Für die Gruppierung wesensgleicher Maßnahmen wurde sich stark an Obernosterer et al. [60] orientiert. Diese unterteilen laut Abb. 2.12 fünf Schritte zur Vermeidung bzw. Verringerung des Verbrauches von CO₂ auf Baustellen, sowie der Aufbringung von CO₂-neutraler Energie. Jener Rest der Emissionen, der nicht verhindert werden kann, wird durch Kompensationsmaßnahmen ausgeglichen. Da es sich hierbei um eine rein ökologische Betrachtung handelt, werden für diese Diplomarbeit nicht alle 5 Schritte übernommen. Betrachtet werden im Weiteren – falls vorhanden – lediglich die Schritte *organisatorische* und *technologische Maßnahmen* bzw. *Entwicklungen*.

Die aus der Literaturanalyse stammenden Maßnahmen werden somit anhand der Lebenszyklusphase und ihrer Wirkung eingeteilt. Mit dieser Kategorisierung wird im Folgenden ein Überblick gegeben, was den Markt gerade bewegt. Da es sich um eine Momentaufnahme handelt, wird kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt.

2.4.2 Planungsphase (Modul A0):

Noch bevor der eigentliche Planungsprozess startet, werden in dieser Phase Untersuchungen angestellt, die über das Bestehen und Verwerfen eines Projektes entscheiden. Diese Prüfungen können sozialer, ökologischer und ökonomischer Natur sein. Wie bereits erläutert hat die Planung,

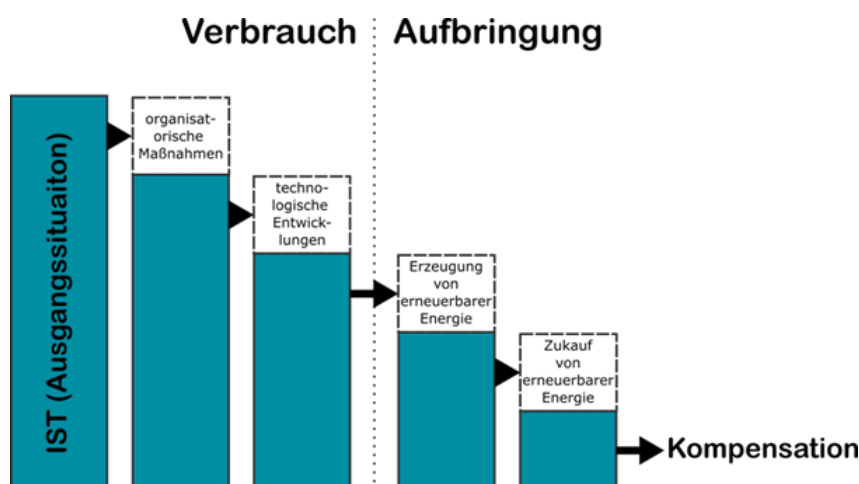


Abb. 2.12: Schritte zur Vermeidung, Verringerung und Kompensation von CO₂ (Quelle: modifiziert nach Obernosterer et al. [60, S. 45])

die selbst nur einen Bruchteil der Gesamtkosten ausmacht, einen maßgebenden Einfluss auf die Entwicklung der Kosten während der nachfolgenden Lebenszyklusphasen. Ähnlich verhält sich dies mit den beiden anderen Säulen der Nachhaltigkeit. Die recherchierten Maßnahmen haben naturgemäß rein organisatorischen Charakter.

Über die Genehmigung eines Infrastrukturprojektes entscheidet die *Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)*. Diese Prüfung beurteilt die Auswirkungen eines Projektes auf die Umwelt. Dies geschieht in einem mehrstufigen Verfahren unter der Beteiligung von Stakeholdern sowie der Öffentlichkeit. Von den Projektwerbern vorgelegt werden müssen neben den Unterlagen über die Zustimmung der Grundstückseigentümer, sowie einer Plandarstellung des Unterfangens, auch die Umweltverträglichkeitserklärung. In ihr enthalten sind:⁴⁹

Beschreibung des Vorhabens nach Standort, Art und Umfang: Neben den Eckdaten des Projektes wird der Flächenbedarf, das Bodenschutzkonzept, Art und Menge der verwendeten Materialien, Ressourcen, Rückstände und Emissionen erläutert. In diesem Abschnitt ist auf die Anfälligkeit für Risiken einzugehen.

Beschreibung der geprüften Lösungsmöglichkeiten: Im Falle des Tunnelbaus betrifft dieser Punkt insbesondere die Trassenfindung bzw. die untersuchten Trassenvarianten. Auswahlgründe sowie ein ganzheitlicher Vergleich müssen gegeben werden.

Beschreibung der beeinträchtigten Umwelt: Unter dem Begriff Umwelt fallen Menschen, Tiere und Pflanzen sowie deren Lebensräume, die durch das Projekt beeinflusst werden.

Beschreibung der Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt: In diesem Bestandteil der UVP wird auf den Bau und Betrieb des Vorhabens und den damit verbundenen Beeinflussungen eingegangen. Darunter zählen die Nutzung natürlicher Ressourcen, Emissionen von Schadstoffen, Lärm, Erschütterungen, Licht, Wärme, der Menge und Entsorgung des Abfalls, sowie Risiken des Projektes.

Beschreibung der zur Ermittlung der Umweltauswirkungen angewandten Methoden: Für die ermittelten Auswirkungen muss dargelegt werden, welche Berechnungen hinter den Ergebnissen liegen.

⁴⁹Vgl. [7] BMK

Beschreibung der Kompensationsmaßnahmen: Unter diesem Punkt werden jene Maßnahmen beschrieben, welche die oben erwähnten Auswirkungen ausgleichen. Gegebenenfalls werden Präventiv- und Minderungsmaßnahmen angegeben.

Am Schluss der Umweltverträglichkeitserklärung wird eine Zusammenfassung der oben genannten Inhalte gegeben. Verwendete Quellen sind anzugeben. Durch die gestellten Anforderungen innerhalb eines UVP-Verfahrens besitzt man nicht nur ein Werkzeug zur Steuerung der Auswirkungen eines Projektes auf die Umwelt, sondern zusätzlich das Teilnahmerecht der Stakeholder und damit eine soziale Beeinflussbarkeit.

Das interdisziplinäre Zusammenwirken der Interessenvertreter ist der Grundstein für die *integrale Planung* von Bauwerken. Durch die gemeinsame Bearbeitung des Projektes werden mögliche Optimierungen und Missstände gleichermaßen erkannt und rechtzeitig entsprechende Maßnahmen gesetzt. Eine Planung in Richtung einer optimierten Nutzungsphase von Tunneln ist besonders wichtig, da Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen mit hohen Kosten und Umständen verbunden sind. Eine mögliche Stellschraube ist hierbei die Streckenführung. Anhand des Beispiels des Brenner-Basistunnels konnte durch eine alternative Trassierung die Anzahl der eingesetzten Weichen in einem Abschnitt des Tunnels von 26 auf 6 Stück verringert werden. Diese Maßnahme wirkt sich auf die weiteren Phasen des Bauwerks positiv aus.⁵⁰

Mit *Nachhaltigen Vergabekriterien* werden geeignete Bauunternehmen für die Ausführung der Bauleistung gefunden. Neben der expliziten Formulierung von Vergabekriterien, wie beispielsweise einer maximalen Distanz der Transportkilometer für Materialien, gibt es bereits erste Ansätze zu alternativen Bewertungssystemen. In diesen werden die Leistungspositionen nicht nur mit Preisen für die Leistung an sich, sondern zusätzlich mit Preisen aus den CO₂-Äquivalenten, die durch die Erstellung der Leistung entstehen, versehen. Je geringer der CO₂-Fußabdruck ist, desto geringer ist der einzutragende Preis. Gleichzeitig mit einer ökologischen Bauweise sinkt somit der Gesamtpreis, was sich auf den Wettbewerb auswirkt.⁵¹

2.4.3 Herstellungsphase (Modul A1–A3)

Obwohl sie nur einen Bruchteil des gesamten Lebenszyklus ausmacht, wird ein großer Anteil der CO₂-Emissionen in dieser Phase emittiert. Zurückzuführen ist das auf die Herstellung der benötigten Baumaterialien. Allen voran stehen Beton und Stahl.

Technische Maßnahmen

Aufgrund des jährlich steigenden Bedarfs an Zement um ca. 7,2%⁵² und einer gleichzeitig immer größer werdenden Rohstoffknappheit wird die Richtung der *ökologischen Herstellung von Zement* eingeschlagen. Durch die Komponenten Klinker und Zumahlstoffe gibt es zwei Stellgrößen, an denen justiert wird. So werden zukünftig Zemente, wie der CEM II/C und der Kompositzement CEM VI, mit einem wesentlich geringeren Anteil an CO₂-intensiven Klinkern eingesetzt. Das geht in Abb. 2.13 hervor.⁵³ Darin ist illustriert, dass die Heute am meisten eingesetzten, klinkerintensiven Zementsorten CEM II/A+B mit einem Anteil von 83% zukünftig nur mehr einen 20%igen Anteil haben werden. Mit zusammengezählt 65% werden der CEM II/C (40%) und der CEM VI (25%) den Löwenanteil an den Zementen von Morgen halten. Alternative Zumahlstoffe und Grundmaterialien für Zement wie Bambusasche⁵², Schlacke und Puzzolan⁵⁴ können einen Großteil der Emissionen, bei gleichen technischen Eigenschaften wie herkömmliche Zemente,

⁵⁰Vgl. [19] Eckbauer et al., S. 606 ff.

⁵¹Vgl. [80] Püstow et al., S. 10 ff.

⁵²Vgl. [43] Ikeagwuani et al., S. 1 ff.

⁵³Vgl. [104] Walldl und Papsch, S. 3 ff.

⁵⁴Vgl. [102] Voit et al., S. 17

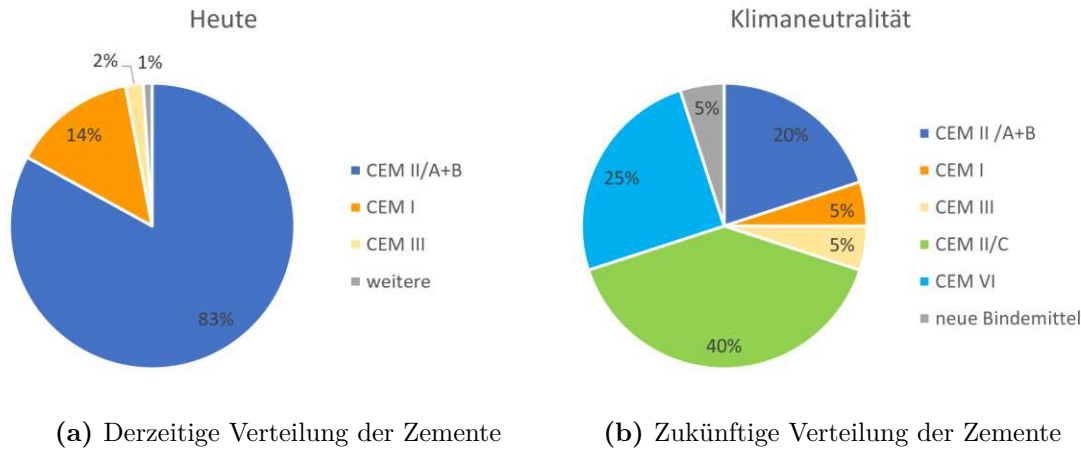


Abb. 2.13: Entwicklung der eingesetzten Zemente (Quelle: modifiziert nach Waldl und Papsch [104, S. 4])

einsparen. Um die Einsparung zu beziffern, ist in Tab. 2.2 beispielhaft die Zusammensetzung der Bestandteile der heute eingesetzten Zementsorte CEM II/B-M sowie den zukünftigen Zementsorten CEM II/C-M und CEM VI (S-L) aufgelistet. In der Tabelle geht klar hervor, dass die neuartigen Zementsorten mit einem deutlich geringeren Anteil an Klinker auskommen. Zum Beispiel liegt der Mittelwert des Klinkeranteils beim CEM II/B-M bei 72%, CEM I/C-M bei 57% und jener des CEM VI (S-L) bei 42%. Um den geringeren Anteil zu kompensieren, werden mehr Zumahlstoffe verwendet. Der Anteil der Nebenbestandteile bleibt unverändert.

Tab. 2.2: Zusammensetzung der Zementsorten CEM II/B-M, CEM II/C-M und CEM VI (S-L) (Quelle: modifiziert nach Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie [99])

Haupt- zement- art	Bezeich- nung	Kenn- zeich- nung	Zusammensetzung: Massenanteil in Prozent				Neben- bestandteile
			Klinker K	Hütten- sand S	Flugasche V kieselsäure- reiche V	Kalkstein K	
II	Portland- komposit- zement	II/B-M	65-79		21-35		0-5
		II/C-M	50-64		36-50		0-5
VI	Komposit- zement	VI (S-L)	35-49	31-59	-	6-20	0-5

Die Dekarbonisierung der Stahlherstellung erfolgt auf zwei wesentlichen Pfaden: der Umstellung auf Elektrolichtbogenöfen und der Direktreduktion durch CO₂-neutrale Gase wie H₂ und Bio-CH₄. Diese Änderungen gehen mit einer kostenintensiven Umstellung einher. Die Energie, die für den Betrieb der Elektrolichtbogenöfen und die Herstellung der CO₂-neutralen Gase verwendet wird, muss, für eine positive Ökobilanz, aus erneuerbaren Quellen stammen. Schon heute wird durch die Zugabe von Schrott die Energieintensität und damit die Kosten und Emissionen von Stahl verringert.⁵⁵

Eine weitere Maßnahme ist der Einsatz neuartiger Materialien. Ein konkretes, tunnelbezogenes Beispiel hierfür ist der Einsatz von hochfesten Ankern zur Sicherung des Tunnels. Durch eine 80% höhere Tragkraft bezogen auf den Ankermeter können 44% Stahl und somit CO₂-Emissionen

⁵⁵Vgl. [18] Diendorfer et al., S. 26 ff.

eingespart werden. In Kombination mit der Zugabe von recycelten Stahl wird eine 85%ige Reduktion der Treibhausgas-Emissionen bei der Herstellung der Anker erzielt.⁵⁶

Organisatorische Maßnahmen

Oftmals fehlt für den Einsatz der neuartigen Baustoffe die *rechtliche Grundlage*. Vor allem neuartige Zemente, wie der CEM VI und CEM V zeigen in der Praxis bereits Anwendbarkeit,⁵⁷ sind aber in Österreich derzeit noch nicht bewilligt.

Durch die *Optimierung der Herstellungsprozesse* der Baumaterialien, wie beispielsweise die Umstellung der Mahlprozesse bei der Herstellung von Klinkern,⁵⁸ können weitere wertvolle humane, monetäre und energetische Ressourcen gespart werden.

2.4.4 Errichtungsphase (Modul A4–A5)

Für die Realisierung von Baustelleneinrichtung, Transport auf und zur Baustelle und Vortrieb ist eine große Menge an technischen Equipment notwendig. Damit ist die Errichtungsphase die geräteintensivste des Lebenszyklus. Sie hat im gleichen Zug das größte Potential zur Optimierung in diesem Bereich. Aufgrund der enormen anfallenden Menge ist ein besonderes Augenmerk auf das Management des Aushubmaterials zu legen. Aus organisatorischer Sicht ist ein Baubetrieb nach den LEAN-Prinzipien ein nachhaltiger Ansatz.

Technische Maßnahmen

Ein Ansatz zur Verringerung der Material-Emissionen ist schlichtweg der Einsatz von weniger Material. Dies ist beim zyklischen Vortrieb durch die *Optimierung der Spritzbetonschale* realisierbar. Durch die Verbesserung des Sprengvortriebs mithilfe von computergesteuerten Bohrwägen werden nicht nur gleichmäßigere Betonschalen geschaffen, sondern es ergeben sich auch Vorteile wie eine regelmäßige Ausbildung von Rissen bei höherer Traglast und geringere Kosten aufgrund des reduzierten Materialeinsatzes.⁵⁹

Die Vorgänge beim maschinellen Tunnelbau laufen bereits mit deutlich reduzierten Personalbedarf ab. Dennoch gibt es arbeitstechnisch optimierbare Prozesse. Tübbinge werden mit großem Personalbedarf hergestellt. *Industrieroboter zur Tübbingproduktion* sollen Arbeiter entlasten. Der aufwendige Schritt des Bewehrens kann durch die Unterstützung von Robotern zukünftig zu einer Verbesserung der Arbeitsbedingungen und Produktivität, Verringerung der Transportwege und einer Reduzierung der Personalkosten beitragen.⁶⁰ Heute bereits im Einsatz sind Industrieroboter zur Manipulation und Stellung der Schalung. Ein solcher Roboter ist in Abb. 2.14 zu sehen. Im Betracht zu ziehen sind die hohen Investitionskosten und der anfangs hohe Ressourceneinsatz bei Beschaffung eines Roboters. Unabdingbar beim Einsatz von Robotern ist der nahtlose digitale Übergang von der Planung bis hin zur Herstellung der Tübbinge.⁶⁰

Naturgemäß werden während des Vortrieb eines Tunnels enorme Massen an Ausbruchmaterial bewegt. Bei Projekten wie dem Brenner Basistunnel belaufen sich die Zahlen auf 45 Mio. Tonnen Aushub, wobei 25 Mio. Tonnen auf die österreichische Seite entfallen.⁶¹ Der Ansatz liegt somit nahe, dieses Material nicht als Abfall zu behandeln, sondern durch die *Verarbeitung des Ausbruchmaterials* eine neue Rohstoffquelle zu schaffen. Um dies zu ermöglichen, ist ein umfangreiches geologisches Wissen über das abzubauen Material nötig. Damit wird der spätere Anwendungsbereich abgeschätzt.⁶² Nicht nur die Geologie selbst spielt eine Rolle. Die Vortriebs-

⁵⁶Vgl. [30] Geomechanics and Tunnelling, S. 19

⁵⁷Vgl. [102] Voit et al., S. 17

⁵⁸Vgl. [104] Waldl und Papsch, S. 3 ff.

⁵⁹Vgl. [14] Cordes und Voit, S. 90 ff.

⁶⁰Vgl. [54] Mayer et al., S. 209

⁶¹Vgl. [101] Voit et al., S. 1 ff.

⁶²Vgl. [100] Voit und Kuschel, S. 2 ff.



Abb. 2.14: Tübbingroboter der Firma Herrenknecht beim Schalen (Quelle: Englert [20])

art hat wesentlichen Einfluss auf die Korngrößenverteilung und Form des Materials. So sind beim zyklischen Vortrieb größere unregelmäßige Gesteinskörnungen zu erwarten, während im kontinuierlichen die typisch geformten *Chips* Produkt des Vortriebs sind.⁶² Je nach Eignung des Materials kann es nach entsprechender Nachbehandlung genutzt werden als:⁶³

- Gesteinskörnung für Beton, z.B. Tübbinge oder Spritzbeton
- Hinterfüllung
- Vorlastschüttung
- Landschaftsbau.

Das Optimum wäre ein vollkommener Massenausgleich innerhalb des Projektes. Eine Deponierung von Material ist aufgrund der großen Kosten sowie strengen Umweltauflagen möglichst zu vermeiden.

Organisatorische Maßnahmen

Die Integration der Prinzipien von *Lean Management* stellt einen auf allen Ebenen nachhaltigen Ansatz dar. Die wesentlichen Grundgedanken dieses Konzeptes sind Kundenzufriedenheit, Einbeziehung der Mitarbeiter und Lieferanten, Schaffung von standardisierten Prozessen, kontinuierliche Verbesserung des Gesamtsystems und Vermeidung jeglicher Verschwendung. Das Ziel ist das Erreichen höchster Produktivität und Qualität.⁶⁴ Auf den Tunnelbau umgelegt sind das beispielsweise Maßnahmen zur⁶⁵:

- Reduktion des Maschinenstillstandes
- Reduktion von nicht wertschöpfenden Tätigkeiten
- Steigerung der Kooperation
- Steigerung der Produktivität.

⁶³Vgl. [21] Erben und Galler, S. 403

⁶⁴Vgl. [34] Goger, S. 99 ff.

⁶⁵Vgl. [26] Fentzloff et al., S. 289

2.4.5 Nutzungsphase (Modul B1–B8)

Aufgrund ihrer Dauer von bis zu 200 Jahren kommt der Nutzungsphase im Tunnelbau besondere Bedeutung zu. Das wird deutlich, wenn man den Verbrauch an elektrischer Energie für beispielsweise Autobahn- und Schnellstraßentunnel betrachtet. Die ASFINAG [2] hat für ihre Infrastrukturanlagen einen jährlichen Stromverbrauch von 135 GWh. Davon entfallen 99 GWh auf Tunnelbauwerke, wie aus Abb. 2.15 zu entnehmen ist. Mit den in Kapitel 2.3 recherchierten 406 km Tunnel des Autobahn- und Schnellstraßennetz, die sich momentan in Betrieb befinden, ergibt sich ein jährlicher Strombedarf von etwa 245 kWh pro Meter Tunnel. Davon entfallen laut ASFINAG 75% auf die Beleuchtung. Während des Betriebs des Tunnelbauwerks kann die

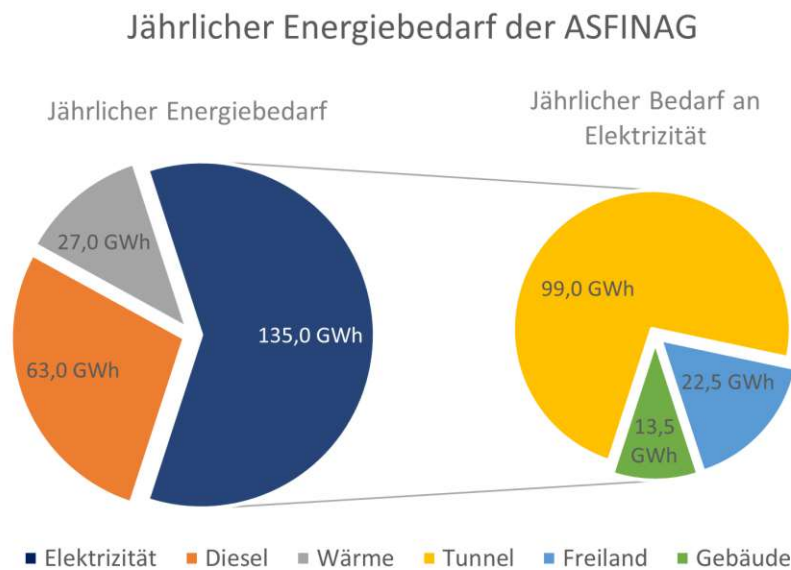


Abb. 2.15: Energieverbrauch der Asfinag (Quelle: modifiziert nach ASFINAG [2])

Nachhaltigkeit auf einer lokalen und globalen Ebene betrachtet werden. Lokal wird z.B. durch eine Optimierung der Tunnelausstattung oder Energieproduktion vor Ort die Bilanz verbessert. Global gesehen kommt es durch die unterirdische Streckenführung zur Entlastung oberirdischer Strukturen, sowie einer Verlagerung der Verkehrs-Emissionen, wie Lärm, in den Tunnel.

Technische Maßnahmen

Wie bereits erwähnt entfallen ca. 75% des Energiebedarfs, demnach rund 184 kWh pro Meter Tunnel im Jahr, auf die Beleuchtung. Ein großes Thema in der Literatur sind somit *neuartige Beleuchtungskonzepte*. Diese können mit LED-Lampen umgesetzt werden. Neben dem geringeren Energiebedarf zeichnen sich diese Lampen durch eine längere Lebensdauer und somit geringere Instandhaltungskosten aus. Ein weiterer Ansatz ist eine durch Sensoren steuerbare Beleuchtung. Wenn sich kein Fahrzeug im Tunnel befindet, schaltet sich diese aus. Reflektierende Straßenbeläge können 20% der Leuchtkörper einsparen.⁶⁶

Neben der Beleuchtung spielt *effiziente Belüftung* eine bedeutende Rolle. Durch die Erneuerung bzw. den Einbau von Ventilormotoren mit höherer Effizienz werden CO₂-Emissionen um bis zu 8% reduziert. Nicht nur der energietechnische Standpunkt ist zu betrachten. Sicherheitstechnische Aspekte dürfen nicht vernachlässigt werden, wenn bedacht wird, dass 70% der Todesfälle bei

⁶⁶Vgl. [77] Peeling et al., S. 4 ff.

Feuern im Tunnel durch Rauch verursacht werden. Durch eine geschickte Belüftungsführung können Rauch- und Hitzeentwicklung kontrolliert werden.⁶⁷

Zur Deckung des Strombedarfs wird die *Erzeugung von erneuerbarer Energie* vor Ort benötigt. Eine Technologie, die sich in der Literatur großer Beliebtheit erfreut, ist der Einsatz von Photovoltaik-Paneele.⁶⁸ Da es sich bei Tunnel um unterirdische Bauwerke handelt, können die Paneele lediglich an Tunnelportalen oder Galerien befestigt werden. Für Straßentunnel gibt es die Möglichkeit, kinematische Bremsenergie, über in der Fahrbahn eingebaute Platten, zu elektrischer Energie umzuwandeln. Durch das Bewegen der Platte erzeugen Zahnräder ein Drehmoment für den Betrieb eines Generators. Jährlich werden bis zu 120 kWh Strom pro Platte produziert.⁶⁹

Die Tatsache, dass Tunnel im direkten Kontakt zum umgebenden Untergrund stehen, wird sich bei den sogenannten *Energietunnel* zunutze gemacht. Tunnelschalen und -ausbauten, genauso wie Anker, werden durch Anbringen von Absorberschläuchen geothermisch aktiviert. Die so gewonnene thermische Leistung beläuft sich zwischen 53–74 W/m² Ausbau. Diese kann zum Heizen und Enteisen im Winter und Kühlen im Sommer genutzt werden.⁷⁰ Wie ein solches System für den Vortrieb mit einer TBM mit Tübbingausbau aussieht, ist in Abb. 2.16 illustriert. In den Tübbingungen verbaut sind die Absorberschläuche, die, unter den einzelnen Tübbingungen und Ringen, koppelbar sind. Die Schläuche leiten in eine Hauptleitung ein, in der das Transportmedium zur Wärmepumpe hin und zurück gepumpt wird.

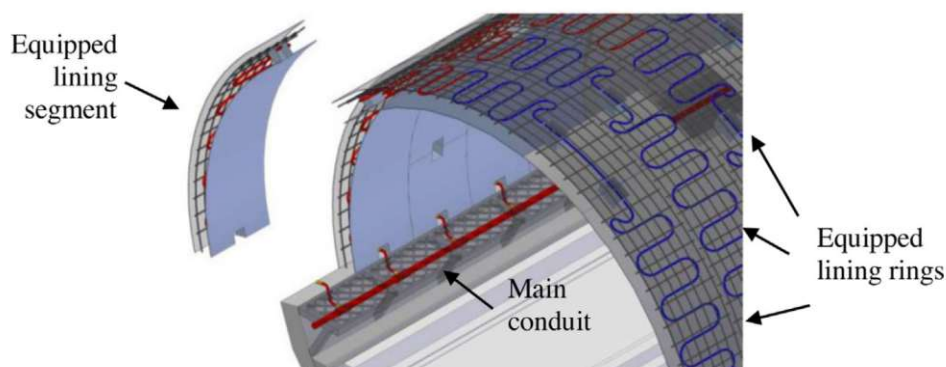


Abb. 2.16: Tübinge als geothermische Elemente (Quelle: Barla et al. [3, S. 3])

Die Nutzungsphase beinhaltet die arbeitsintensive Instandhaltung und Instandsetzung. Diese werden zukünftig durch Einsatz von *computerbasierten Analysen von Bildern in Kombination mit KI* vereinfacht. Anhand eines Pools an Bildern kann die KI auf typische Schadensbilder in einem Tunnel trainiert werden. Solche Technologien sind bereits in Japan im Einsatz.⁷¹

In Kombination mit der oben genannten Technologie zeigen *Roboter zur Begehung von Tunnel* großes Potential. Mögliche Einsatzgebiete sind beispielsweise die Vermessung, Beurteilung des Tunnels oder gefährliche Arbeiten. Damit können Arbeiter unterstützt und die Arbeitssicherheit gesteigert werden.^{71, 72}

⁶⁷Vgl. [25] Fang et al., S. 1 ff.

⁶⁸Vgl. [77] Peeling et al., S. 4 ff.

⁶⁹Vgl. [47] Jiang et al., S. 9

⁷⁰Vgl. [3] Barla et al., S. 1

⁷¹Vgl. [41] Huang et al., S. 23 ff.

⁷²Vgl. [17] Der Standard

Organisatorische Maßnahmen

Die organisatorischen Maßnahmen umfassen die *intelligente Verkehrsführung*. Diese kann einerseits durch dementsprechende Tunnelausstattung, wie z.B. frühzeitige Unfallerkennung und -warnung, und andererseits durch im Fahrzeug verbaute Technologie geschehen. Beispiele dafür sind automatische Geschwindigkeitsanpassung, automatische Scheinwerfereinstellungen und visuelle on-board-Informationen im Fahrzeug betreffend den Tunnel.⁷³

2.4.6 Entsorgungsphase (Modul C1–C4)

Der Entsorgungsphase des Tunnels kommt eine untergeordnete Rolle im Lebenszyklus zu. So befindet sich beispielsweise ein Großteil der erbauten Eisenbahntunnel noch im Einsatz. Jener Teil, der nicht mehr im Betrieb ist, wird meist stillgelegt und nicht rückgebaut.⁷⁴ Dieser Sachverhalt geht aus Abb. 2.17 hervor. Darin ist die Anzahl der Eisenbahntunnel in ihrem jeweiligen Ausbauzustand gegeben.



Abb. 2.17: Anzahl der Eisenbahntunnel im jeweiligen Zustand (Quelle: modifiziert nach Brill [10])

Der Tunnelbau nimmt eine Sonderstellung ein, da das zu entsorgende Material, in Form von zu deponierenden Aushub, bereits während der Errichtungsphase des Bauwerks anfällt. Im Sinne der wichtiger werdenden Kreislaufwirtschaft gilt es sich nicht nur zu überlegen, was aus dem Tunnel ausgebrochen, sondern ebenfalls was in den Tunnel eingebaut wird. Somit kommt den eingesetzten Ausbaumaterialien Bedeutung zu. Im Falle eines Rückbaus muss also überlegt werden, was mit diesen Materialien passiert. Weiter gibt es Maßnahmen, die den Lebenszyklus als Ganzes umspannen und die Entsorgungsphase miteinschließen. Einige konkrete Möglichkeiten werden im nachfolgenden Kapitel aufgezeigt.

2.4.7 Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen (Modul D) und sonstige Maßnahmen

In diesen Abschnitt werden die Maßnahmen aufgelistet, die sich außerhalb der Systemgrenzen befinden. Ebenfalls genannt werden jene Maßnahmen, die sich aufgrund ihrer Charakteristik über mehrere Phasen oder den gesamten Lebenszyklus erstrecken. Das betrifft vor allem organisatorische Maßnahmen mit ganzheitlichem Ansatz.

⁷³Vgl. [77] Peeling et al., S. 5

⁷⁴Vgl. [10] Brill

Technische Maßnahmen

Alternative Antriebe für Baugeräte spielen in der Herstellungs-, Errichtungs- Nutzungs- und gegebenenfalls Rückbauphase eine immer größer werdende Rolle. Egal ob für die Logistik während der Bauphase, den Transport auf der Baustelle, oder die Instandhaltung der Tunnelbauwerke, immer mehr Geräte werden nicht mehr mit fossilen Kraftstoffen betrieben. Die alternativen Antriebsmöglichkeiten können unterschieden werden in:

Elektrischer Antrieb: Die Stromversorgung erfolgt je nach Gerät entweder durch ein Stromkabel, einen on-board Akku oder im Falle mancher Aufbereitungsanlagen durch eine Photovoltaik auf dem Gerät selbst.⁷⁵ Besonders akkubetriebene Geräte gliedern sich nahtlos in den Baubetrieb ein. Ein Problem dieser Geräte ist jedoch die geringe Energiedichte der heutzutage verfügbaren Akkus. Großgeräte sind somit lediglich kabelelektrisch betreibbar. Eine weitere Frage, die es zu klären gilt, ist jene der Stromversorgung auf Baustellen ohne Anschluss an das elektrische Netz. Hier gibt es bereits erste Einsätze von Wasserstoff-Generatoren,⁷⁶ die lokal CO₂-neutralen Strom produzieren. Besondere Herausforderungen bzgl. des Tunnelbaus stellt das Brandverhalten von Akkus dar. Diese Unsicherheiten können zu Hemmnissen gegenüber dem Einsatz von elektrischen Antrieben führen.⁷⁷

Wasserstoff-Brennstoffzellen-Antrieb: Dieser Art des Antriebs wird großes Potential für den Einsatz in LKW und somit dem Logistiksektor zugesprochen. Durch die ca. 3-mal höhere Energiedichte von Wasserstoff in Vergleich zu Diesel⁷⁸ können große Strecken bewältigt werden. Ein Problem dieser Technologie ist die notwendige Versorgungs-Infrastruktur. Die Schaffung einer solchen ist mit hohen Kosten verbunden. Eine weitere zu berücksichtigende Thematik in diesem Zusammenhang ist die Herstellung des Wasserstoffs selbst. Heutzutage werden knapp 95% des Wasserstoffs aus nicht erneuerbaren Quellen gewonnen. Dieser Prozentsatz soll durch die Erzeugung von Wasserstoff aus Elektrolyse gesenkt werden.⁷⁹

Antrieb mit alternativen Kraftstoffen: Durch den Einsatz von Kraftstoffen, wie z.B. Bio-Diesel, Pflanzenöl und E-Fuels, können bereits vorhandene Geräte ihre CO₂-Bilanz deutlich verbessern. Zwar emittieren sie im Einsatz der alternativen Kraftstoffe immer noch lokal CO₂, dieses wird im Idealfall global gesehen wieder zur Herstellung des Kraftstoffs verwendet.⁸⁰ Bei den meisten Geräten sind nur kleinere motorseitige Adaptionen zur Anpassung an die neuen Kraftstoffe nötig.

Hybrid-Antrieb: Hybride Antriebe sind in einer Vielzahl an Ausführungsformen vorhanden. Sie stellen eine Kombination aus zwei oder mehreren Antriebsformen dar. Ein beliebtes Beispiel ist der Einsatz von Verbrennungsmotoren als Hauptantrieb und elektrischen Nebenantrieben zur Abdeckung von Leistungsspitzen, oder z.B. für den Antrieb von Klimaanlage eines Gerätes. So werden Überdimensionierung der Verbrennungsmotoren und unnötige Leerlaufzeiten vermieden.⁸¹

Es muss beachtet werden, dass die Energie für den Betrieb des elektrischen Antriebs, für die Herstellung von Wasserstoff und für die Produktion der alternativen Kraftstoffe aus erneuerbaren

⁷⁵Vgl. [48] Keestrack

⁷⁶Vgl. [91] Testfuchs

⁷⁷Vgl. [51] Klüh und Leismann

⁷⁸Vgl. [40] Hilgers, S. 53

⁷⁹Vgl. [82] Roeb et al., S. 8

⁸⁰Vgl. [38] Helms et al., S. 41 ff.

⁸¹Vgl. [52] Lajunen et al., S. 5

Quellen stammt. Wenn dies nicht gegeben ist, fällt die Ökobilanz im Vergleich zu herkömmlichen Antrieben nicht besser oder sogar schlechter aus.⁸²

Überall dort, wo technische und organisatorische Maßnahmen nicht ausreichen, um den gesamten CO₂-Ausstoß zu verhindern, besteht die Möglichkeit des *Carbon Capture*. Hierbei wird der Atmosphäre CO₂ durch Absorption, Adsorption, Membranen oder chemisch entzogen. Die chemische Abscheidung von CO₂ eignet sich besonders für den Einsatz bei der Zementherstellung und ist somit für die Baubranche interessant.⁸³ Die weltweit größte Anlage zur Abscheidung von Kohlendioxid steht in Island und filtert jährlich bis zu 4000 Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre.⁸⁴ Dies geschieht mit Hilfe von Ventilatoren. Das mit Wasser gebundene CO₂ wird bis zu 1000 Meter in die Tiefe gepumpt, wo es mit dem Gestein ein Karbonat bildet und gespeichert wird. Dieser Prozess erfordert Energie. In genanntem Fall von Island wird diese durch ein nahegelegenes Geothermiekraftwerk bereitgestellt.⁸⁴ Für andere Anlagen ist eine CO₂-neutrale Energieversorgung ebenfalls erforderlich, um den Prinzipien von Carbon Capture zu entsprechen. Anderenfalls würde dies ad absurdum geführt werden.

Des Weiteren kann *Augmented Reality (AR)* über die gesamte Lebensdauer eines Tunnelbauwerks verwendet werden. Mithilfe von VR-Brillen oder mobilen Endgeräten mit entsprechenden Programmen werden reale Umgebungen um virtuelle Komponenten ergänzt.⁸⁵ In der Planungsphase bietet AR die Möglichkeit, Bauvorhaben für Stakeholder visuell zu präsentieren. Während der Errichtungsphase eines Bauwerks erfolgt eine Vor-Ort-Qualitätskontrolle mithilfe von visuellen Elementen. AR ermöglicht eine Zeitersparnis bei der Erhaltung von Bauwerken, da eine Suche nach benötigten Informationen entfällt.⁸⁶ Der Einsatz von AR unterstützt Feuerwehrleute im Tunnel. Bestimmte Geräte machen die Umgebungstemperatur sichtbar und erhöhen so die Sicherheit.⁸⁶

Organisatorische Maßnahmen

Für einen reibungslosen Übergang von den technischen zu den organisatorischen Maßnahmen muss an dieser Stelle die Erwähnung von *Building Information Modelling (BIM)* erfolgen. Durch den ganzheitlichen, interdisziplinären Ansatz sollen alle Projektbeteiligten an einem Modell arbeiten. Bei der gegebenen Komplexität von Tunnelbauwerken führt dies schnell zu Problemen. Die Literatur beschäftigt sich in diesem Zusammenhang vorrangig mit der Parametrisierung, Modellierung und Standardisierung von Tunnelmodellen.⁸⁷ Ein aktuelles Problem stellt die mangelnde Interoperabilität zwischen den Modellen dar.⁸⁸ Es ist beispielsweise nicht möglich, ein Modell für die Massenberechnung zur Bemessung der Innenschalen heranzuziehen. Eine Homogenisierung der Standards ist somit notwendig. Durch die Parametrisierung und Regelung des Detaillierungsgrades sowie des Umfangs der Daten wird vermieden, dass die Rechenzeit der Modelle zu lange wird und überflüssige Informationen für die Stakeholder entstehen.⁸⁸

Für die Beurteilung, ob ein Bauwerk nachhaltigen Kriterien entspricht, kommen vermehrt *Gebäudebewertungen* zum Einsatz. Zu den gängigsten Bewertungssystemen zählen:

- klimaaktiv
- Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – ÖGNB
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB bzw. Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft – ÖGNI

⁸²Vgl. [38] Helms et al., S. 12

⁸³Vgl. [98] Vaz et al., S. 4 ff.

⁸⁴Vgl. [76] Panko

⁸⁵Vgl. [31] Gerger et al., S. 4

⁸⁶Vgl. [31] Gerger et al., S. 12 ff.

⁸⁷Vgl. [22] Erharter et al., S. 2

⁸⁸Vgl. [55] Ninić et al., S. 1 ff.

- Leadership in Energy and Environmental Design – LEED
- Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology – BREEAM
- Haute Qualité Environnementale – HQE
- Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency – CASBEE
- Green Star.

Diese Zertifizierungen werden von unabhängigen Gutachtern erstellt und bieten einen schnellen Überblick darüber, wie ein Bauwerk in Bezug auf vorgegebene Kategorien abschneidet. Die Kriterien entsprechen der Taxonomie und erleichtern somit die Beurteilung des Bauwerks für Investoren. Eine Literaturrecherche hat gezeigt, dass bei den meisten Zertifizierungssystemen der Fokus auf der Nutzungsphase des Bauwerks sowie auf recycelbaren Materialien liegt. Die Errichtungs- und Entsorgungsphase werden, wenn überhaupt, nur gering berücksichtigt.⁸⁹

Am Anfang eines Projektes stellt sich die Frage der Finanzierung. Teil des europäischen Green-Deals ist die 2019 in Kraft getretene *Taxonomie* der Europäischen Union [23]. Diese Verordnung beschäftigt sich mit der Schaffung eines rechtlichen Rahmens, der die Bewertung von Finanzprodukten anhand ihrer Nachhaltigkeit erleichtern soll. So werden Produkte, darin eingeschlossen Bauleistungen, die den gesetzten Kriterien nicht entsprechen, schwerer oder überhaupt nicht finanzierbar. Die Taxonomie greift nicht nur auf der Ebene der Produkte. Auch jene des Unternehmens wird in Betracht gezogen. Damit eine Wirtschaftstätigkeit als *ökologisch* beurteilt wird, müssen alle der folgenden Kriterien erfüllt sein:⁹⁰

- Beitrag zur Verwirklichung eines oder mehrerer Umweltziele. Diese sind:
 - Klimaschutz
 - Anpassung an den Klimawandel
 - Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen
 - Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
 - Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
 - Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme
- Keine erhebliche Beschränkung eines oder mehrerer Umweltziele
- Es muss der soziale Mindestschutz ausgeübt werden
- Die Tätigkeit muss den technischen Bewertungskriterien, die die Kommission festgelegt hat, entsprechen.

Die technischen Bewertungskriterien basieren auf Schwellenwerten des jeweiligen Industriezweiges. Problematisch dabei ist, dass nicht alle Industriezweige – wie z.B. der Flugverkehr – unter die Taxonomie fallen. Ebenfalls zu bemängeln ist, dass nicht alle gesetzten Schwellenwerte mit dem klimaneutralen Pfad bis 2050 konform sind. Das führt dazu, dass Investitionen, die nicht Klima konform sind und damit durch die Taxonomie verhindert werden müssten, dennoch finanziert werden. Für den Tunnelbau sind keine Schwellenwerte gesetzt. Somit muss sich laut der Verordnung an den besten 10% des Sektors orientiert werden. Was das konkret bedeutet, ist zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Diplomarbeit seitens der Experten nicht geklärt.

⁸⁹Vgl. [50] klimaaktiv, S. 4 ff.

⁹⁰Vgl. [23] Europäische Union, S. 17

Alle Maßnahmen, die ein Unternehmen für Nachhaltigkeit ergreift, können unter dem Begriff der *Green Governance* zusammengefasst werden. Zukunftsorientierte Führung von Unternehmen ist von besonderer Bedeutung, da es durch falsch gesetzte Maßnahmen zum „Carbonlockin“, also dem Verfestigen von Infrastrukturen mit hohen Emissionsbedarf, kommt.⁹¹ CO₂-intensive Herstellungs- und Errichtungsverfahren bleiben durch falsche Orientierung eines Unternehmens erhalten und ein Ausbrechen aus diesen rigiden Strukturen ist nur schwer möglich. Damit das nicht passiert, haben große Unternehmen meist eigene Stabstellen, die sich mit solchen Themen auseinandersetzen.^{92, 93, 94} Damit dies in einen rechtlichen Rahmen gegossen wird, verpflichtet die Taxonomie-Verordnung seit 2019 Unternehmen die börsennotiert, von öffentlichen Interesse oder Banken und Versicherungen sind, zur sogenannten Non-Financial Reporting Directive (NFRD). Darin muss enthalten sein, wie viel Prozent des Umsatzes Taxonomie-konform sind. Die Ermittlung dieses Anteils ist beispielhaft in Abb. 2.18 gegeben. Zunächst wird geprüft, welcher Teil des Umsatzes Taxonomie-fähig ist. Anschließend werden anhand der technischen Kenn- bzw. Schwellenwerte die Umsätze ermittelt, die diesen Anforderungen entsprechen. Wenn diese Analyse den sozialen Mindestanforderungen nach den UN-Leitsätzen entspricht, wird die Summe des konformen Umsatzes gebildet. 2021 wurde die EU Richtlinie der NFRD nahtlos in

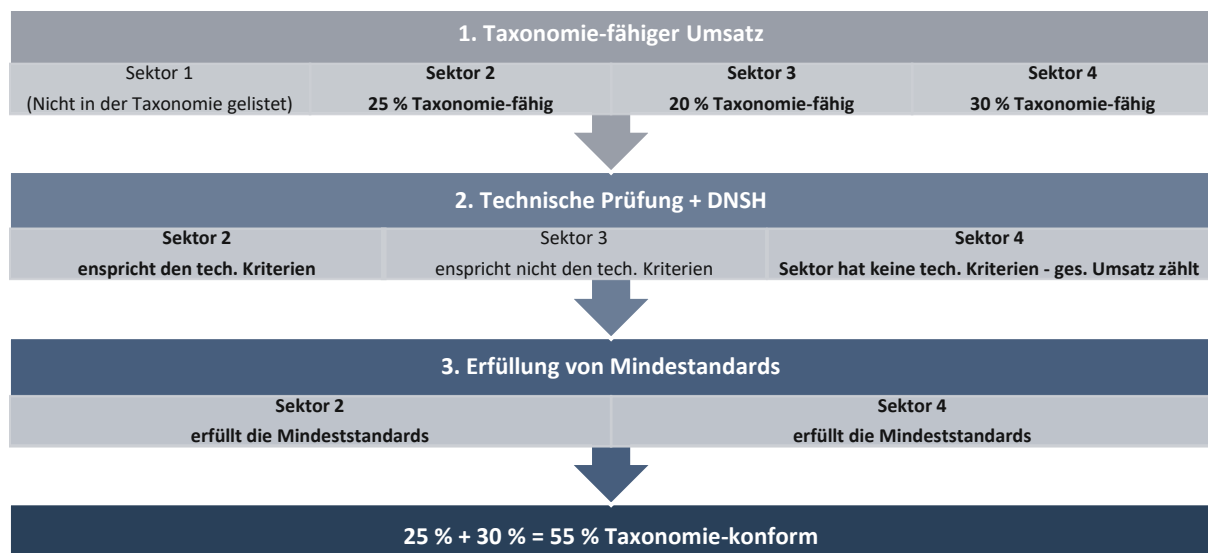


Abb. 2.18: CO₂ Bewertungsschritte des Taxonomie-konformen Unternehmensumsatz (Quelle: Friedrich und Wendland [27, S. 16])

die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) überführt, welche nun auch kleine und mittlere Unternehmen (KMUs) zur Berichterstattung verpflichtet.⁹⁵ Das Ziel der Verordnung besteht darin, mehr Transparenz bezüglich Nachhaltigkeit in der Wirtschaft zu schaffen. Ein Problem ist jedoch, dass es per Definition keine wirtschaftliche Tätigkeit gibt, die automatisch nachhaltig oder umweltfreundlich ist, sondern lediglich Taxonomie-konform oder nicht. Dies kann zu falschen Einschätzungen und Bewertungen führen.⁹⁵

⁹¹ Vgl. [45] Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 1 ff.

⁹² Vgl. [87] STRABAG

⁹³ Vgl. [79] PORR

⁹⁴ Vgl. [90] SWIETELSKY

⁹⁵ Vgl. [27] Friedrich und Wendland, S. 16 ff.

2.5 Maßnahmen im Zusammenhang mit der Nachhaltigkeit

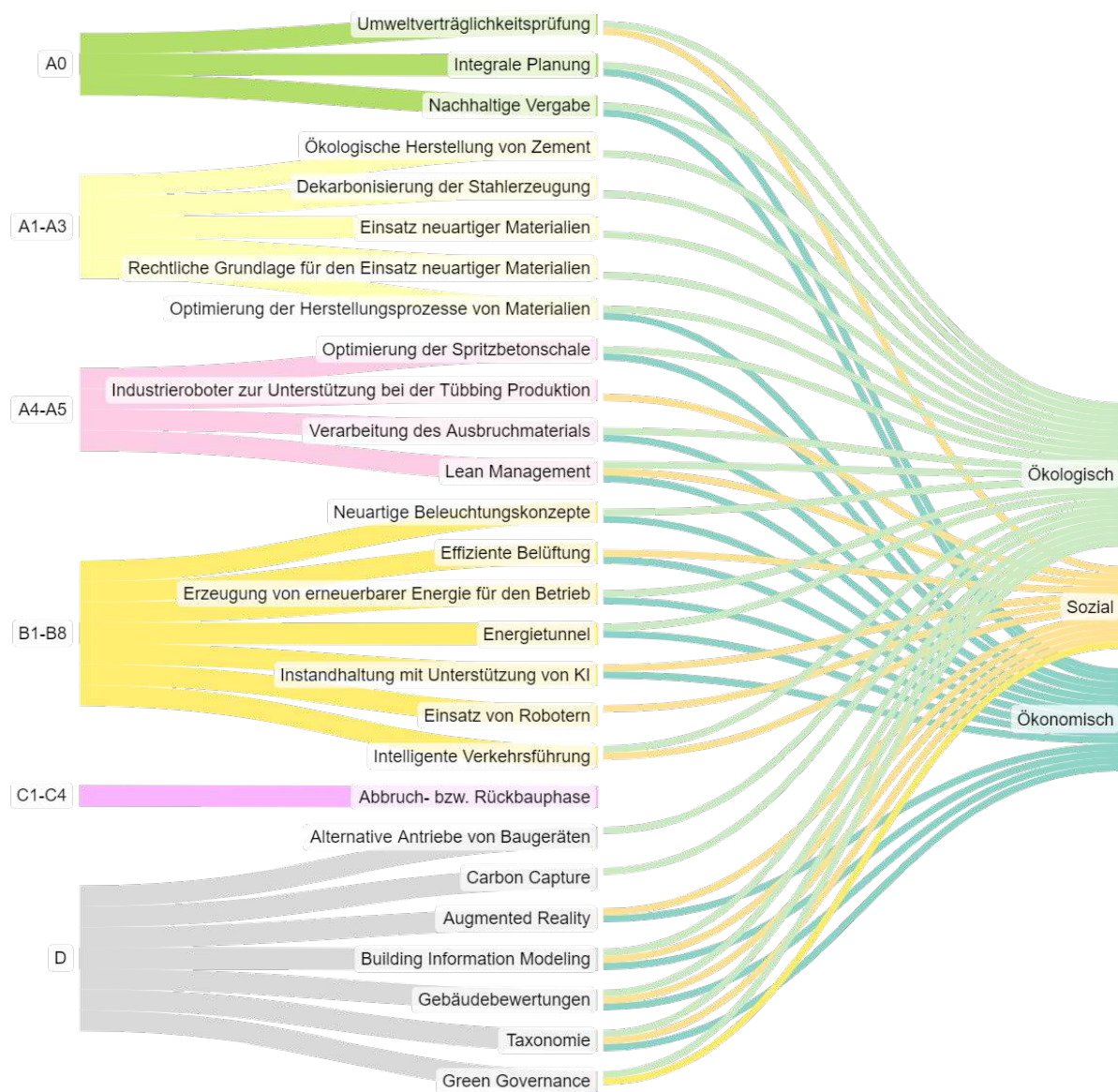


Abb. 2.19: Zuteilung der Maßnahmen nach Lebenszyklusphase bzw. - modul und den drei Säulen der Nachhaltigkeit

Die vorigen Kapitel haben die geeigneten Maßnahmen bereits in *organisatorisch* und *technisch* eingeteilt. In Abb. 2.19 werden sie dahin gehend beurteilt, ob sie zur ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeit beitragen bzw. diese verbessern. Wie sich zeigt, ist der ökologische Aspekt am stärksten vertreten. Ökonomische und soziale Gesichtspunkte kommen meist als Nebenerscheinung vor und treten nur selten alleine auf.

Die Planungsphase (Modul A0) beschäftigt sich ausschließlich mit organisatorischen Maßnahmen. Sie nehmen keinen direkten physischen Einfluss auf die Nachhaltigkeit. Die Entscheidungen, die während dieser Phase getroffen werden, haben Einfluss auf den späteren Lebenszyklus. Durch die Beteiligung der Öffentlichkeit wird die soziale Komponente während der Umweltverträglich-

keitsprüfung berücksichtigt. Ökonomische Auswirkungen haben die Integrale Planung, sowie die nachhaltige Vergabe.

Ersichtlich ist, dass in der Herstellungsphase (Modul A1–A3) naturgemäß ausschließlich Maßnahmen in Bezug auf Baumaterialien auftreten. Besonderes Potential wird hier den Materialien Beton und Stahl zugesprochen. Durch neue Rezepturen, innovative Herstellungsprozesse und hochfeste Werkstoffe werden Ressourcen eingespart. Diese Phase ist somit stark auf die ökologische Optimierung der Nachhaltigkeit bedacht.

Während der Errichtungsphase (Modul A4–A5) ist die Optimierung herkömmlicher Bauverfahren von zentraler Bedeutung. Dies wird erreicht durch die Verbesserung der Bauabläufe, wie z.B. bei Sprengvorgängen im zyklischen Vortrieb oder durch Unterstützung der Arbeiter bei der Tübbing-Produktion durch Roboter. Durch letztere Maßnahme wird der soziale Aspekt verbessert. Aufgrund der großen Menge an anfallendem Material spielt die Verarbeitung des ausgebrochenen Materials eine wichtige Rolle. Angestrebt wird eine vollständige Verwertung der Ausbruchmaterialien auf der Baustelle, um Transportkosten und teure Deponierung zu vermeiden. Durch die Anwendung der Grundsätze des Lean-Managements werden während des Baubetriebs alle Prinzipien der Nachhaltigkeit implementiert.

Der Fokus in Bezug auf die Nutzungsphase (Modul B1–B8) liegt auf der Tunnelausstattung. Durch effiziente Beleuchtungs- und Belüftungssysteme, die Erzeugung erneuerbarer Energie vor Ort und die geothermische Nutzung der Umgebung des Tunnels werden Betriebskosten und Emissionen eingespart. Somit wirkt es sich positiv auf die Ökologie und Ökonomie aus. Aufgrund der langen Zeitspanne dieser Lebenszyklusphase sind computergestützte Ansätze zur Instandhaltung und Verbesserung der Arbeitsbedingungen sowie der Sicherheit sehr beliebt. Letztere wird durch die Verbesserung der Kommunikation zwischen Tunnel und Fahrzeugen mittels intelligenter Verkehrssteuerung gesteigert.

Spezifisch für Abbruch- bzw. Rückbauphase (Modul C1–C4) selbst wurden keine Maßnahmen gefunden. Jedoch greifen einige technische und organisatorische Schritte der Vorteile außerhalb der Systemgrenzen (Modul D) in die Phase über. Prominentes Beispiel dafür sind Baugeräte mit alternativen Antrieben. Sie können bei der Herstellung von Baumaterial, der Errichtung und Instandsetzung des Tunnels, sowie gegebenenfalls dem Rückbau des Tunnels verwendet werden. Komplett entkoppelt vom eigentlichen Tunnelbauwerk ist der Ansatz der Carbon Capture. Durch diese Technologie können nicht vermeidbare CO₂-Emissionen, egal welchen Ursprungs, aus der Atmosphäre entzogen werden. Über die Prüfung der Unterlagen zur Genehmigung eines Projektes, über die Instandhaltung bis hin zum Einsatz während eines Brandfalls können Hard- und Software mittels Augmented Reality Stakeholder eines Tunnels unterstützen. Organisatorische Maßnahmen wie BIM und Gebäudebewertungen erstrecken sich über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Auf allen der Ebenen des Bauwesens greift die Taxonomie. Die Taxonomie wirkt auf allen Ebenen des Bauwesens. Von der Finanzierung von Projekten bis zur Berichterstattung von Unternehmen erstreckt sich ihr Einfluss über sämtliche Aspekte der Nachhaltigkeit. Dadurch integriert sie sich gleichermaßen in die Green Governance, welche als Ziel die Verbesserung sozialer und ökologischer Standards hat.

2.6 Zusammenfassung

Die Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels sind bereits *heute* spürbar. Um dieser Dringlichkeit des Handelns gerecht zu werden, wird durch das Pariser Abkommen, die Agenda 2030 und den European Green Deal internationaler Nachdruck verliehen. Die enthaltenen Forderungen zur Erreichung der gesetzten Klimaziele umfassen ein nachhaltiges Handeln in ökologischer, ökonomischer und sozialer Hinsicht. Nach diesen Prinzipien werden Bauprodukte, Bauleistungen

und Bauwerke über ihren gesamten Lebenszyklus bewertet und national sowie international verglichen. Je nach betrachtetem Aspekt stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung. Die ökologische Wirkung eines Bauwerks auf sein Umfeld wird mittels LCA abgeschätzt und mithilfe der LCC werden die Kosten über den Lebenszyklus berechnet. Dabei wird bestimmt, wann welche Art von Kosten entstehen. Die MCA ist verantwortlich für die Beschreibung und Bewertung der sozialen Auswirkungen eines Bauwerks. Durch die Zusammenführung der Informationen werden ganzheitliche Aussagen zur Nachhaltigkeit eines Bauwerks getroffen.

Besonders für den Tunnelbau bietet sich aufgrund seiner langen Nutzungsdauer eine ganzheitliche Betrachtung der Nachhaltigkeit an. Das internationale Regelwerk für die Bewertung ermöglicht einen standardisierten Vergleich von Tunneln in verschiedenen Ländern oder länderübergreifenden Tunnelprojekten. Der Bau von Infrastruktur spielt aufgrund der zunehmenden Verknüpfung von Wirtschaftsstandorten und der Förderung nachhaltiger Mobilität in Städten eine wichtige wirtschaftliche Rolle, sowohl heute als auch in Zukunft. Angesichts der Bedeutung dieser Aufgabe ist es wesentlich, verantwortungsvoll mit Ressourcen umzugehen. Wie diese Verknüpfung von Nachhaltigkeit und Tunnelbau baupraktisch aussehen kann, ist in vorhergehenden Kap. 2.4.3 bis Kap. 2.4.7 genau erklärt.

Zusammengefasst ist festzuhalten, dass es für den Tunnelbau bereits zahlreiche Maßnahmen gibt, welche die Notwendigkeit nach Infrastrukturbau und Nachhaltigkeit vereinen. Es gilt diese in den praktischen Baubetrieb zu integrieren. Dadurch kann ein Beitrag zur Erreichung der Klimaziele geleistet werden. Das Projekt RET ist ein weiterer Schritt in diese Richtung. Im folgenden Kapitel wird gezeigt, wie dieser optimierte Tübbing im Vergleich zu herkömmlichen Tübbing Ressourcen einspart.

Kapitel 3

Tunnelquerschnitt mit ressourceneffizientem Tübbing

Wie bereits im vorigen Abschnitt dargestellt, ist der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen aller Art der Grundgedanke des nachhaltigen Tunnelbaus. Vor diesem Hintergrund ist das Forschungsprojekt „RET“ entstanden. Ziel dessen ist die Entwicklung eines durch alternative Bewehrungsführung optimierten Tübbings. Um die Vorteile eines solchen Tübbings erarbeiten zu können, werden zu Beginn dieses Kapitels typische Funktionen, Auskleidungssysteme, Geometrien, Bemessung und weitere Aspekte der Fertigteile behandelt. Ein weiterer Schwerpunkt ist der Ringspalt, der sich zwischen dem Tübbingausbau und dem Gebirge befindet. Beide Elemente, Tübbingausbau und Ringspalt, sind feste Bestandteile des kontinuierlichen Vortriebs mit Schildmaschine. Dieses umfangreiche Einsatzgebiet macht den Vergleich eines herkömmlichen und ressourceneffizienten Tübbing interessant, da bereits kleine Einsparungen über die gesamte Länge eines Tunnels viel bewirken.

3.1 Tübbinge

Tübbinge sind Fertigteilelemente für den Ausbau im Tunnel. Meist bilden 4–8 Tübbinge einen Ring. Die Breite eines solchen Rings variiert zwischen 0,75–2,5 m. Die Stärke beläuft sich je nach Anforderung auf 0,15–0,75 m.⁹⁶ Den erforderlichen Abschluss zwischen den Segmenten bildet ein Schlussstein. Für eine satte Passform ist dieser meist keilförmig ausgeführt. In manchen Tübbingsystemen ist ein Sohltübbing vorgesehen. Dieser ist für eine umgehende Sohlbefestigung, die Ausbildung einer Fahrbahn und gegebenenfalls die Wasserableitung zuständig. Für die Fertigung kommen die folgenden Materialien in Frage:

- Stahlbeton
- Faserbeton
- Unbewehrter Beton
- Stahl.

In Österreich sind primär Stahlbeton-Tübbinge im Einsatz.⁹⁷ Durch die Verwendung von Stahlfasern in Teilen des Tübbings, bzw. im gesamten Tübbing, entfällt ein Großteil der herkömmlichen Bewehrung. Dennoch bleibt ein Teil der Stabbewehrung erhalten. Es kommt somit zur Ausbildung einer hybriden Bewehrung.⁹⁸ Stahltübbinge werden eingebaut, wenn extrem hohe Belastungen auf den Ausbau wirken, wie z.B. im Bereich von Störzonen im Gebirge. Aufgrund ihrer Eignung

⁹⁶Vgl. [16] DAUB, S. 10

⁹⁷Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 20

⁹⁸Vgl. [78] Petraroia et al., S. 98

zum Rückbau kommen sie bei Querschlägen in Verwendung. Waren Stahltübbinge früher noch aus Gusseisen gefertigt, werden sie heute meist aus gewalzten Stahlblechen hergestellt.⁹⁹

Ob Tübbinge überhaupt zum Einsatz kommen, hat stark mit den geologischen Gegebenheiten und dem eingesetzten Bauverfahren zu tun. Nicht alle TVMs benötigen sie für den Vortrieb und Ausbau, wie bereits in Kap. 2.3.2 dargelegt. So kommen bei einer offenen TBM, wenn überhaupt, nur Sohl-tübbinge zum Einsatz. Mit Ausnahme der TBM mit Doppelschild, bei der Tübbinge nur in Teilabschnitten des Tunnels verwendet werden, kommen bei allen Schildmaschinen Tübbinge zum Einsatz. Da die Lasten aus den Vortriebspressen sowie Steuerkräfte in den Tübbingring eingeleitet werden, müssen die Segmente auf diesen Lastfall bemessen werden. Neben der Aufnahme dieser Kräfte, erfüllt der Tübbing noch weitere Aufgaben.

3.1.1 Funktionen

Um zu wissen welche Aufgaben ein Tübbing erfüllt, muss Kenntnis über die Art des Ausbaus herrschen. Grundsätzlich einschaliger und zweischaliger Ausbau unterschieden werden. Bei Letzterem wird die Außenschale mittels Tübbing und die Innenschale in Ortbeton-Bauweise hergestellt. Allgemein gehören zu den Aufgaben und Funktionen der Tübbinge:^{100, 101}

- Sicherung der Hohlraumlaibung
- Tragsicherheit des Tunnelbauwerks
- Gebrauchstauglichkeit des Tunnelbauwerks (Dichtheit, Dauerhaftigkeit)
- Qualitätsanforderungen an das Tunnelbauwerk (z.B. Ebenflächigkeit, Glattheit,...)
- Aufnahme der Vortriebs- und Steuerkräfte
- Befestigung der Ausrüstungsteile.

Im Falle eines einschaligen Ausbaus übernimmt der Tübbing alle der oben stehenden Funktionen. Vorteil dieses Verfahrens ist, das unmittelbar nach Einbau die volle Tragfähigkeit gegeben ist. Das gilt auch für die Dichtheit. Mittels Dichtungsrahmen wird das Tunnelbauwerk durch Kompression der Abdichtungsprofile gegen ein- und austretendes Wasser abgesichert.¹⁰¹ Zu den weiteren positiven Aspekten der einschaligen Bauweise gehört, dass auftretende Leckagen, im Gegensatz zur zweischaligen Bauweise, leicht zu lokalisieren sind. Dementsprechend sind Gegenmaßnahmen schneller und besser durchführbar.⁹⁹

Abhängig davon, welche Funktionen der Innenschale beim zweischaligen Ausbau im Endzustand zukommen, muss der Tübbingausbau entsprechend ausgelegt werden. So übernehmen manche Innenschalen eingeschränkte Funktionen wie Brandschutz, Abdichtungs- und Anprallschutz.¹⁰⁰ Alle statischen Anforderungen müssen in diesem Fall durch den Tübbing abgedeckt werden. Ein positiver Aspekt der zweischaligen Bauweise ist, dass durch Folienabdichtung ein vollständig wasserdichter Ausbau hergestellt werden kann. Weiter bietet sich der Vorteil, dass Befestigungen im Tunnel, aufgrund des geringeren Planungsaufwands, günstiger herzustellen sind.⁹⁹

3.1.2 Auskleidungssysteme und Geometrie

Tübbinge können anhand der Ring- und Tübbinggeometrie unterschieden werden, wie es in Abb. 3.1 geschieht. Bei Ringen mit ebener Ringfuge wird stets eine gesamte Tübbingbreite, sprich

⁹⁹Vgl. [16] DAUB, S. 37 ff.

¹⁰⁰Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 20 f.

¹⁰¹Vgl. [16] DAUB, S. 10

ein ganzer Ring, eingebaut. Zu diesen Systemen zählen keilförmige Ringe und Parallelringe. Für Tübbinge mit versetzter Ringfuge wird die Hälfte einer Tübbingbreite vorgetrieben. Danach wird die erste Hälfte der Segmente, die für einen Ring gebraucht werden, eingebaut. Dieser Vorgang wiederholt sich fortlaufend. Da die sechseckigen Tübbinge in diesem System meist ident ausgeführt sind, müssen bei Kurvenfahrten die Differenzen durch Zwischenlager in den Fugen ausgeglichen werden. Aus diesem Grund ist es nicht ohne weiteres möglich, einen wasserdichten Ausbau zu realisieren.¹⁰² Auf der Ebene der Tübbinggeometrie lassen sich folgende Formen

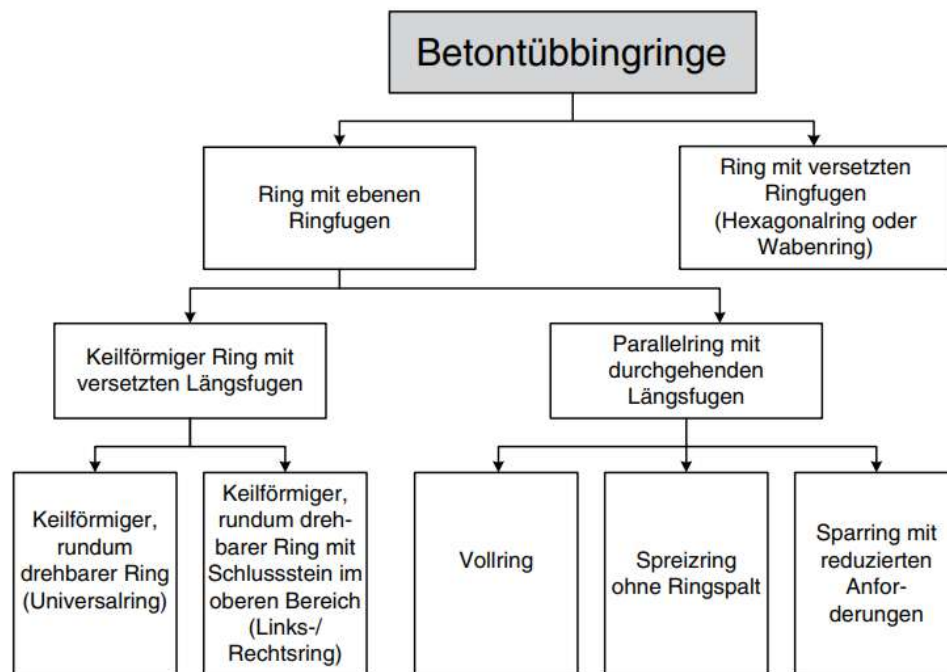


Abb. 3.1: Gliederung der Tübbinge nach Ebenheit der Ringfuge und Geometrie (Quelle: DAUB [16, S. 8])

unterscheiden.^{103, 102}

Universalring: Die keilförmigen Ringe des Universalsystems werden aus ein- oder zweiseitig zur Tunnelachse abgeschrägten Tübbinggen hergestellt. Da die Ringe um 360° verdrehbar sind, lassen sich Kurvenfahrten realisieren. Eine Schwäche dieses Systems besteht darin, dass keine Sohl-tübbinge verbaut werden können.

Links-/ Rechtsring: Bei diesem System kommen ebenfalls keilförmige Tübbinge zum Einsatz. Diese sind jedoch nur einseitig abgeschrägt. Durch den abwechselnden Einbau eines links- bzw. rechts abgeschrägten Rings, wird ein gerader Verlauf ermöglicht. Wenn mehrere rechts geneigte Ringe hintereinander angeordnet werden, entsteht eine Rechtskurve. Für Linkskurven gilt dasselbe Prinzip.

Vollring/ Parallelring: Dieses aus rechteckigen oder ein- bzw. beidseitig leicht konischen Tübbinggen bestehende System kann mit und ohne Korrekturringen gebaut werden. Mit Letzteren ist ein wasserdichter Ausbau möglich. Ohne kommt es aufgrund einer klaffenden Fuge zu undichten Stellen im System. Vorteil dieses Systems ist die einfache Bauweise und die Möglichkeit eines Sohl-tübbings.

¹⁰²Vgl. [16] DAUB, S. 8f

¹⁰³Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 23

Spreizring ohne Ringspalt: Wie der Name bereits verrät, wird der Querschnitt des aus rechteckigen Tübbingenden bestehenden Rings nach Einbau vergrößert. Dies geschieht mit einem keilförmigen Schlussstein, der schmaler ist als die Tübbingbreite. Nachdem die SM das Schild verlassen hat, wird dieser in den Ring geschoben und weitet diesen auf.

Hexagonalring/Wabenring: Die sechseckigen Segmente werden abwechselnd zwischen oben und unten sowie links und rechts aneinandergereiht. Ein dichter Ausbau ist mit diesem System nicht zu erreichen. Positiv zu erwähnen ist, dass aufgrund der stumpfen Ecken des Tübbings weniger Gefahr der Beschädigung der Ecken besteht.

3.1.3 Einwirkungen und Bemessung

Abhängig von der Funktion des Tübbings müssen verschiedene Bemessungsfälle berücksichtigt werden. Ein besonderes Augenmerk ist auf die einzelnen Bauzustände des Tunnels zu legen. Abhängig davon, ob es sich um einen ein- oder zweischaligen Ausbau handelt, kommen den Tübbingenden verschiedene Aufgaben zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu. Anhand der ermittelten Lastfälle und maßgebenden Kombinationen daraus, müssen die Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geführt werden.

Wie bei allen Bauwerken müssen ständige, veränderliche und außergewöhnliche Einwirkungen berücksichtigt werden. Für den Ausbau mit Tübbingenden gilt es im Speziellen, die veränderlichen Einwirkungen aus dem Bauzustand zu beachten. Dabei ist eine Gesamtbetrachtung von der Herstellung über die Lasten aus der NLE bis zu den Auftriebskräften aus dem Betonieren der Innenschale bei zweischaligem Ausbau erforderlich. Eine vollständige Auflistung der Einwirkungen ist in Tab. 3.1 gegeben.

Einige der in Tab. 3.1 genannten Einwirkungen fallen in den Wirkungsbereich der Österreichischen Forschungsgesellschaft für Straße, Schiene und Verkehr. Damit gelten die RVS-Richtlinien. Für die Verkehrslasten Obertage, zukünftige Bebauung, Aufschüttungen, Abgrabungen oder benachbarte Hohlräume gilt die *RVS 09.01.42 – Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung* [29]. Brandlasten werden in der *RVS 09.01.45 – Baulicher Brandschutz in Straßentunnel* [28] festgelegt. Explosionen werden projektspezifisch, oder anhand der *ÖNORM EN 1997-1-7 – Einwirkungen auf Tragwerke-Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen* [70] ermittelt.

Durch Vereinen von zusammengehörigen Einwirkungen werden Lastfälle gebildet. Die ungünstigste Einwirkungskombination wird zur Bemessung angesetzt. Diese hat auf Grundlage der *ÖNORM-EN-1992-1-1 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau* [71] für plattenförmige Tragwerke zu erfolgen. Die auf die Tunnelschale wirkenden Schnittgrößen werden mittels Finite Elemente Methode (FEM), Finite Differenz Methode (FDM) oder über das Modell des Tunnels als ein gebetteter Stabzug berechnet. Das Bettungsmodul ist dabei abhängig von der Steifigkeit sowie dem Radius des Tübbings. Da die einzelnen Tübbingsegmente mit Fugen verbunden sind, muss die Steifigkeit des Tübbingrings abgemindert werden.¹⁰⁴ Die Tragfähigkeitsnachweise werden in Längs- und Querrichtung für die Fugen geführt. Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise sind für die Rissbreiten und Verformungen des Tübbingsystems nachzuweisen.¹⁰⁴

3.1.4 Beton und Bewehrung

Wie bereits erwähnt wird ein Großteil der Tübbinge mit bewehrten Beton verwirklicht. Durch die Herstellung als Fertigteil in großen Stückzahlen werden hohe Qualitätsansprüche an die Werkstoffe

¹⁰⁴Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 31 ff.

Tab. 3.1: Einwirkungen auf Tübbinge (Quelle: modifiziert nach Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik [75, 12 ff.])

Ständige Einwirkungen
Eigengewicht
Gebirgslasten
Wasserdruck
Quell- und Schwelldruck
Rückstellkräfte zufolge Dichtungen, Schraubenkräfte
Bebauung
Zukünftige Bebauung/ Aufschüttung/ Abgrabungen/ benachbarter Hohlraum
Veränderliche Einwirkungen (Endzustand)
Verkehrslasten im Tunnel
Verkehrslasten Obertage
Druck- und Sogbelastung
Temperatureinflüsse
Innenwasserdruck
Veränderliche Einwirkungen und Einwirkungskombinationen aus Bauzuständen
Belastungen von der Herstellung der Tübbinge bis zum Einbau
Einbau und Vortriebskräfte
Stützdruck und Ringspaltverpressdruck
Gebirgsauflast im Firstbereich bei teilweise gebettetem Tübbingring
Aufschwimmen der Röhre im Verpressmörtel
Belastungen im Sohlbereich durch Nachläufereinrichtung und Logistiksysteme
Injektionsdruck durch nachträgliches Injizieren und Gebirgsverbesserung
Auftriebskräfte aus der Betonierung der Innenschale
Außergewöhnliche Einwirkungen
Anpralllasten
Brandlasten
Erdbeben
Fluten der Tunnelröhre
Explosion
Sonstige Katastrophenszenarien

und die Oberfläche gestellt. Diese werden nur dann erfüllt, wenn die Ausgangsstoffe, allem voran der verwendete Beton, den gesetzten Anforderungen genügen. Um das zu gewährleisten, ist ein ausführliches Qualitätsmanagement und Prüfsystem notwendig.

Beton

Normative Grundlage für die Herstellung und materialbezogene Eigenschaften von Tübbingungen bildet die *ÖNORM B 4710-Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität* [66]. Aufgrund der hohen Frühfestigkeiten, die zwecks Lagerung und Transport von Tübbingungen verlangt werden, wird meist eine höhere Festigkeitsklasse gewählt. In den meisten Fällen ist das C 40/50. Neben der Festigkeit sind die Expositionsklassen entsprechend den Bedingungen zu wählen. Grundsätzlich werden die Klassen unterschieden in:¹⁰⁵

- Kein Korrosions- oder Angriffsrisiko (X0n)
- Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Karbonatisierung (XCn)
- Wasserdurchlässigkeit (XWn)
- Bewehrungskorrosion ausgelöst durch Chloride (XDn)
- Frostangriff mit oder ohne Taumittel (XFn)

¹⁰⁵Vgl. [66], S. 23 f

- Chemischer Angriff (XAn)
- Und Verschleißbeanspruchung (XMn).

Wenn die Rahmenbedingungen nach keinen speziellen Expositionsclassen verlangen, ist zumindest XC2 zur Verhinderung der Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung einzusetzen. Diese Klasse wird für Betonbauwerke verwendet, deren Oberfläche größtenteils mit Wasser in Berührung kommt oder die sich im Bereich des Grundwasserwechsels befinden.¹⁰⁵ Ein weiterer wesentlicher Bestandteil von Beton ist die Gesteinskörnung, welche an die maßgebenden Bauteilabmessungen angepasst wird.¹⁰⁶ Damit werden Fehlstellen, wie die Bildung von Betonnestern, vermieden. Ein wichtiger Punkt für die Herstellung der Tübbinge ist die Konsistenz. Sie wird bei der Erstprüfung des Tübbings festgelegt. Als Ausgangspunkt wird eine steife Konsistenz – sprich C2 – angestrebt. Weicht die festgelegte Konsistenz zu sehr von der praktisch verwirklichten ab, muss die Erstprüfung wiederholt und eine neue Klasse bestimmt werden.¹⁰⁶

Zusätzlich zu den Materialeigenschaften ist die Oberfläche von großer Bedeutung. Deziert zu unterscheiden sind dabei die Anforderungen an die Bergseite und Hohlraumseite des Tübbings. Folgende Faktoren nehmen Einfluss:¹⁰⁶

- Bergseitig
 - Dauerhaftigkeit bei chemischem Angriff
 - Auswirkung auf die mechanischen Hebeeinrichtungen
 - Vorgaben der Maßgenauigkeit und Toleranzen
 - Art der Schildschwanzdichtung
- Hohlraumseite
 - Dauerhaftigkeit bei chemischem oder Tausalz-Angriff
 - Kavitationsgefahr in Wasserstollen
 - Anforderungen in Bezug auf Abdichtungen
 - Anforderungen an den Untergrund für Anstriche bzw. Beschichtungen
 - Auswirkung auf die mechanischen Hebeeinrichtungen
 - Vorgaben der Maßgenauigkeit und Toleranzen.

Die genannten Faktoren hängen maßgeblich mit der Herstellung des Tübbings zusammen. Fehlerhafte Konsistenz und Produktionsschritte führen zu Schadstellen an der Oberfläche. Darunter fallen Lunkerbildung – Lufteinschlüsse an der Oberfläche – sowie mangelhafte Ebenheit und Textur. Durch zu steife Konsistenz des Betons kommt es zu einer unzureichenden Ausfüllung der Schalung, was in der Bildung von Nestern resultiert.

Damit die Zahl der, aufgrund solcher und anderer Fehlerstellen, nicht einsetzbaren Tübbinge auf ein Minimum reduziert wird, ist eine umfangreiche Prüfung des Betons vorgesehen. Es werden drei Stufen der Prüfung unterschieden:¹⁰⁶

Erstprüfung: Diese Prüfung findet vor dem Beginn der Serienproduktion der Tübbinge statt. Geprüft werden die tatsächlich zum Einsatz kommenden Ausgangsstoffe. Mit diesen wird ein Probetübbing unter den später herrschenden Rahmenbedingungen hergestellt. In diesem Schritt werden die Konsistenzklasse und Expositionsklasse festgelegt, untersucht und geprüft. Kommt es in der späteren Produktion zu maßgebenden Abweichungen der Eigenschaften bzw. zu einer Änderung der Rezeptur des Betons, ist die Erstprüfung zu wiederholen. Zielwerte der Prüfung sind in einem Formblatt anzugeben.

¹⁰⁶Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 39 ff.

Konformitätsprüfung: Für die Gewährleistung der Qualität der Tübbinge während der Serienproduktion ist die Konformitätsprüfung verantwortlich. Durch Fremdüberwachung werden festgelegte Parameter bzgl. Betonausgangsstoffe, Frischbeton, Festbeton und dem Tübbing selbst kontrolliert. Je nach untersuchten Parameter sind verschiedene Prüfhäufigkeiten einzuhalten.

Identitätsprüfung: Zweck dieser Prüfung ist nochmalige Prüfung der Parameter durch eine zusätzliche externe Stelle. In Auftrag zu geben ist sie durch den Bauherrn. Die Prüfhäufigkeit ist im Vergleich zu Konformitätsprüfung geringer anzusetzen.

Durch diesen umfassenden Prüfzyklus wird eine hohe Qualität der einzelnen Tübbinge gewährleistet. Dies ist die Voraussetzung für einen reibungslosen Ablauf der Serienproduktion und die Erfüllung der hohen Anforderungen an die Bauteile.

Bewehrung

Neben dem Beton ist die Bewehrung ein wesentlicher Bestandteil der Tübbinge. Konventionell wird Stabbewehrung verwendet. Die einzelnen Lagen werden durch Rödeln oder Schweißen miteinander verbunden. Besonderes Augenmerk ist auf die konstruktive Durchbildung zu legen. Durch die Einhaltung der Mindestbewehrung und eine entsprechende Betonüberdeckung werden Fehlstellen vermieden, die zur Verringerung der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit führen. Da Tübbinge aufgrund ihrer Herstellungsmethode zur Bildung von Lunkern neigen, ist die entsprechende Betonüberdeckung anzupassen. Diese ergibt sich aus der Mindestbetondeckung plus der Tiefe der erwarteten Lunker.¹⁰⁷ Grundsätzlich sind bei der Bemessung die Regeln nach *ÖNORM EN 1992* [71] einzuhalten.



Abb. 3.2: Vergleich Bewehrung eines Tübbings mit Stabstahl (links) und Faserbeton (rechts) (Quelle: DAUB [16, S. 31])

Eine weitere Möglichkeit der Bewehrung ist jene mit Stahlfasern. In der Praxis werden Fasergehalte von 30–50 kg/m³ angewendet.¹⁰⁸ Ein Vorteil dieser Methode ist, dass ein Großteil der aufwendig herzustellenden Stabbewehrungskörbe entfällt. Das ist aus Abb. 3.2 zu entnehmen. Auf der rechten Seite ist ein herkömmlich bewehrter Tübbing dargestellt. Auffällig sind die zahlreichen Schnittstellen der Stäbe, was zu einer arbeitsintensiven Herstellung führt. Im Gegensatz dazu steht auf der rechten Seite das Bewehrungskonzept mit Fasern. Da dem Beton selbst die Fasern unter gemischt werden, kann auf einen Großteil der Stabbewehrung verzichtet werden. Ein

¹⁰⁷Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 40

¹⁰⁸Vgl. [16] DAUB, S. 31 f.

weiterer positiver Effekt der Fasern ist, dass die Duktilität des Betons vergrößert wird. Damit werden Rissbreiten in Zugbereichen verringert.¹⁰⁸ Um die positiven Eigenschaften der beiden Bewehrungssysteme zu vereinen, ist eine Kombination möglich. Da manche Fasern oberflächennah zu liegen kommen, und dadurch keine Betonüberdeckung gegeben ist, ist die Anwendung in Tunneln mit Salzstreuung kritisch anzusehen.

Der erfolgreiche Einsatz von Tübbing hängen nicht nur von den verwendeten Materialien Beton und Bewehrungsstahl ab. Entscheidend ist der Zusammenhalt der einzelnen Tübbingelemente und der Ringe untereinander. Hierfür ist die richtige Fugenausbildung von großer Bedeutung.

3.1.5 Fugen

Aufgrund baubetrieblicher Restriktionen erfolgt der Ausbau von Tunneln durch die individuelle Installation einzelner Tübbinge. Dadurch ergeben sich Fugen. Jene Fugen, die sich zwischen den einzelnen Tübbingelementen befinden, werden Längsfugen genannt. Jene zwischen den Ringen sind die Ringfugen. Eine Darstellung ist in Abb. 3.3 gegeben. Je nachdem, wie die Längs- und die Ringfugen aneinanderstoßen, unterscheidet man T-Fugen (wie abgebildet) und Kreuzfugen. Letztere werden wegen der Abdichtungsproblematik weitgehend vermieden.

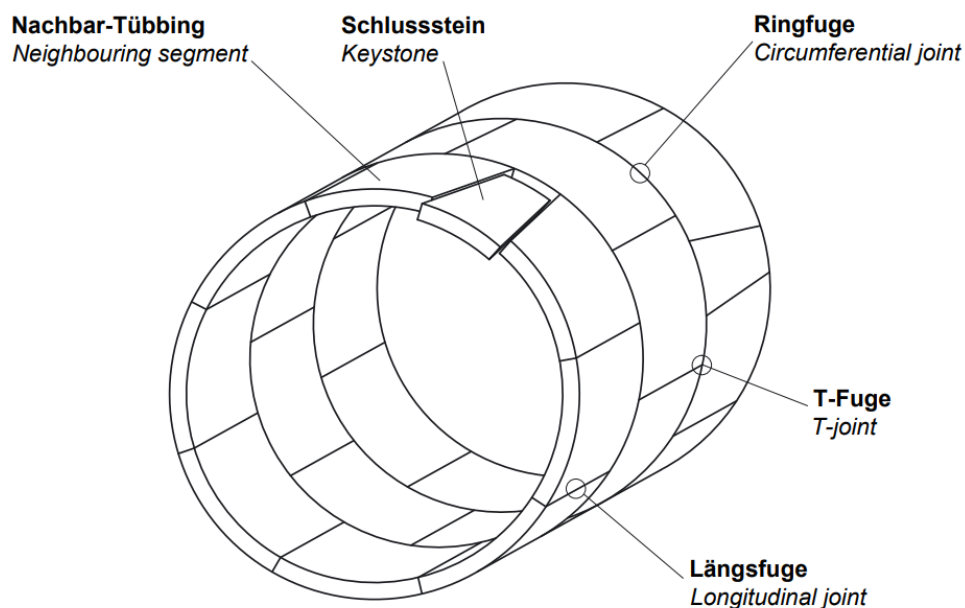


Abb. 3.3: Übersicht der Fugen bei Tübbingsystem (Quelle: STUVA [89, S. 7])

Die beiden Fugen haben unterschiedliche Aufgaben. Daraus resultieren verschiedene Anforderungen an die konstruktive Durchbildung:¹⁰⁹

Längsfuge: Hauptaufgabe dieser Fuge ist die Verbindung des Tübbingrings. Je nach Anforderung an die Wasserundurchlässigkeit, muss eine Dichtung eingebaut werden. Als Teil des statischen Systems müssen sie innere und äußere Schnittkräfte, sowie Vorspannungen zum Zwecke der Kompression der Dichtungen aufnehmen. Bei der Konstruktiven Durchbildung ist darauf zu achten, dass Lasten nur dort eingeleitet werden, wo dementsprechende Bewehrung vorhanden ist. Exponierte Bereiche wie Ecken und Kanten sind zu schützen.

¹⁰⁹Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 45 f.

Lastübertragende Bereiche sind zentrisch und ohne Kerben vorzusehen. Randabstände zur Befestigung der Abdichtungen müssen ausreichend dimensioniert werden.

Ringfuge: Die Belastungen auf die Ringfuge stammen größtenteils aus dem Vortrieb und den damit verbundenen Koppel- und Steuerkräften. Wie bei den Längsfugen sind bei manchen Systemen Abdichtungen vorzusehen. Aufgrund von Richtungskorrekturen und bzw. oder Kurvenfahrten ergibt sich eine ungleichmäßige Belastung und Teilflächenpressung auf die Elemente. Um die Lasten gleichmäßiger aufzuteilen, kommen Lastverteilungsplatten, auch genannt Packer, zum Einsatz. Diese bestehen meist aus Holz, Kunststoff oder bituminösen Material.¹¹⁰ Zusätzlich, zu den konstruktiven Anforderungen, die für die Längsfuge gelten, muss beachtet werden, dass Fugenbei- und Einlagen sowie Zentrierhilfen auf die Kinematik und Geometrie des Systems angepasst sind.

Für beide Arten der Fugen sind die jeweiligen Fertigungs- und Einbautoleranzen zu berücksichtigen. Neben der Anordnung können unterschiedliche Formen der Fugen unterschieden werden. Das sind vollflächig ebene Fugen, Fugen mit ebenen Teilflächen, Wälzgelenkfugen und Fugen mit Kopplung. Letztere werden unterteilt in Nut/Feder-Systeme und Topf/Nocken-Systeme.

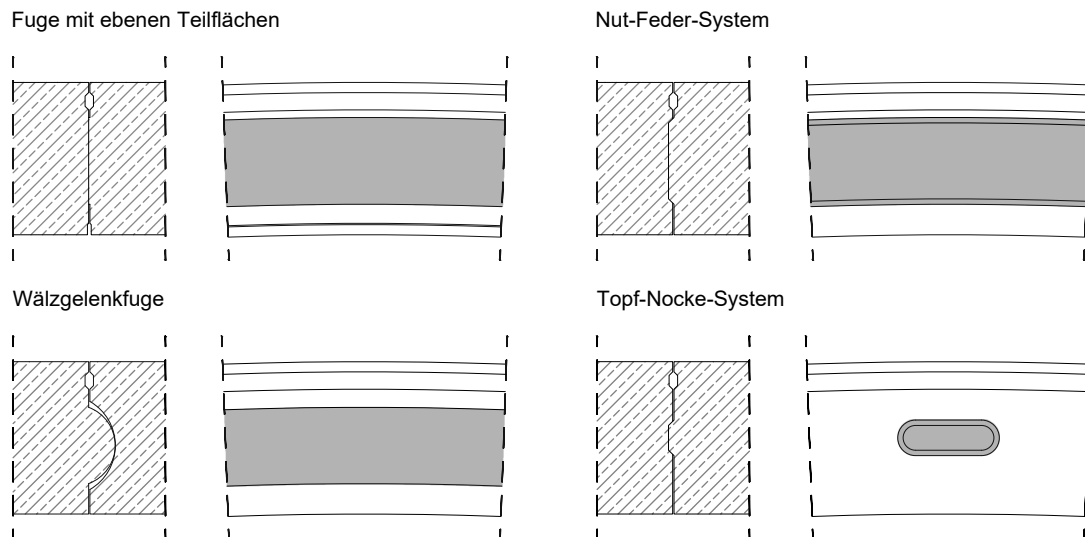


Abb. 3.4: Fugenformen bei Tübbing (Quelle: modifiziert nach Hausmann [37, S. 34])

Für unbelastete oder zeitweise belastete Fugen werden vollflächig ebene bzw. stumpf gestoßene Fugen verwendet. Hierbei dient die gesamte Dicke des Tübbings der Lastübertragung. Im Gegensatz dazu stehen Fugen mit ebenen Teilflächen. Wie in Abb. 3.4 dargestellt, erfolgt die Lastübertragung über einen mittig angeordneten Bereich. Ein ähnliches Prinzip verfolgt die Wälzfuge. Die Lastenleitung erfolgt hierbei über eine konkav-konvex oder konvex-konvex ausgebildete Fuge mit einem anwendungsabhängigen Radius. Abb. 3.4 zeigt eine selbstzentrierende Wälzgelenkfuge. Um Verschiebungen der Ringe und Tübbingelemente zu vermeiden, werden konstruktive Elemente, wie das Nut-Feder-System und das Topf-Nocken-System, eingesetzt. Das Nut-Feder-System bewirkt eine Verzahnung über die gesamte Fugenlänge. Topf-Nocken-Systeme wirken punktuell.¹¹⁰ Beispiele solcher Verbindungen sind in Abb. 3.4 gegeben. Besonderes Augenmerk ist auf die Fuge des Schlusssteins zu legen, da diese das Durchfallen des Steins verhindern muss.¹¹¹ Unabgedichtete Fugen genügen nur selten den Anforderungen an die Wasserundurchläss-

¹¹⁰Vgl. [37] Hausmann, S. 32 ff.

¹¹¹Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 34

sigkeit von Tübbing. Konstruktiv stellen sie Schwachstellen da. Damit das vermieden wird, werden Dichtungen eingebaut.

3.1.6 Dichtheitsfunktion

Um ein kontrolliertes Ein- und Ausfließen des Wassers im Tunnel zu ermöglichen, werden Dichtungssysteme in Tübbing verbaut. Je nachdem, ob das Wasser aus dem Inneren des Tunnels ferngehalten – Straßentunnel – oder gehalten werden soll – Druckwasserstollen – sind unterschiedliche Ausbauten notwendig. Die jeweiligen Ansprüche werden laut ÖBVV [75] in 4 Anforderungsklassen von AT1 bis AT4 zusammengefasst.¹¹² AT1 stellt hierbei die höchsten Anforderungen. Der Ausbau muss dicht und weitgehend trocken sein. AT2 lässt leicht feuchte Stellen, aber kein rinnendes Wasser, zu. Einzeln tropfende Stellen, die einen Wasserzutritt von 0,2 l/h nicht überschreiten, sind bei AT3 gestattet. Rinnende Stellen, die die Funktion des Bauwerks nicht beeinträchtigen, werden bei AT4 zugelassen. Prinzipiell sind einzuhaltende Restwassermengen immer vertraglich festzuhalten.¹¹³ Damit das richtige Dichtungssystem für die anzustrebende Anforderungsklasse bzw. Restwassermenge gewählt wird, ist eine möglichst frühe Beteiligung aller Stakeholder notwendig.

Die Wahl des Dichtungssystems hängt stark mit der Art des Ausbaus zusammen. So entfällt bei einem einschaligen Ausbau die Dichtheitsfunktion auf nur eine Schale. Ein tatsächlich dichtes System ist in der Praxis meist nur durch zweischaligen Ausbau und Einsatz einer Abdichtung möglich. Konkret unterscheidet man Systeme mit:

- Unabgedichteter Fuge
- Vermörtelter Fuge
- Gedichteter Schale mit:
 - Quellfähigen Dichtungsbändern
 - Elastomerdichtungsbändern
 - Vordichtung.

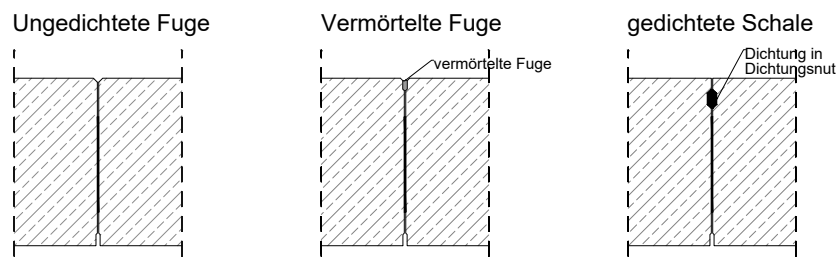


Abb. 3.5: Dichtungssysteme bei Tübbing (Quelle: modifiziert nach Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik [75, S. 48] und STUVA [89, S. 11])

Eine beispielhafte Darstellung der Prinzipien ist in Abb. 3.5 gegeben. Systeme mit unabgedichteter Fuge kommen bei AT4 zum Einsatz. Hierbei darf die Funktion des Bauteils durch das eintretende Wasser nicht beeinträchtigt werden, wie es z.B. durch das Ausspülen der Tübbingbettung im

¹¹²Vgl. [37] Hausmann, S. 25

¹¹³Vgl. [16] DAUB, S. 19

Ringspalt der Fall ist. Vermörtelte Fugen werden meist in Kombination mit Injektionen in der Praxis angewandt. Form, Füllung und Oberfläche der Fuge müssen kompatibel sein, sodass eine erfolgreiche Haftung gewährleistet ist.¹¹⁴

Wie in Abb. 3.5 dargestellt, ist eine gedichtete Schale aus zwei Komponenten aufgebaut – der Dichtung und dem Tübbing. Zur Lagesicherung der Dichtung muss im Tübbing eine Dichtungsnut vorgesehen werden. Bei deren Anordnung ist darauf zu achten, dass es durch Belastung zu keinen Abplatzungen des Betons im Bereich der Dichtung kommt. Die Dichtung wird durchgehend zu einem Rahmen am Tübbing geschlossen. Um eine präzise Anpassung der Dichtung an die geometrischen Abmessungen des Tübbings zu gewährleisten, ist eine sorgfältige Abstimmung erforderlich. Die Befestigung erfolgt durch Kleben oder Einbetonieren in der Nut.¹¹⁵ Bei niedrigem Wasserdruck werden quellbare Dichtungsbänder eingesetzt, die nur bei Kontakt mit Wasser ihre Funktion erfüllen. Bei der Wahl dieser Dichtung ist auf die chemische Zusammensetzung des Wassers zu achten. Aufgrund der eher geringen Dichtleistung von quellfähigen Bändern wird dieses System nur bei AT3 eingesetzt. Bei höheren Anforderungsklassen kommen Dichtungsrahmen, bestehend aus Elastomerdichtungsbändern, zum Einsatz. Dank dieser Rahmen kann, je nach System, bereits bei einschaliger Bauweise eine hohe Dichtigkeit erzielt werden. In Wasser- und Abwassertunneln wird der Dichtungsrahmen hohlraumseitig angeordnet, in Straßentunneln bergseitig. Dadurch ist die Dichtung im Brandfall geschützt.¹¹⁶ Die Vordichtung wird eingesetzt, um die eigentliche Dichtung vor dem Kontakt mit dem Verpressmaterial aus dem Ringspalt zu schützen. Sie übernimmt im Endzustand keine Dichtungsfunktionen.¹¹⁴

Dichtungen wirken durch Kompression. Um diese, sowie Lagesicherheit und Zusammenhang der Tübbinge untereinander, während des Bauzustandes zu garantieren, werden Zentrierhilfen und Verbindungselemente eingesetzt.¹¹⁴ Diese können dauerhaft im Bauteil verbleiben, oder nur temporär zur Stabilisierung verwendet werden. Eingesetzt werden Stäbe, Schrauben und Dübel. Damit die gewünschte Kompression der Dichtung erreicht wird, werden die Verbindungsmittel erst dann eingesetzt und angezogen, wenn die dementsprechende Belastung aus den TVM-Pressen auf das Bauteil ausgeübt wird.¹¹⁴

3.1.7 Produktion und Einbau

Da Tübbinge in einer großen Stückzahl produziert werden, ist ein reibungsloser Ablauf von Produktion bis zum Einbau im Tunnel notwendig. Begleitend dazu ist dem durchgängigen Qualitätsmanagement große Aufmerksamkeit zu schenken. Abläufe und Systeme der Überprüfung und Dokumentation der Tübbinge müssen bereits vor Beginn der Produktion festgelegt werden.¹¹⁷

Produktion

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Tübbinge entweder in einer Feldfabrik in unmittelbarer Nähe des zu errichtenden Tunnels oder in einem stationären Fertigteilwerk herzustellen.¹¹⁸ Unabhängig davon sind, wie für alle Betonbauteile, eine Mischanlage, Schalung, Bewehrung und Einrichtungen für den Betonier- und Aushärtvorgang notwendig.

Die Ausführung der Schalung ist beweglich – Karussell - und ortsfest möglich. Je nach verlangerter Dauerhaftigkeit, sowie den einzuhaltenden Toleranzen, wird die Schalung dimensioniert und ausgelegt. Aufgrund der komplexen Geometrie der Tübbinge besteht die Schalung aus mehreren Komponenten: Bodenschalung, Seitenwand, Frontwand, Schalungsdeckel, Befestigung für Einbauteile, Dichtungen und Vibrationseinrichtungen. Nach der Schaltungsart – beweglich oder ortsfest –

¹¹⁴Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 48 ff.

¹¹⁵Vgl. [89] STUVA, S. 12

¹¹⁶Vgl. [89] STUVA, S. 22

¹¹⁷Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 44

¹¹⁸Vgl. [16] DAUB, S. 45

wird der Betoniervorgang gewählt. Die gestellten Anforderungen an den Beton sind Kap. 3.1.4 zu entnehmen. Um die Ausschalzeiten zu verkürzen, werden die Tübbinge einer Wärmebehandlung unterzogen. Da neben der natürlichen Hydrationswärmeentwicklung zusätzlich Wärme zugeführt wird, müssen maximale Temperaturdifferenzen, Wärmenetzentwicklungsgeschwindigkeiten sowie Temperaturen im Frischbeton und im Kern des Tübbings eingehalten werden. Das verhindert Risse aufgrund von Schwindprozessen.

Die Informationen bzgl. der Produktion müssen für jeden Tübbing eindeutig zuordenbar sein. Um ein durchgehendes Qualitätsmanagement und eine Rückverfolgbarkeit zu ermöglichen, werden folgende Daten erfasst:

- Tübbingtyp
- Produktionsdatum
- Schalungsnummer
- Chargennummer.

Dadurch wird, bei unzureichender Produktion der Tübbinge, das Entstehen von Fehlstellen nachvollzogen. Besonders häufig treten Nester, fehlende Betonteile, unzulässige Lunker, Abrisse und Abplatzungen, Unterschreitung der Betonüberdeckung, unzulässige Risse und beschädigte Dichtungen auf.¹¹⁹ Die Instandsetzung solcher Mängel vor dem Einbau der Tübbinge ist wichtig, da danach Schäden nur noch hohlraumseitig sichtbar und korrigierbar sind. Für einen einheitlichen Umgang mit Fehlstellen gibt es eine Instandsetzungsmatrix, die Informationen über die Fehlstellen und den Entstehungsort enthält.¹¹⁹

Lagerung und Transport

Die Manipulation im Werk erfolgt entweder mit einer Hebezeuge oder einem Vakuumheber. Die Hebe- und Auflagerpunkte sowie die Stapelhöhe werden vom Tübbingplaner bestimmt.¹²⁰ Die Lagerung erfolgt ringweise oder nach Typ, sowie stehend oder liegend. Bei liegender Lagerung ist abzuklären, wie viele Tübbinge übereinandergestapelt werden können und welche Abmessungen die einzulegenden Zwischenhölzer haben müssen. Beim Lagerplatz ist zu beachten, dass der Untergrund die benötigte Tragfähigkeit und Ebenheit aufweist. Zusätzlich muss ausreichende Fläche bereitgestellt werden, einschließlich Zwischenlagerplätze und Umschlagplätze, um die logistischen Vorgänge effektiv abzuwickeln.¹²⁰

Für den Transport vom Werk auf den Lagerplatz und später in den Tunnel ist ein entsprechendes Hebe- und Transportgerät einzusetzen. Der Weg vom letzten Lagerplatz hinein in den Tunnel erfolgt rad- oder gleisgebunden. Für Letzteres werden elektrische oder dieselbetriebene Lokomotiven herangezogen. Mit den Loks können jedoch nur Steigungen bis maximal 27 ‰ bewältigt werden.¹²¹ Im Gegensatz dazu stehen die radgebundenen Multi Service Vehicle (MSV). Diese Transportgeräte bewältigen große Steigungen und zeichnen sich zusätzlich durch einen hohen Grad an Beweglichkeit und Flexibilität in der Streckenführung aus. Nach dem Transport an den Einbauort im Tunnel werden die Tübbinge an die TVM übergeben. Von hieraus baut sie der Erektor mithilfe des Tübbingkrans ein.

Einbau

Die Endabnahme der Tübbinge erfolgt auf dem letzten Lagerplatz. Untertage werden sie auf Schäden aus dem Transport in den Tunnel untersucht und beurteilt. Wenn keine Fehlstellen vorhanden sind, werden die Tübbinge eingebaut.¹²⁰

¹¹⁹Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 47 ff.

¹²⁰Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 43 ff.

¹²¹Vgl. [35] Goger, S. 254



(a) Tunnellokomotive (Quelle: Schöma [85])



(b) MSV (Quelle: Herrenknecht [39])

Abb. 3.6: Transportgeräte für Tübbinge

Der Einbau der Tübbinge erfolgt mittels Erektor, der auf die Maximalgewichte der Tübbinge abgestimmt ist. Dieser wird mittels Tübbingkran beschickt. Aufgrund der beengten Platzverhältnisse und der geforderten Passgenauigkeit der Tübbinge, muss der Erektor ein hohes Maß an Bewegungsmöglichkeit aufweisen. Nach erfolgtem Einbau werden die erforderlichen Verbindungsmittel eingebaut. Danach stützt sich die TVM mit ihren Vortriebspresen auf die dafür vorgesehenen Flächen des Tübbings ab und baut somit die für den Vortrieb benötigte Schubkraft auf. Der Vorgang des Tübbingeinbaus findet unter dem Schutz des Schildes statt. Dieses ist durch die Schildschwanzdichtung mit dem bereits eingebauten Tübbing verbunden. Die Dichtung verhindert, dass Wasser und Verpressmaterial aus dem Ringspalt in das Innere der TVM gelangen.

3.2 Ringspalt

Der Ringspalt bildet das kraftschlüssige Element zwischen dem Gebirge und dem Tunnelbauwerk. Wie Abb. 3.7 zeigt, setzt sich der Ringspalt aus dem Überschnitt, der Konizität des Schildes sowie der Höhe der Schildschwanzdichtung zusammen. Der Überschnitt dient der Reduzierung der Mantelreibung und dem besseren Durchfahren von Kurven. Durch die Konizität des Schildes entsteht der Steuerspalt, was ein Steckenbleiben der TVM verhindert.¹²² Die Schildschwanzdichtung dient der Abdichtung des Ringspalt gegenüber dem Austreten des Verpressmaterials.¹²³ Wie aus Abb. 3.7 hervorgeht, wird die Abdichtung mittels Bürsten bewerkstelligt. Die Kammern dazwischen sind mit Fett gefüllt, das zusätzlich ein Eintreten von Flüssigkeiten verhindert. Um Redundanz zu schaffen, werden mehrere Bürstenreihen hintereinander angeordnet.

Damit der Spannungszustand, der vor dem Ausbruch herrscht, wiederhergestellt wird, muss der Ringspalt verpresst werden. In manchen Fällen werden dabei auch höhere Spannungen erzeugt, um das Eindringen von Wasser und Gestein zu verhindern.¹²² Durch das Verpressen entsteht zusätzlich die Bettung für die Tübbinge, ohne die ein Vortrieb bei gedichteten Systemen nicht möglich ist. Verpresst wird bei Schildmaschinen mittels Lisenen (Mörtelleitungen), die in Abb. 3.7 zu sehen sind. Es ist baubetrieblich darauf zu achten, dass der Mörtel kontinuierlich durch die Leitungen fließt, sodass es zu keinem Erhärten kommt. Gripper-TBMs benötigen, wenn überhaupt, nur einen Sohlübbing der vollflächig verpresst wird. TBM-S Maschinen haben die Möglichkeit über Lisenen und Öffnungen in den Tübbing das Verpressmaterial einzubringen.¹²⁴ In allen Fällen ist darauf zu achten, dass ein Aufschwimmen des Tunnels während dem Aushärten des Mörtels verhindert wird. Dem wird durch eine entsprechende Steifigkeit des Verfüllmaterials entgegengewirkt.¹²⁵ Die

¹²²Vgl. [37] Hausmann, S. 24

¹²³Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 46

¹²⁴Vgl. [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, S. 57

¹²⁵Vgl. [37] Hausmann, S. 18

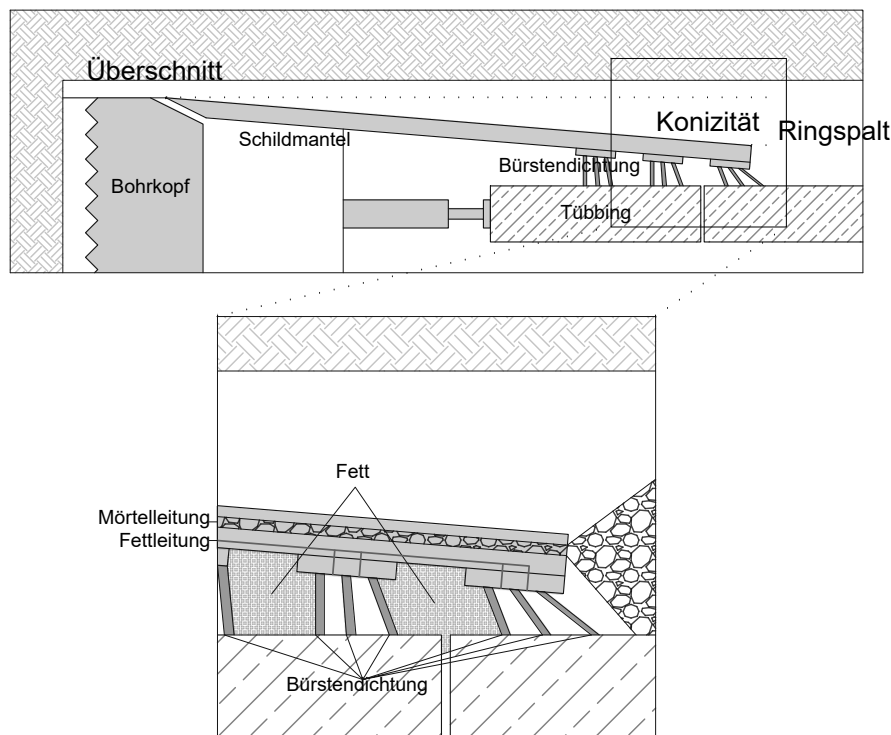


Abb. 3.7: Darstellung des Schildes mit Ringspalt und Schildschwanzdichtung (Quelle: modifiziert nach Hausmann [37, 24 ff.])

hydrologischen Verhältnisse dürfen durch den Bau des Tunnels nur möglichst wenig beeinflusst werden. Somit kann der Ringspalt als Drainage- oder Dichtungselement wirken.¹²⁴

An den Ringspaltverfüllmörtel werden hohe Ansprüche gestellt. Während des Bauprozesses muss er ein Aufschwimmen der Tunnelröhre verhindern, und im ausgehärteten Zustand sollte die Steifigkeit des Mörtels der des umgebenden Gebirges entsprechen. Daraus ergeben sich die folgenden materialtechnischen und baubetrieblichen Eigenschaften:¹²⁴

- Volumsbeständigkeit im erhärteten Zustand
- Kraftschlüssigkeit zwischen Ausbau und Gebirge
- Grundwasserverträglichkeit
- Gute Verarbeitbarkeit
- Gute Pumpfähigkeit
- Hohe Suspensionsstabilität
- Erosionsbeständigkeit bei fließenden Wasser.

Ähnlich wie bei Beton, ist nach 28 Tagen eine Mindestdruckfestigkeit zu bestimmen. Kontrolle und Dokumentation des Materials, sowie jene der Ausgangsstoffe, erfolgt mittels der in Kap. 3.1.4 beschriebenen Erstprüfung, Konformitätsprüfung und Identitätsprüfung. Die wesentlichen Bestandteile des Verfüllmörtels sind Zement und Gesteinskörnung. Dazu werden Zusatzstoffe, Zusatzmittel, Anmachwasser und Bentonit gegeben. Für die Gesteinskörnung kommt Perlkies zum Einsatz. Dieser Einkornkies besteht aus Rundkörnern mit einem Durchmesser von mindestens

4 mm bis maximal 16 mm. Häufig verwendete Zusatzmittel sind Stabilisatoren, Beschleuniger und Verzögerer. Durch diese wird eine Sonderform des Mörtels hergestellt, der sogenannte Zwei-Komponentenmörtel.¹²⁴

Dieser besteht aus einer Komponente A und einer Komponente B. Komponente A ist durch die Zugabe von Stabilisatoren und Verzögerern über lange Zeit hinweg pumpfähig, was baubetriebliche Vorteile mit sich bringt. Erst unmittelbar vor dem Verpressen in den Ringspalt wird die Komponente B hinzugeführt. Da diese aus Wasser und einem Erstarrungsbeschleuniger besteht, kommt es zu einem schnellen Erhärten des Verfüllmaterials. Durch diese Methode wird von der langen Verarbeitbarkeit und dem schnellen Abbinden profitiert.¹²⁶ Es kommt jedoch zu einem wesentlich höheren Einsatz von Zement.

Wie die vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, ist die Herstellung eines Tunnels mit Tübbingausbau sehr ressourcenintensiv. Neben dem Beton und Stahl für die Tübbinge selbst ist der Ringspaltverpressmörtel ein nicht zu vernachlässigender Faktor. Das Institut für Tragkonstruktionen – Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau – der TU Wien beschäftigt sich in Kooperation mit der STRABAG AG Tunnelling Division mit der Frage, wie die Massenbilanz der Materialien bei gleichbleibender Qualität und Tragfähigkeit reduziert werden kann. Mit einem Forschungsprojekt zur *ressourceneffizienten Bewehrung von Tübbingen* haben die Forschungsbeteiligten ein Konzept für den nachhaltigen Tunnelbau geschaffen.

3.3 Forschungsprojekt RET

Tübbinge sind Fertigteilelemente. Naturgemäß verändert sich die Geometrie der Einzelelemente während der Herstellung nur geringfügig oder gar nicht. In Hinblick auf den Ressourceneinsatz kommt es daher häufig zu einer Überdimensionierung, da der Ausbau auf die Störzonen eines Tunnels, die oft nur wenige Prozent des gesamten Tunnels ausmachen, ausgelegt ist. In diesen Bereichen muss der Ausbau aufgrund des erhöhten Bedarfs an Hohlraumstützung stärker dimensioniert werden. Regelbereiche des Tunnels, in denen ein schmalerer Ausbau ausreichend wäre, müssen dennoch mit dem auf die Störzonen dimensionierten Ausbau ausgekleidet werden. Dies ergibt sich aus maschinentechnischen Erfordernissen. Jede TVM wird speziell für ein Projekt und damit für einen Querschnitt und Tübbingtyp mit vordefinierter Tübbingstärke hergestellt. Es stellt sich somit die Frage, an welchen Stellschrauben die Ressourceneffizienz der Tübbinge gesteigert werden kann.

Das Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien hat mit einer alternativen Bewehrungsführung eine dieser ressourcenoptimierenden Möglichkeiten gefunden. Durch den Einsatz zusätzlicher Längsbewehrung in den stark beanspruchten Längsfugen der Tübbinge, wird der Tunnelausbau in Störbereichen verstärkt. Damit wird der gesamte Tunnel mit einem schmäleren Tübbing ausgeführt. Die Tübbinge in den Störzonen haben eine höhere Tragkraft bei gleichen Abmessungen wie jene in den Regelbereichen. Somit werden wertvolle Ressourcen, allen voran Beton, eingespart. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Tatsache, dass sich durch die geringere Tübbingstärke auch geringere Ausbruchdurchmesser ergeben. Das bedeutet weniger Ausbruchmaterial das transportiert, weiterverarbeitet oder deponiert werden muss.¹²⁷

3.3.1 Spezifikationen des RET

Aufgrund der hohen Druckkräfte liegt der für die Tübbingdicke maßgebende Bereich meist in der Längsfuge. Dies ergibt sich daraus, dass nicht die gesamte Tübbingdicke und damit Querschnittsfläche zur Übertragung der Schnittgrößen zur Verfügung steht. Diese verminderte Fläche ist in

¹²⁶Vgl. [37] Hausmann, S. 27

¹²⁷Vgl. [59] O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al., S. 1 ff.

Abb. 3.8a dargestellt. Ein Teil des Querschnitts muss für konstruktive Kopplungselemente und Dichtungen vorgehalten werden.¹²⁷

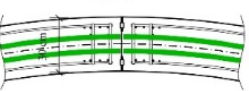
Um den reduzierten Bereich zu verstärken, wird bei dem alternativen Bewehrungskonzept zusätzliche Längsbewehrung eingebracht. Wie in Abb. 3.8b gezeigt wird, stößt diese stumpf aufeinander. Die Bewehrungsstäbe haben damit keine Betonüberdeckung. Damit die Oxidation des Bewehrungsstahls verhindert wird, muss die Bewehrung in den Druckzonen liegen.¹²⁷ Um nachzuweisen, dass die Kräfte durch die stumpf aneinanderstoßenden Bewehrungsstäbe weitergeleitet werden, wurden mehrere Versuche an zylindrischen Versuchskörpern durchgeführt. Ergebnis der Untersuchung ist, dass die zusätzliche Bewehrung in vollem Umfang aktiviert werden konnte.¹²⁷ Je nach Anforderung an die Tragfähigkeit der Tübbinge ist die Anzahl der verbauten Stäbe variabel anpassbar.

3.3.2 Ökologische Vorteile des RET

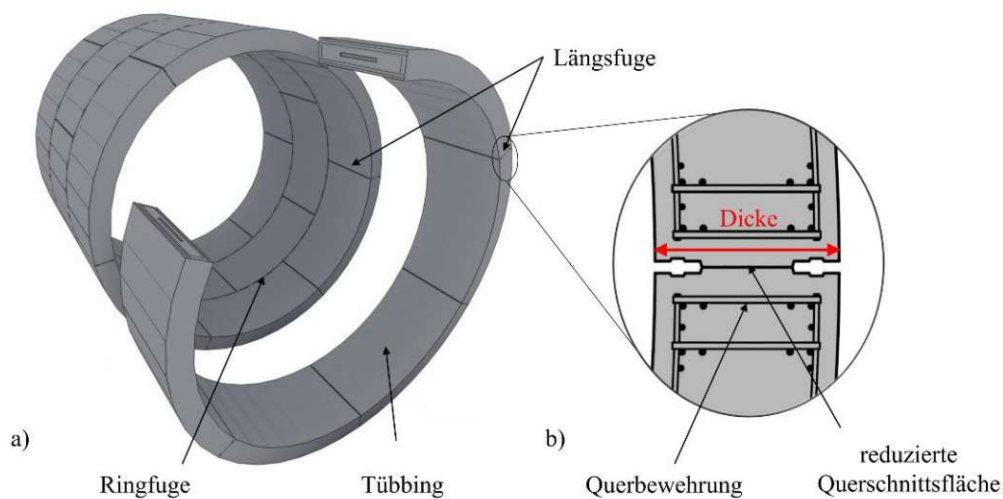
Durch die zusätzliche Bewehrung erhöht sich die flächenbezogene Tragfähigkeit. Daraus folgt, dass in der Längsfuge mit einem kleineren neuarmierten Querschnitt die gleiche Tragfähigkeit aufgebracht wird, wie mit einem größeren konventionell bewehrten Querschnitt. Diese Tatsache wird in Störzonen ausgenutzt. Hier werden die alternativ bewehrten Tübbinge mit geringerer Tübbingdicke eingesetzt. In den Regelbereichen werden die konventionell bewehrten Tübbinge mit geringerer Tübbingdicke verbaut. Dadurch werden im Vergleich zu einem Tunnel mit durchgehend dickeren Tübbingungen wertvolle Ressourcen eingespart.

Ein Beispiel dazu wird von O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al. [59] gebracht. Wie in Tab. 3.2 zu sehen ist, werden drei Querschnitte verglichen. Der Querschnitt T40 entspricht der nicht ressourceneffizienten Planung. T30+ ist das ressourceneffiziente Pendant mit zusätzlicher Längsbewehrung. Dieser Querschnitt wird in den Störzonen des Projektes eingesetzt. T30 entspricht jenem Querschnitt, der im Regelquerschnitt der ressourcenoptimierten Variante eingesetzt wird.

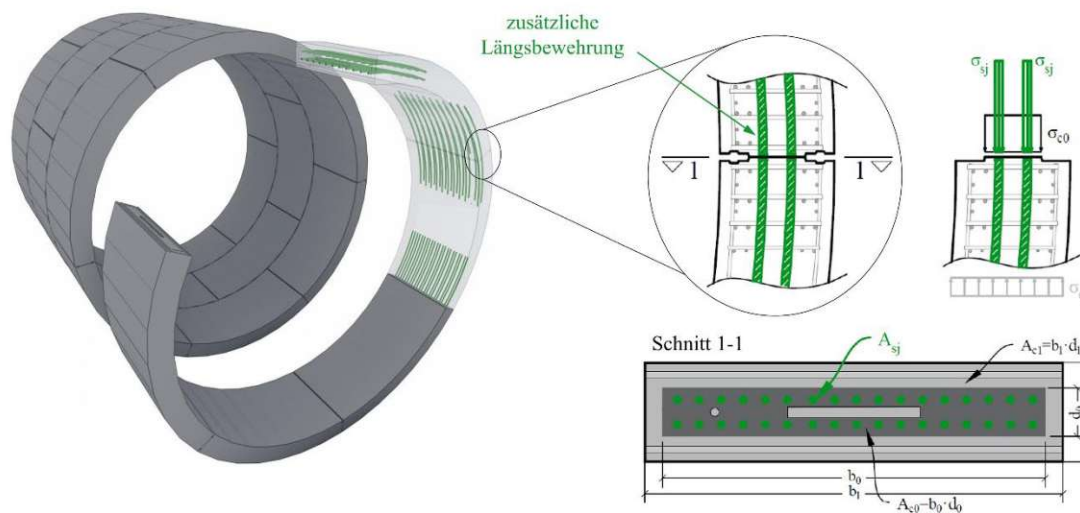
Tab. 3.2: Vergleich der verschiedenen Tübbinge (Quelle: O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al. [59, S. 4])

				
Tübbingdicke	d_1	0,4 m	0,3 m	0,3 m
Kontaktfläche in Dickenrichtung	d_0	0,2 m	0,15 m	0,15 m
Querschnittsfläche der zusätzlichen Längsbewehrung	A_{sj}	–	–	94,25 cm ² (30 Stk. Ø20)
Normalkraftwiderstand	N_{Rd}	18.379 MN (Glg. (1))	13.784 MN (Glg. (1))	18.292 MN (Glg. (2))
GWP für die Herstellung eines Tübbings		1129 kg CO ₂ Äqv. (±100 %)	850 kg CO ₂ Äqv. (-24,7 %)	882 kg CO ₂ Äqv. (-21,9 %)

Wie aus der letzten Zeile von Tab. 3.2 klar hervorgeht, spart der T30+ bei nahezu demselben Normalkraftwiderstand im Vergleich zum T40 21,9% des GWP der Herstellung des Tübbings



(a) Konventionelle Bewehrung von Tübbing



(b) Ressourceneffizientes Bewehrungskonzept der TU Wien

Abb. 3.8: Vergleich der Bewehrungskonzepte konventionell und RET (Quelle: O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al. [59, 1 f.])

ein. Das lässt sich auf den geringeren Verbrauch GWP-intensiven Beton zurückführen. Die Tragfähigkeit des Tübbings wächst somit schneller als das materialabhängige GWP.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Punkt ist jener des Ausbruchmaterials. Durch den geringeren Durchmesser, der für den Vortrieb mit optimierter Bewehrung benötigt wird, wird Ausbruch gespart. Damit reduziert sich die Kubatur maßgeblich. Besonders für schlechte Böden, entfällt die kostspielige Deponierung.

3.4 Zusammenfassung

Tübbinge sind elementare Bestandteile des Tunnelausbaus. Aufgrund der vielfältigen Aufgaben und Einwirkungen werden hohe Anforderungen an diese Bauteile gestellt. Um eine hohe Qualität zu gewährleisten, ist ein strenges Prüfprogramm von der Auswahl der Ausgangsmaterialien bis zum Einbau und der Instandsetzung der Tübbinge vorgesehen. Dabei spielen die Fugen und die an sie gekoppelte Dichtheitsfunktion ebenfalls eine Rolle. Sie stellen Schwachstellen hinsichtlich Wasserundurchlässigkeit und Dauerhaftigkeit dar. Damit es zu einer uneingeschränkten Funktion aller Bestandteile kommt, ist eine frühzeitige Abstimmung der Beteiligten erforderlich.

Der Ringspalt ist für eine kraftschlüssige Verbindung zwischen dem Tunnelbauwerk und dem umgebenden Gebirge verantwortlich. Bei der Auswahl der Rezeptur sind Eigenschaften, die den Baubetrieb beeinflussen, wie die Pumpfähigkeit und Erstarrungszeit, ebenso zu berücksichtigen wie die Steifigkeit des Ringspaltmörtels.

Aufgrund der großen Längsausdehnung der meisten Tunnelbauwerke werden enorme Mengen an Ressourcen benötigt. An erster Stelle steht dabei der Treibhausgas-intensive Beton. Durch die alternative Bewehrungsführung gelingt es im Forschungsprojekt RET, Ressourcen einzusparen und gleichzeitig Emissionen zu reduzieren. Die Betrachtung im Projekt beschränkt sich auf die Ebene der Materialherstellung. Damit sind die Lebenszyklusphasen A1–A3 abgedeckt. In den folgenden Kapiteln wird zusätzlich die Lebenszyklusphase der Errichtung – A4–A5 – des Tunnelbauwerks betrachtet und ein Vergleich zwischen konventionellen und ressourceneffizienten Tübbingen durchgeführt.

Kapitel 4

Ökobilanzierung und Vergleich eines herkömmlichen und RET-Tunnelquerschnittes

Auf dem Wissen der vorhergehenden Kapitel aufbauend, wird eine Ökobilanz für Tunnelquerschnitte mit der alternativen Bewehrungsführung aus dem Forschungsprojekt RET für die Lebenszyklusphasen Herstellung und Errichtung durchgeführt. Anhand des geringeren Außendurchmessers werden mehrere Faktoren, wie Bohrdurchmesser der TVM, Menge an Ringspaltmörtel und Ausbruchskubatur verringert. Für die Erstellung der Ökobilanz wird auf eine Datenbank zurückgegriffen. Die Daten werden in die Software openLCA¹²⁸ eingepflegt und Ergebnisse ermittelt. Die Gliederung und Bearbeitung der Bilanz erfolgt nach den in *ÖNORM EN ISO 14040* [72] und *ÖNORM EN ISO 14044* [73] gestellten Anforderungen.

4.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Wie im Kap. 2.3 aufgezeigt, stehen dem hohen Ressourcenverbrauch von Bauwerken immer knapper werdende Rohstoffe gegenüber. In Kombination mit der immer strenger werdenden Klimapolitik, die bis auf die Unternehmens- und Projektebene durchschlägt, müssen für den Tunnelbau praktikable, nachhaltige Ansätze gefunden werden. Ein solcher Ansatz ist die alternative Bewehrungsführung des ressourceneffizienten Tübbings.

4.1.1 Ziel der Studie

Ziel dieser Ökobilanz ist es, eine ökologische Bewertung von 7 funktional identischen Tunnelquerschnitten zu erstellen. Diese unterscheiden sich anhand von Geometrie und Bewehrung. Ausgangspunkt für den Vergleich ist ein konventioneller Tunnelquerschnitt. Anhand dessen werden Alternativen ausgearbeitet. Anreiz dazu gibt die Tatsache, dass der Ausbau herkömmlicher Tunnelquerschnitte auf die Störzonen ausgelegt ist. In den Regelbereichen kommt es damit zu einer Überdimensionierung. Durch eine alternative Bewehrungsführung in den stark belasteten Längsfugen der Segmentstöße wird die Stärke der Tübbige über den gesamten Tunnel reduziert und so Ressourcen gespart. Betrachtet werden die Lebenszyklusphasen Herstellung – Modul A1–A3 – und Einbau – Modul A5 – der Bauteile. Ziel der Untersuchung ist es, Potentiale zur Einsparung von Emissionen durch optimierte Tunnelquerschnitte aufzuzeigen. Anhand der Ergebnisse wird der Vergleich in den weiterführenden Kapiteln der Arbeit noch auf die Projektebene erweitert. Schwerpunkte der Betrachtung liegen dabei auf den Tübbingen, Ringspalt sowie der Tunnelvortriebsanlage (TVA).

¹²⁸Vgl. [105]

4.1.2 Untersuchungsrahmen der Studie und funktionelle Einheit

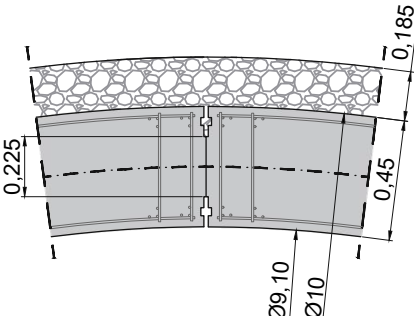
Die Ergebnisse der Untersuchung werden für alle betrachteten Varianten dargestellt. Durch den direkten Vergleich zeigt die Ökobilanz den Stakeholdern eines Tunnelbauprojektes in der Planungs- und Ausschreibungsphase den ökologischen Nutzen des RET auf. Insbesondere im Hinblick auf die Taxonomie, die zunehmend Einfluss auf viele Bereiche des Bauwesens nimmt, ist diese Betrachtung von Interesse. Ein frühzeitiges Emissionsmanagement wird immer bedeutender. Dazu gehört die Prüfung möglicher Ausführungsvarianten hinsichtlich ökologischer Fragestellungen. Bei diesem Prozess unterstützt die vorliegende Betrachtung.

Um die Vergleichbarkeit der vorliegenden Studie mit anderen Arbeiten zu gewährleisten, sowie das gesetzte Ziel zu erreichen, ist die Definition einer funktionellen Einheit und eines Referenzflusses notwendig. Da es sich bei den untersuchten Varianten um Tunnelquerschnitte handelt, bietet sich die Einheit *1 m Tunnel* an. Die im weiteren Zuge der Arbeit ermittelten Ressourcen, Prozesse und Energieverbräuche werden auf die gewählte Einheit bezogen. Auf diese Weise wird die Vergleichbarkeit der vorliegenden Arbeit mit Studien von ähnlichem Inhalt erleichtert. Zum Referenzfluss des Produktsystems *1 m Tunnel* gehören der Tübbing, Ringspalt sowie die Herstellung des Tunnelquerschnittes bzgl. Ausbruch und Ausbau mittels TVA.

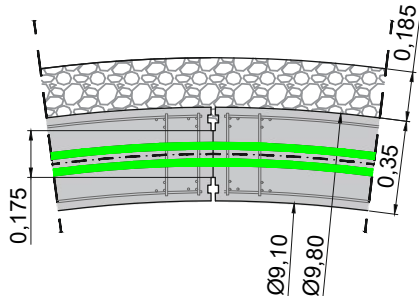
Tübbinge und Ringspalt

Für den Vergleich der Tunnelquerschnitte werden 7 Varianten untersucht. Diese unterscheiden sich anhand der Geometrie, dem Bewehrungsgrad, der daraus resultierenden Tragfähigkeit und dem örtlichen Einsatz im Tunnelbauwerk. Der Innendurchmesser des Tunnels mit 9,1 m ist für alle Varianten gleich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie für dieselbe Funktion ausgelegt sind. In diesem Fall handelt es sich um einen eingleisigen Eisenbahntunnel. Daraus ergeben sich charakteristische Abmessungen für Durchmesser, Tübbingausbau und den Ringspalt. Zusammen mit dem Normalkraftwiderstand, sowie den Einsatzbereich des jeweiligen Tübbing, sind diese in Tab. 4.1 aufgelistet. Abgebildet ist für die jeweilige Variante der Tunnelquerschnitt im Bereich des Stoßes zweier Tübbinge.

Tab. 4.1: Beschreibung der betrachteten Varianten

Herkömmlicher Querschnitt	
	Geometrie: Innendurchmesser Tübbing: 9,1 m Außendurchmesser Tübbing: 10 m Stärke Tübbing: 45 cm Breite Ring: 2 m Stärke Ringspalt: 0,185 m Ausbruchquerschnitt: 84,46 m ²
	Sonstige Eigenschaften: Normalkraftwiderstand Längsfuge: 20,68 MN Einsatzbereich: Regelbereich und Störzonen

Variante 1 und 1.1 – RET

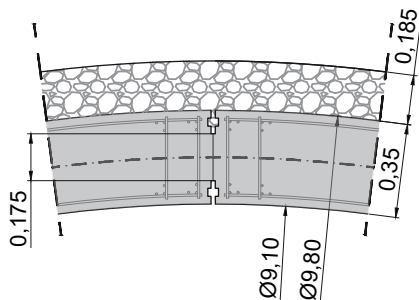
**Geometrie:**

Innendurchmesser Tübbing: 9,1 m
 Außendurchmesser Tübbing: 9,8 m
 Stärke Tübbing: 35 cm
 Breite Ring: 2 m
 Stärke Ringspalt: 0,185 m
 Ausbruchquerschnitt: 81,23 m²

Sonstige Eigenschaften:

Normalkraftwiderstand: 22,18 MN
 Einsatzbereich: Störzonen

Variante 1a – RET

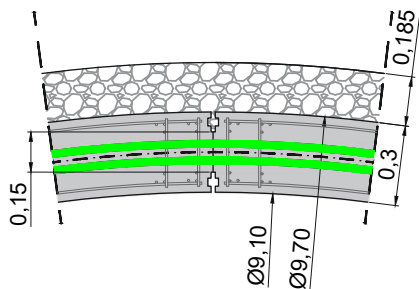
**Geometrie:**

Innendurchmesser Tübbing: 9,1 m
 Außendurchmesser Tübbing: 9,8 m
 Stärke Tübbing: 35 cm
 Breite Ring: 2 m
 Stärke Ringspalt: 0,185 m
 Ausbruchquerschnitt: 81,23 m²

Sonstige Eigenschaften:

Normalkraftwiderstand: 16,08 MN
 Einsatzbereich: Regelbereich

Variante 2 und 2.1 – RET

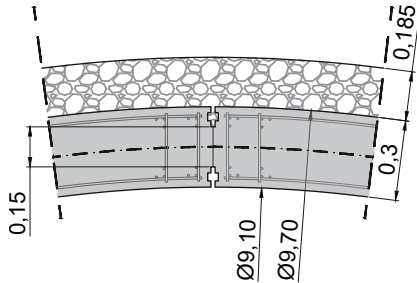
**Geometrie:**

Innendurchmesser Tübbing: 9,1 m
 Außendurchmesser Tübbing: 9,7 m
 Stärke Tübbing: 30 cm
 Breite Ring: 2 m
 Stärke Ringspalt: 0,185 m
 Ausbruchquerschnitt: 79,64 m²

Sonstige Eigenschaften:

Normalkraftwiderstand: 21,40 MN
 Einsatzbereich: Störzonen

Variante 2a – RET

**Geometrie:**

Innendurchmesser Tübbing: 9,1 m
 Außendurchmesser Tübbing: 9,7 m
 Stärke Tübbing: 30 cm
 Breite Ring: 2 m
 Stärke Ringspalt: 0,185 m
 Ausbruchquerschnitt: 79,64 m²

Sonstige Eigenschaften:

Normalkraftwiderstand: 13,78 MN
 Einsatzbereich: Regelbereich

Für den ressourceneffizienten Ausbau mit RET werden immer zwei Arten von Tübbing benötigt. Einer mit Zusatzbewehrung für die Störzonen und einer ohne für die Regelbereiche. Das geht aus Tab. 4.1 hervor. Jene Tübbings mit derselben Stärke, sind Teil eines Ausbausystems. Eine kurze Beschreibung der Funktion der einzelnen Querschnitte ist wie folgt gegeben:

Herkömmlicher Tunnelquerschnitt: Dieser Querschnitt stellt den heutigen Stand der Technik und somit die Basis für den Vergleich dar. Die Art des Ausbaus ist hierbei für die gesamte Tunnellänge identisch. Das bedeutet, dass die Tübbings in Stör- und Regelbereichen über den gleichen Bewehrungsgrad verfügen. Die Stärke der Tübbings beläuft sich im gegebenen Beispiel auf 45 cm, wie in der ersten Zeile von Tab. 4.1 gezeigt.

Variante 1 und 1.1: Im Gegensatz zum vorher beschriebenen Tunnelquerschnitt besitzen diese Varianten eine zusätzliche Längsfugenbewehrung, die in Tab. 4.1 dargestellt ist. Dadurch wird die Stärke der Tübbings auf 35 cm reduziert. Der Normalkraftwiderstand unterscheidet sich nur geringfügig von jenem des konventionell bewehrten Tübbings. Bei Variante 1 kommt herkömmlicher Bewehrungsstahl zum Einsatz. Aufgrund der Problematik, der stumpf stoßenden Längsfugenbewehrung, wird für Variante 1.1 legierter Stahl eingesetzt. Dadurch erhöht sich der Widerstand gegenüber dem Rosten von exponiertem Stahl. Die Varianten werden in Störzonen eingesetzt, da hier höhere statische Anforderungen auf den Tübbing herrschen. Für Regelzonen kommt der Ausbau laut Variante 1a zum Einsatz.

Variante 1a: Bezogen auf die Geometrie ist diese Variante identisch zur Variante 1 und 1.1. Es entfällt jedoch die zusätzliche Längsfugenbewehrung. Durch die reduzierte Tragkraft wird dieser Ausbau in Regelzonen des Tunnels eingesetzt.

Variante 2 und 2.1: Wie Variante 1 und 1.1 verfügen diese Querschnittsvarianten über eine zusätzliche Längsfugenbewehrung. Da die Stärke der Tübbings nur 0,3 m beträgt, ist das zu kompensierende Betonvolumen größer. Damit muss mehr Bewehrung verbaut werden, um den Normalkraftwiderstand im Vergleich zur herkömmlichen Variante zu halten. Variante 1 wird mit Bewehrungsstahl ausgeführt, Variante 1.1 mit legiertem Stahl. Ansonsten ist die Ausführung identisch. Zum Einsatz kommen sie in den Störzonen. Für den Regelbereich werden Tübbings des Tunnelquerschnitts der Variante 2a eingesetzt.

Variante 2a: Diese Variante ist geometrisch identisch zu den Varianten 2 und 2.1. Durch den Entfall der zusätzlichen Bewehrung ist der Normalkraftwiderstand reduziert. Deshalb wird dieser Ausbau in Regelbereichen des Tunnels eingesetzt.

Tab. 4.2: Kennzahlen zur zusätzlichen Längsbewehrung

	Var. 1	Var. 1.1	Var. 2	Var. 2.1
Breite der Kontaktfläche	0,175 m	0,175 m	0,15 m	0,15 m
Verankerungslänge der zusätzlichen Längsbewehrung	0,9 m	0,9 m	0,9 m	0,9 m
Querschnittsfläche der zusätzlichen Längsbewehrung	127,42 cm ²	127,42 cm ²	159,28 cm ²	159,28 cm ²
gew. Bewehrung	2*12 Ø 26	2*12 Ø 26	2*15 Ø 26	2*15 Ø 26
Stahl- Spezifikation	B 550	legiert	B 550	legiert

Bewehrung

Neben der Geometrie der Tübbinge stellt die Bewehrung einen zentralen Punkt in der Ökobilanz dar. Grundgedanke des Forschungsvorhabens zum ressourceneffizienten Tübbing ist, dass durch eine zusätzliche Bewehrung der Längsfuge, Betonvolumen eingespart wird. In Abhängigkeit von der zu kompensierenden Betonquerschnittsfläche erhöht sich der Bewehrungsgrad der Tübbinge. Liegt dieser bei konventionell bewehrten Tübbingungen bei ca. 80 kg Stahl pro Kubikmeter Beton,¹²⁹ erhöht er sich bei Variante 1 und 1.1 um weitere 60 kg/m³ Beton und bei Variante 2 und 2.1 um weitere 89 kg/m³ Beton.

Hinsichtlich des Durchmessers der stumpf gestoßenen Bewehrungsstäbe wurden zwei Ansätze untersucht: zum einen eine zweireihige Führung der Bewehrung mit kleineren Stabdurchmessern und entsprechend höherer Stückzahl, zum anderen eine einreihige Führung mit wenigen Stäben großen Durchmessers. Der Vorteil des letzteren Ansatzes liegt darin, dass aufgrund des großen Stabdurchmessers auch bei einem Versatz noch eine gemeinsame kraftübertragende Stahlfläche vorhanden ist. Dadurch wird der Tübbing unempfindlicher gegenüber Einbaufehlern und Relativverschiebungen. Trotz dieses positiven Aspekts wurde der erste Ansatz gewählt. Dies resultiert aus der Tatsache, dass die Verankerungslänge der Stäbe im Verhältnis zum Durchmesser stark zunimmt, was zu einem erhöhten Stahlverbrauch führt. Damit wird der ressourcenschonende Ansatz für größere Stahlmengen ad absurdum geführt. Die wichtigsten Kennzahlen der gewählten Zusatzbewehrung für die Varianten 1, 1.1, 2 und 2.1 sind in Tab. 4.2 zu finden.

Wie aus Tab. 4.2 ersichtlich, müssen bei den Varianten 2 und 2.1 6 Bewehrungsstäbe mehr auf einer kleineren Kontaktfläche untergebracht werden. Somit ist bei der Bewehrung der Längsfugen neben der Tragfähigkeit außerdem die konstruktive Durchbildung zu berücksichtigen. Die frei liegenden Kanten der Tübbingstöße stellen eine Schwachstelle für die Dauerhaftigkeit dar. Um diese Schwachstelle zu reduzieren, müssen die in *ÖNORM EN 1992* [71] geforderten Randabstände und Betonüberdeckungen eingehalten werden. Je kleiner die Kontaktfläche des ressourcenoptimierten Tübbings gegenüber dem konventionellen Tübbing ist, desto schwieriger wird die korrekte Anordnung der Bewehrung. Eine mögliche Führung der zusätzlichen Bewehrung – grün dargestellt – ist in Abb. 4.1 gezeigt. Wie in Abb. 4.1d zu erkennen ist, befindet sich in der Längsfuge eine im Verhältnis zur Kontaktfläche große Stahlmenge. Es wird empfohlen, die konkret in einem Projekt geforderten Randabstände zu überprüfen und gegebenenfalls Probelastungen durchzuführen.

¹²⁹Vgl. [92], S. 36 ff.

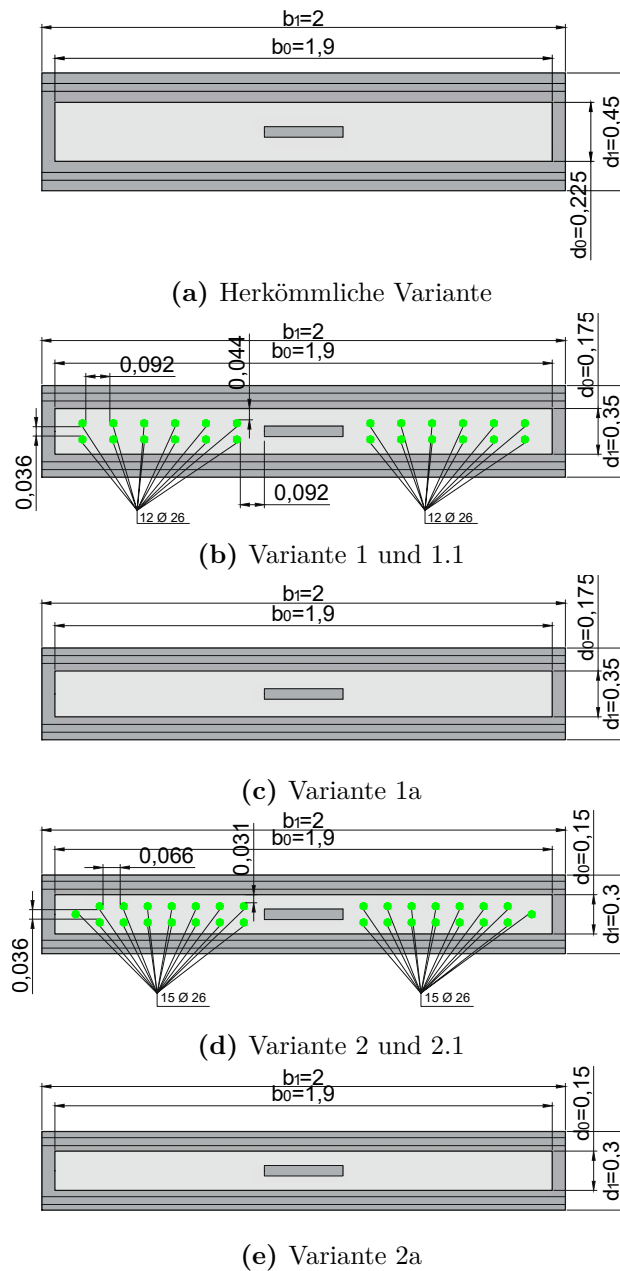


Abb. 4.1: Darstellung der zusätzlichen Längsfugenbewehrung

TVA

Der dritte Punkt, der in der Ökobilanz betrachtet wird, ist der Vortrieb mittels TVM. Durch den geringeren Ausbruchquerschnitt der ressourceneffizienten Tübbinge wird weniger Energie verbraucht. Diese Reduzierung wird für eine TVA bilanziert. Zu dieser zählen neben dem eigentlichen Aubbauwerkzeug – TVM – noch zusätzliche Einrichtungen zur Förderung des Ausbruchmaterials, z.B. Förderband, die Lüftung des Tunnels und sonstige logistische Bestandteile des Tunnels.¹³⁰ Da es aufgrund der großen Bandbreite der Anforderungen ein genauso breites Spektrum an unterschiedlichen Maschinentypen und Antriebsleistungen gibt, wurde für diese Betrachtung kein

¹³⁰[88] STRABAG

konkreter Typ definiert. Vielmehr steht der Verbrauch der Anlage im Vordergrund. Hierbei wird mit einem mittleren Energieverbrauch von 150 kWh/m³ gerechnet.

Verwendete Datenbanken, Programme und Wirkungskategorien

Die in der Datenbank hinterlegten Daten wurden in die Open Source Software openLCA eingepflegt. Für die Berechnung der Indikatoren bzw. Parameter wurden ausschließlich Daten aus dieser Datenbank verwendet. Ziel der vorliegenden Ökobilanz ist die Erarbeitung von Einsparpotentialen in Bezug auf die Umweltwirkungen und in weiterer Folge auf den Klimawandel. Von besonderem Interesse sind daher die Treibhauspotentiale. Die Ergebnisse für den Primärenergieeinsatz werden ebenfalls ausgewertet. Dieser Punkt wird jedoch nicht so ausführlich behandelt wie jener der Treibhausgas-Emissionen.

Vergleichbarkeit

Die Ergebnisse dieser Ökobilanz sind nur dann miteinander vergleichbar, wenn die verwendeten Daten der gleichen Hintergrunddatenbank entsprechen und nach den Regeln der *ÖNORM EN 15804* [68] erstellt wurden.

4.1.3 Systemgrenzen

Durch den stark vergleichenden Charakter dieser Ökobilanz werden jene Flüsse, Prozesse und Produkte nicht berücksichtigt, die bei allen Varianten gleich ausfallen. Ebenfalls zu bemerken ist, dass ein starker Fokus auf den eingesetzten Materialien des Tunnelquerschnittes liegt.

Die zeitliche Systemgrenze wird für die Lebenszyklusphasen Herstellung – Module A1–A3 – und Erstellung – Modul A5 – gesteckt. Letztere kommt nur gering zu tragen, da nur wenige Prozesse in diese Phase fallen. Der Transport – Modul A4 – von, zur und auf der Baustelle wird nicht beachtet. Das inkludiert die Transportprozesse zur Weiterverarbeitung bzw. Deponierung des Aushubmaterials. Außerdem nicht mit einbezogen wird die Baustelleneinrichtung.

Räumlich soll die Ökobilanz den geografisch europäischen Raum abdecken. Dafür werden bei der Datenauswahl, wenn vorhanden, europäische Werte herangezogen. So zeichnet die Analyse ein Bild des Tunnelbaus in diesem Kontinent ab. Für die Sensitivitätsprüfung wird zusätzlich die DACH-Region beleuchtet.

Bei der funktionalen Abgrenzung liegt der Schwerpunkt auf dem Tunnelausbau. Dazu gehören der Ringspalt, der Tübbingausbau sowie die Tunnelvortriebsanlage. Der Ringspalt, in Abb. 4.2 gelb markiert, schließt die zur Herstellung der Rezeptur benötigten Materialien ein. Die gelb markierten Tübbinge umfassen den Beton sowie den Bewehrungsstahl für die Fertigteile. Zusätzlich wird der Betrieb der Betonmischanlage sowie die Anlage zur Wärmebehandlung, der die Tübbinge zur schnelleren Aushärtung unterzogen werden, berücksichtigt. Die TVA ist für die Herstellung des Tunnelhohlraums sowie den Einbau der Tübbinge und das Verpressen des Ringspalts verantwortlich. Ihr Energiebedarf kann keinem der beiden Ausbauelemente eindeutig zugeordnet werden, da viele Arbeitsschritte gleichzeitig stattfinden. Sie wird daher in der Ökobilanz separat betrachtet. Nicht berücksichtigt sind Einbauten wie Gleise, Beleuchtung und Lüftung. Diese sind daher in Abb. 4.2 ausgegraut dargestellt. Abdichtungen in den Fugen der Tübbingstöße werden nicht bilanziert. Ebenfalls vernachlässigt werden Flüsse und Prozesse im Zusammenhang mit dem Transport und der Weiterverarbeitung des Ausbruchmaterials. Der Erreichung des Ziels der Ökobilanz ist es nicht dienlich, jede einfließende Stoffmenge und jeden Energiefluss miteinzubeziehen. Damit die Relevanz der betrachteten Aspekte gegeben ist, wird ein Abschneidekriterium innerhalb der Systemgrenzen definiert.

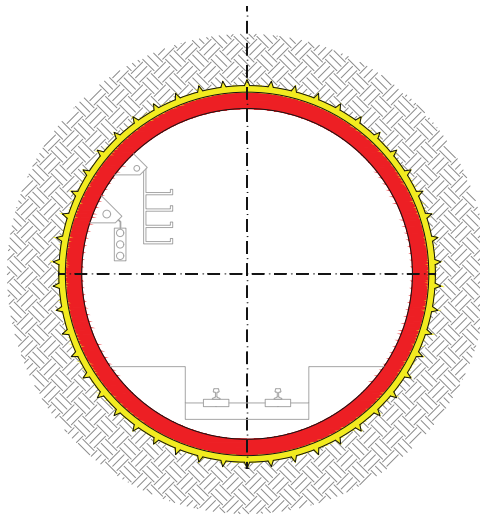


Abb. 4.2: Darstellung der funktionalen Systemgrenzen im Tunnelquerschnitt

Abschneidekriterium

Ob ein Material in die Ökobilanzierung aufgenommen wird, richtet sich nach dem ersten Iterationsschritt, einer Dominanzanalyse. Anhand derer wird abgeschätzt, welchen Einfluss die einzelnen Materialien und Prozesse haben. Da der Fokus der Ökobilanz auf die Auswirkungen des Bauwerks auf das Klima liegt, wird das Abschneidekriterium für die CO₂-Äquivalente definiert. Vernachlässigt werden jene Materialien, die weniger als 1% der Emissionen ausmachen. Die Summe der Emissionen der vernachlässigten Materialien darf nicht größer als 5% sein. Trifft dieses Kriterium auf ein Material der 7 Varianten zu, wird es im Zuge der restlichen Bilanz nicht mehr berücksichtigt. Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tab. 4.3 aufgelistet. Für diese erste Abschätzung wurden Datensätze aus der Datenbank angenommen. Da diese in den nächsten Schritten der Ökobilanz noch geändert werden, sind sie an dieser Stelle nicht weiter von Relevanz.

Wie sich in Tab. 4.3 zeigt, ist das Abschneidekriterium für die Materialien Bentonit und Gesteinskörnung erfüllt. Somit entfallen sie für die weitere Bilanzierung. Das Kriterium, dass die Summe der abgeschnittenen Materialien, nicht 5% überschreiten darf, ist für alle Tunnelquerschnitte eingehalten.

Systemgrenzen der Prozesse

Aus den in Kap. 4.1.3 gegebenen Definitionen und Anforderungen ergeben sich Abb. 4.3 die Systemgrenzen. Klar ersichtlich ist, dass die Eingangsressourcen Rohstoffe und Energie sind. Wesentliche Outputs sind der Aushub, Emissionen, Abfälle und Abwasser. Ebenfalls erkenntlich ist, dass ein Großteil der für die Bilanz wichtigen Prozesse während der Herstellungsphase stattfindet.

Für die weitere Berechnung ist es notwendig zu wissen, mit welchen Systemgrenzen ein Prozess zu bilanzieren ist. In dieser Arbeit sind die verwendeten Materialien sowie die für die Herstellung und Errichtung der Tunnelquerschnitte aufgewendete Energie von großer Bedeutung.

Materialien: Wie Tab. 4.3 zeigt, werden die Materialien Beton, Stahl für die Bewehrung und Zement eingesetzt. Für den Beton der gewählten Festigkeitsklasse C50/60 sind keine europäischen Werte vorhanden. Somit wird ein globaler Wert angenommen. Dieser beinhaltet alle Herstellungsprozesse bis zum mischfertigen Beton. Für den Stahl zur Bewehrung der Tübbinge werden europäische Daten für konventionellen Bewehrungsstahl und für legierten

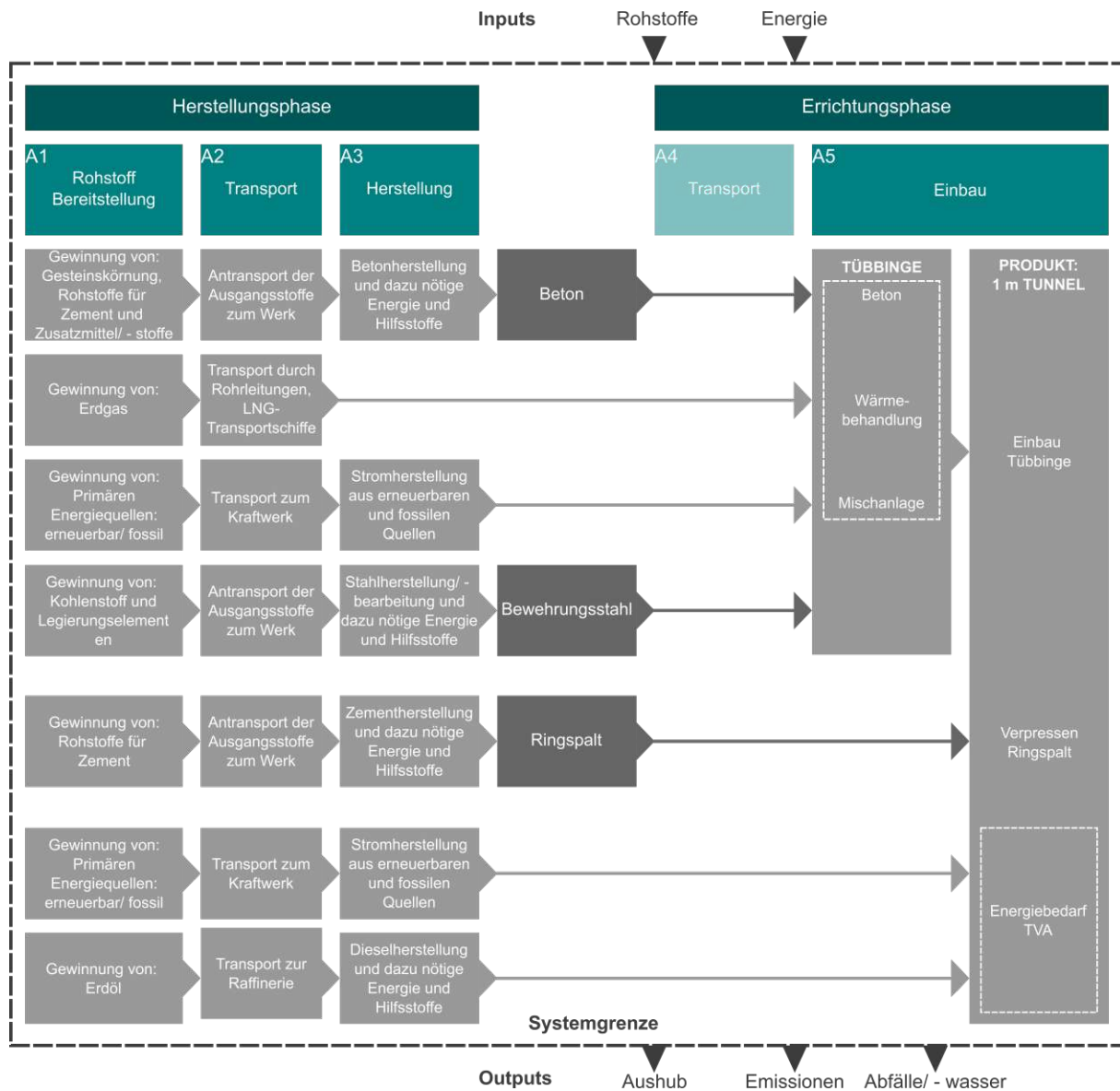


Abb. 4.3: Darstellung der Systemgrenzen und der Prozesse

Tab. 4.3: Anteile der Prozesse und Materialien an den Gesamtemissionen aus CO₂ für die betrachteten Varianten

	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1.a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2.a
Tübbing: Beton – Herstellung	56,11%	49,78%	33,61%	51,98%	46,33%	29,68%	49,23%
Tübbing: Gas – Herstellung	5,12%	4,57%	3,09%	4,74%	4,28%	2,74%	4,50%
Tübbing: Gas – Errichtung	0,74%	0,66%	0,44%	0,68%	0,62%	0,39%	0,65%
Tübbing: Strom – Errichtung	1,07%	0,96%	0,65%	0,99%	0,89%	0,57%	0,94%
Tübbing: Bewehrungsstahl – Herstellung	5,79%	9,10%	3,50%	5,37%	10,21%	3,09%	5,08%
Tübbing: Stahl legiert – Herstellung	–	–	24,30%	–	–	25,28%	–
Tübbing: Stahlbearbeitung – Herstellung	–	–	10,84%	–	–	14,10%	–
Ringspalt: Zement – Herstellung	6,84%	7,77%	5,25%	8,06%	8,44%	5,41%	8,88%
Ringspalt: Gesteinskörnung – Herstellung	0,32%	0,36%	0,25%	0,38%	0,39%	0,25%	0,45%
Ringspalt: Bentonit – Herstellung	0,08%	0,09%	0,06%	0,10%	0,10%	0,07%	0,13%
TVA: Strom – Herstellung	17,19%	19,17%	12,94%	19,89%	20,65%	13,23%	21,71%
TVA: Diesel – Errichtung	5,89%	6,58%	4,44%	6,83%	7,07%	4,53%	7,43%
TVA: Diesel – Herstellung	0,85%	0,95%	0,64%	0,98%	1,02%	0,65%	1,02%
Summe der Materialien kleiner als 1,0%	0,40%	0,46%	0,31%	0,47%	0,50%	0,32%	0,58%

Stahl verwendet. Für den legierten Stahl ist die Stahlverarbeitung zu berücksichtigen. Die Produktion der Tübbinge findet auf einer Feldfabrik auf der Baustelle statt. Zu dieser Anlage gehören eine Mischanlage für den Beton und die Wärembehandlung der Fertigteile. Für den Zement werden ebenfalls europäische Werte verwendet. Der Wasserbedarf für die Beton- und Zementherstellung wird nicht berücksichtigt. Ebenfalls vernachlässigt wird der Transport der Materialien vom Produktionsort zur Baustelle.

Strom: Der eingesetzte Strom ist ein treibender Faktor für GWP- Emissionen. Um ein möglichst neutrales Bild für Europa aufzuzeigen, wird ein Durchschnittswert der Stromherstellung angenommen. Dieser repräsentiert den Produktionsmix aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Quellen. Die im Netz entstehenden Verluste werden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Sonstige Energieträger: Neben dem Strom werden Diesel und Erdgas als Energieträger eingesetzt. Für die Ökobilanz wird die Herstellung und Verbrennung der Treibstoffe bilanziert. Bei Diesel wird der Transport zur Baustelle vernachlässigt.

Baugeräte/ Tunnelvortriebsanlage: In der Ökobilanzierung wird lediglich die TVA berücksichtigt. Von dieser Maschine fließt jedoch nur der Verbrauch in die Berechnung mit ein. Für eine Bilanzierung der Maschine selbst stehen nicht ausreichend Daten zur Verfügung. Hinzu

kommt, dass sich TVAs aufgrund ihrer unterschiedlichen Aufgaben stark unterscheiden und somit nicht zufriedenstellend verglichen werden können.

Eine genaue Auflistung der einzelnen Prozesssysteme für das bilanzierte Beispiel ist im Folgenden Kapitel dargestellt. Die Sachbilanz identifiziert und quantifiziert die Eingangsdaten für die Ökobilanz. Darüber hinaus stellt sie die Zuordnung der auftretenden Flüsse bzw. Emissionen, die sogenannte Allokation, der Prozesse dar.

4.2 Sachbilanz

Die Sachbilanz ist der nächste Schritt in der Ökobilanz. In der ihr werden die Eingangsdaten für die Ökobilanz ermittelt. Aufgrund des Umfangs der Berechnung werden die wichtigsten Schritte der Datenerhebung beschrieben. Ebenfalls aufgelistet sind Annahmen, die im Zuge der Berechnung getroffen wurden. Die Ergebnisse der Sachbilanz werden auf die funktionelle Einheit bezogen. Unterteilt ist die Sachbilanz in:

- Tübbing – Beton
- Tübbing - Bewehrung
- Ringspalt
- Tunnelvortriebsanlage.

Dieser Gliederung der Funktion nach, ermöglicht eine klare Zuordnung der Emissionen und Ressourcen in weiteren Schritten der Ökobilanz. So erfolgt die Allokation der eingehenden Prozesse ebenfalls dem funktionalen Ansatz. Die Emissionen und Ressourcen der TVA können keinem konkreten Prozess zugeordnet werden, deshalb werden sie eigenständig betrachtet.

4.2.1 Tübbing – Beton

Für diesen Punkt der Ökobilanz werden die eingesetzten Materialien für die Herstellung mischfertigen Beton, sowie die Betonmischanlage und Wärmebehandlung betrachtet. Gemeinsam sind sie Teil der Tübbinge, die während der Errichtungsphase durch die TVA im Tunnel eingebaut werden. Für die Tübbingproduktion wird eine Feldfabrik angenommen. So sind lokal wirksame Emissionen der Errichtungsphase zuzuschreiben.

Beton

Für den Beton wird eine Festigkeitsklasse von C50/60 angenommen. Dadurch ist eine hohe Frühfestigkeit und damit schnelle Weiterverarbeitbarkeit der Tübbinge gegeben. Für die Ökobilanz von Relevanz ist das Volumen des Betons pro Meter Tunnel. Diese sind für die einzelnen Tunnelquerschnitte in Tab. 4.4 gegeben. Bei den Varianten mit zusätzlicher Bewehrung wird das Volumen des Bewehrungsstahls vom Betonvolumen subtrahiert. So ergeben sich für die Tunnelquerschnitte der Varianten 1, 1.1, 2 und 2.1 geringere Volumina.

Tab. 4.4: Betonvolumina zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: mischfertiger Beton							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Tübbingstärke	0,45 m	0,35 m	0,35 m	0,35 m	0,3 m	0,3 m	0,3 m
Betonvolumen	13,50 m ³	10,31 m ³	10,31 m ³	10,39 m ³	8,76 m ³	8,76 m ³	8,86 m ³

Mischanlage

Durch die Annahme, dass die Tübbinge auf einer Feldfabrik gefertigt sind, wird die Betonrezeptur in der Mischanlage auf der Baustelle weiterverarbeitet. Die dafür benötigte Energie beläuft sich auf 30 kWh/m³. Betrieben wird die Anlage von elektrischem Strom.¹³¹ Somit ergibt sich mit dem vorher ermittelten Betonvolumen der in Tab. 4.5 aufgelistete Strombedarf für die Wärmebehandlung pro Meter Tunnel.

Tab. 4.5: Energiebedarf der Mischanlage zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Strom							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Energiebedarf	405 kWh	309 kWh	309 kWh	312 kWh	263 kWh	263 kWh	266 kWh

Wärmebehandlung

Zur Beschleunigung des Erhärtungsprozesses werden die Tübbinge einer Wärmebehandlung unterzogen. Dabei dürfen vorgegebene Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten sowie maximale Temperaturdifferenzen zwischen Betonoberfläche und Kerntemperatur nicht überschritten werden. Eine Nichtbeachtung würde zu einer Einschränkung der Dauerhaftigkeit der Bauteile führen.¹³²

Der Energiebedarf für einen Kubikmeter Stahlbeton beträgt 25 kWh. Als Energiequelle für die extern zugeführte Wärme wird im betrachteten Beispiel Gas verwendet.¹³³ Unter der Annahme, dass 1 kWh 3,6 MJ entspricht und 40 MJ/m³ Gas enthalten sind, ergeben sich die Werte aus Tab. 4.6 für 1 m Tunnel. Es ist zu beachten, dass das zu behandelnde Volumen sowohl die Bewehrung als auch den Beton umfasst.

Tab. 4.6: Energiebedarf der Wärmebehandlung zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Gas							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Energiebedarf	338 kWh	260 kWh	260 kWh	260 kWh	221 kWh	221 kWh	221 kWh
Gasbedarf	30 m ³	23 m ³	23 m ³	23 m ³	20 m ³	20 m ³	20 m ³

4.2.2 Tübbing – Bewehrung

Der zweite maßgebende Bestandteil der Tübbinge, neben dem Beton, ist die Bewehrung. Zum Einsatz kommt Stabbewehrung. Diese wird für die herkömmliche Bewehrung und die zusätzliche Längsfugenbewehrung verwendet. Abhängig von dem jeweiligen Tunnelquerschnitt kommt für Letztere herkömmlicher Bewehrungsstahl oder legierter Stahl zur Anwendung.

Bewehrungsstahl

Für alle betrachteten Tunnelquerschnitte bzw. Tübbinge wird von einem Bewehrungsgrad von 80 kg/m³ Beton ausgegangen. Die an den Längsfugen bewehrten Tübbinge 1 und 2 enthalten zusätzlich 60,64 kg/m³ bzw. 88,91 kg/m³. Eine detaillierte Berechnung findet sich im Anhang. Mit diesen Werten ergeben sich die in Tab. 4.7 angegebenen Stahlmengen pro Meter Tunnel.

¹³¹[88] STRABAG

¹³²[8] Breitenbücher, S. 430 f.

¹³³[88] STRABAG

Tab. 4.7: Bewehrungsstahl zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Bewehrungsstahl							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Reguläre Bewehrung	1080 kg	831 kg	831 kg	831 kg	709 kg	709 kg	706 kg
Zusätzliche Bewehrung	–	630 kg	–	–	788 kg	–	–

Legierter Stahl und Stahlbehandlung

Um den negativen Auswirkungen einer möglichen Exposition des Bewehrungsstahls entgegenzuwirken, wird bei den Varianten 1.1 und 2.1 für die zusätzliche Bewehrung legierter Stahl verwendet. Dieser Stahl muss noch einer Stahlbearbeitung unterzogen werden. Diese bezieht sich auf die erforderliche Stahlmenge. Die Berechnung dieser ist identisch mit jener der Bewehrung mit konventionellem Betonstahl. Damit ergibt sich der in Tab. 4.8 angegebene Stahlbedarf pro Meter Tunnel.

Tab. 4.8: Stahlbedarf zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Legierter Stahl, Prozessenergie für die Stahlbearbeitung							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Zusätzliche Bewehrung	–	–	630 kg	–	–	788 kg	–

4.2.3 Ringspalt

Das Abschneidekriterium hat ergeben, dass für die Bilanzierung des Ringspaltes nur der Zement berücksichtigt wird. Bei der für den DACH-Raum angenommenen Rezeptur werden 150 kg Zement pro Kubikmeter fertigen Ringspaltmörtel eingesetzt.¹³⁴ Multipliziert man diesen Bedarf mit dem Volumen des Ringspaltes pro Tunnelmeter, so erhält man die in Tab. 4.9 angeführten Werte.

Tab. 4.9: Zementmenge zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Zement							
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Ringspaltvolumen	5,92 m ³	5,80 m ³	5,80 m ³	5,80 m ³	5,75 m ³	5,75 m ³	5,75 m ³
Zementbedarf	888 kg	870 kg	870 kg	870 kg	862 kg	862 kg	862 kg

4.2.4 Tunnelvortriebsanlage

Wie bereits in Kap. 4.1.3 dargelegt, wird bei der TVA lediglich der Energieverbrauch der Anlage berücksichtigt. Zu den Betriebsstoffen zählen Strom und Diesel. Der Strombedarf einer solchen Anlage wird mit 150 kWh/m³ angenommen.^{4.2.3} Für den Diesel wird ein Verbrauch von 1,5 l/m³ Ausbruch angesetzt. Mit dem dazugehörigen Ausbruchquerschnitt ergibt sich der in Tab. 4.10 aufgelistete Verbrauch der Energieträger der einzelnen Tunnelquerschnittsvarianten für 1 m Tunnel.

¹³⁴[88] STRABAG

Tab. 4.10: Energiebedarf der TVA zur Berechnung der Ökobilanz

Eingangsressourcen: Strom		Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Ausbruchvolumen pro Meter	m ³	84,46	81,23	81,23	81,23	79,64	79,64	79,64 m ³
Strombedarf	kWh	12669	12185	12185	12185	11946	11946	11946
Dieserverbrauch	l	126,69	121,85	121,85	121,85	119,46	119,46	119,46

Die dargelegten Ergebnisse der Sachbilanz fließen in den nächsten Schritt – die Wirkungsabschätzung – ein. In ihr werden den quantitativen Werten der Sachbilanz Indikatoren und Parameter der Ökobilanz zugewiesen.

4.3 Wirkungsabschätzung

Eine reine Betrachtung der Ergebnisse des Kap. 4.2 reicht für eine Ökobilanz nicht aus. Um das gesteckte Ziel zu erreichen, müssen die Sachbilanzergebnisse Wirkungskategorien zugeordnet werden. Zweck der vorliegenden Untersuchung ist die Ermittlung der ökologischen Einsparpotentiale der verschiedenen Tunnelquerschnitte. Dabei wird der Fokus auf den Indikatorwert Treibhausgas gelegt. Aus diesem Grund wird die Sensitivitätsanalyse ausschließlich für die CO₂-Äquivalente durchgeführt.

4.3.1 Wirkungskategorien

Wie bereits in Kap. 2.2.1 erwähnt, gibt es nach *ÖNORM EN 15804* [68] bestimmte Wirkungskategorien, anhand derer die Auswirkungen von Produkten zusammengefasst und bewertet werden. Die Quantifizierung erfolgt anhand der Ergebnisse der Sachbilanz und der Werte der Wirkungsindikatoren. Die für diese Ökobilanz berücksichtigten Wirkungskategorien sind in Tab. 4.11 dargestellt.

Tab. 4.11: Verwendete Indikatoren und Parameter (Quelle: modifiziert nach *ÖNORM EN 15804* [68, 45 ff.]

Wirkungskategorie	Indikator der Umweltwirkungen	Einheit (angegeben je funktionale oder deklarierte Einheit)
Klimawandel- gesamt	Treibhauspotential insgesamt (GWP-gesamt)	kg CO ₂ -Äq.
Parameter zur Beschreibung des Ressourceneinsatzes		Einheit (ausgedrückt als funktionale/ deklarierte Einheit)
	Gesamteinsatz Primärenergie	MJ

Durch die Fokussierung der Ökobilanz auf die klimatischen Auswirkungen der Tunnelquerschnitte, ist die bedeutendste Wirkungskategorie jene des Klimawandels. Als Bezugseinheit werden kg CO₂-Äquivalente verwendet. Das Charakterisierungsmodell für die Treibhausgasemissionen folgt dem Szenario Baseline über 100 Jahre des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen, dem Intergovernmental Panel on Climate Change.

Ebenfalls mit in die Ökobilanz aufgenommen wurde der Gesamteinsatz aus Primärenergie. Die Einheit, anhand derer die Auswirkungen gemessen werden, ist in MJ-Äquivalente pro betrachteter

Einheit – 1 m Tunnel – gegeben. Für das Charakterisierungsmodell wurde der kumulierte Energieaufwand, auch genannt KEA, herangezogen.

4.3.2 Sensitivitätsanalyse

Für alle Materialien und Prozesse, die in Tab. 4.3 bei mindestens einer der Tunnelquerschnittsvarianten einen Anteil von größer gleich 5% erreicht haben, wird im Folgenden eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Durch die Analyse wird die Bandbreite der vorhandenen Daten verdeutlicht.

Ausgeführt wird die Betrachtung lediglich für die Wirkungskategorie des Klimawandel und somit für die kg CO₂-Äquivalente pro Meter Tunnel. Die Ergebnisse der Ökobilanz sollen für den europäischen Raum gelten. Somit wurde, wenn vorhanden, der Durchschnittswert für Europa gewählt. Im Anhang ist eine Auflistung der angesetzten Daten gegeben. Für die einzelnen Materialien und Prozesse sind jeweils der Mittelwert, der gewählte Wert sowie die Spannweite des Konvidenzintervalls von 95% dargestellt.

Beton und Zement

Für die Sensitivitätsanalyse von dem Material Beton waren 8 Datensätze zu Verfügung. Keiner davon enthielt Daten für den europäischen Raum. Somit wurde ein Datensatz gewählt, der sich aus Werten der gesamten Welt zusammensetzt. Dieser Wert ordnet sich, wie in Abb. 4.4a ersichtlich, am unteren Ende des 95%-Konfidenzintervalls ein.

Für den Zement standen 18 Datensätze zu Verfügung. Gewählt wurde ein für Europa gültiger Wert. Wie aus Abb. 4.4b zu erkennen ist, befindet sich der Wert noch innerhalb des gegebenen Intervalls.

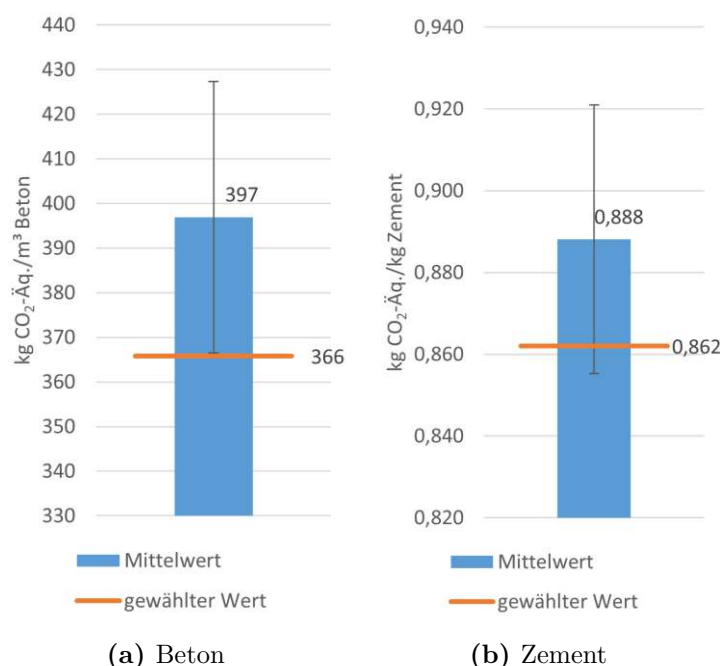


Abb. 4.4: Sensitivitätsanalyse von Beton und Zement

Neben dem Material Zement wurden zusätzlich noch unterschiedliche Ringspaltrezepturen untersucht. Diese variieren je nach Anforderungen stark. Eines der maßgeblichen Unterscheidungsmerkmale ist der Anteil an Zement. So werden inaktive (kein Zement) bedingt aktive

Tab. 4.12: Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Ringspaltrezepturen

		gew. Rezep.	inaktiv	bed. aktiv	aktiv	2K – Mc	2K – Mb	2K – Ma
Zementtyp		CEM I	CEM I	CEM I	CEM I	CEM II/B	CEM II/B	CEM III/A
Zement	kg/m ³	150	0	60	194	270	240	260
Stabilisierer	kg/m ³					2,2	6	3
Beschleuniger	kg/m ³					100	80	90
Summe	kg CO ₂ -Äq. pro m ³	129	0	52	167	550	467	510

(bis ca. 60 kg/m³) und aktive (bis ca. 200 kg/m³) Ringspaltmörtel unterschieden.¹³⁵ Die für die Bilanzierung gewählte Rezeptur ist mit 150 kg/m³ gegeben.¹³⁶ Eine Sonderform stellen die 2-Komponentenmörtel dar. Durch den Einsatz von Stabilisierern kann die erste Komponente über lange Zeit pumpfähig gehalten werden. Durch die unmittelbare Vermischung mit der zweiten Komponente – dem Beschleuniger – während des Verpressvorganges, kommt es zu einer sofortigen Verfestigung des Mörtels. Um ökologische Unterschiede darzustellen, wurden die in Tab. 4.12 gegebenen Rezepturen untersucht. Da das Abschneidekriterium für die Gesteinskörnung und Bentonit einen sehr geringen Einfluss ergeben hat, werden nur Zement, Stabilisierer und Beschleuniger betrachtet.^{135, 137}

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abb. 4.12 dargestellt. Es wird deutlich, dass neben dem Zement der Beschleuniger eine große Rolle spielt. Aufgrund des geringen Massenanteils hat der Stabilisierer nur einen geringen Anteil an den CO₂-Äq.-Emissionen. Weiter ist zu erkennen, dass die 2-Komponenten-Mörtel aufgrund ihrer langen Verarbeitungszeit zwar für den Baubetrieb vorteilhaft sind, sich aus Sicht des Klimas negativ auswirken. Insgesamt gibt die Abb. 4.12 einen guten Überblick über die Bandbreite, in der sich die Emissionen für die Ringspaltrezeptur bewegen.

Bewehrung

Bzgl. der Bewehrungsstahlherstellung ergibt sich bei einer geringen Anzahl der Datensätze – 4 Stk. –, eine große Spannweite der Werte. Gewählt wurde ein Datenbaustein für den europäischen Durchschnitt, der Österreich nicht inkludiert. In diesem enthalten ist die Stahlverarbeitung, also das Warmwalzen der Bewehrungsstäbe. Der Wert ist in Abb. 4.6a dargestellt. Für diesen Prozess ist leider kein Datensatz vorhanden, der Österreich ebenfalls inkludiert. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der österreichische Wert sehr gering ist und somit den Durchschnitt verzerrt.

Für den legierten Stahl wurden 12 Datenblöcke untersucht. Ähnlich wie beim Bewehrungsstahl ergibt sich hier ein großer Streubereich. Dies ist auf die unterschiedlichen Herstellungsverfahren zurückzuführen. Es wird der für Europa gültige Datensatz verwendet. Dieser liegt nahe am Mittelwert der betrachteten Datenreihe, was aus Abb. 4.6b deutlich hervorgeht. Der Wert liegt am oberen Ende des Konfidenzintervalls, wie aus Abb. 4.6c erkennbar ist.

Da der gewählte Datensatz für legierten Stahl die Bearbeitung noch nicht enthält, muss diese zusätzlich betrachtet werden. Dazu wurden 10 Werte untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Bearbeitungsmethoden ergibt sich ein großer Unterschied in den eingehenden Werten. Ausgewählt wurde jener Wert, der dem Mittelwert für den europäischen Raum am nächsten liegt.

Generell sind bei der Bewehrung große Unterschiede in den Werten festzustellen. Die Wahl eines sehr hohen oder sehr niedrigen Wertes beeinflusst die Ergebnisse der Ökobilanz.

¹³⁵Vgl. [9] Breitenbücher und Youn-Cale, S. 273 ff.

¹³⁶Vgl. [88] STRABAG

¹³⁷Vgl. [83] Sauer, S. 75

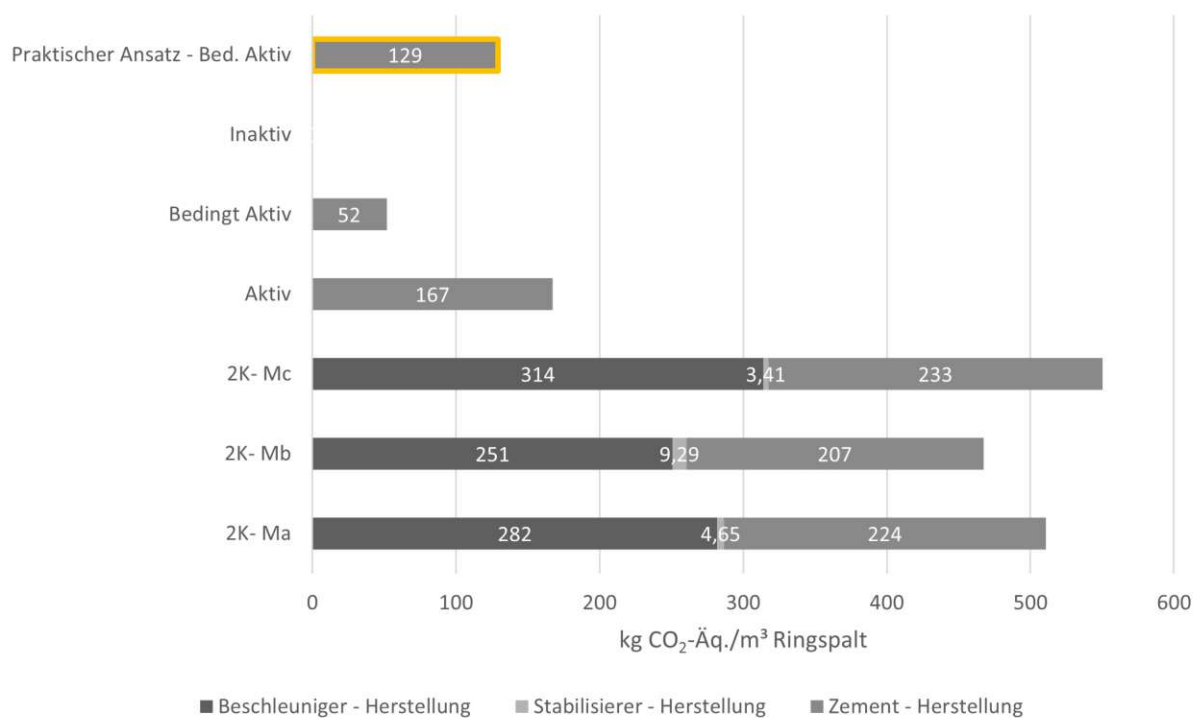


Abb. 4.5: Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Ringspaltrezepturen

Energie

Mit Ausnahme von Andorra, Lichtenstein, Monaco, San Marino und dem Vatikanstaat wurden die Datensätze für 41 Länder, die geografisch zu Europa gehören, ausgewertet. Für die Ökobilanz wurde jener Wert gewählt, welcher bezogen auf die CO_2 -Äq./kWh am nächsten zum europäischen Durchschnitt liegt. Aufgrund des unterschiedlichen Energiemixes aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Stromquellen ergeben sich für Europa große Unterschiede bei den Ländern. So liegt der Wert für die Kilowattstunde statt bei 0,444 kg CO_2 -Äq. für Italien, bei nur 0,14 kg CO_2 -Äq. für Österreich. Aufgrund der großen Menge an Strom, die für die Herstellung des Tunnelbauwerks benötigt wird, hat das einen großen Einfluss auf die Ergebnisse.

Für Dieselkraftstoff ist die Verbrennung auf der Baustelle ausschlaggebend. Dazu wurden 4 Datensätze untersucht. Da keine europäischen Werte vorliegen, wird ein globaler Datensatz verwendet. Der Datensatz bezieht sich auf Europa mit Ausnahme von der Schweiz.

Gleich wie beim Strom wurde für Erdgas der europäische Kontinent untersucht. Die vorhandenen Datensätze der Länder sind deutlich geringer als bei der Analyse für den Strom. 27 Daten fließen in die Betrachtung ein. Es wird der Wert gewählt, der dem Mittelwert am nächsten liegt. Für die Verbrennung des Gases, während der Wärembehandlung der Tübbinge, wird ein Europa präsentierender Datensatz herangezogen.

Die gewählten Wirkungskategorien und die in der Sensitivitätsanalyse ermittelten Werte der Indikatoren werden im Folgenden ausgewertet. Dafür werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsanalyse verbunden. Das definierte Ziel der Ökobilanz sind die Ergebnisse aus diesem Schritt.

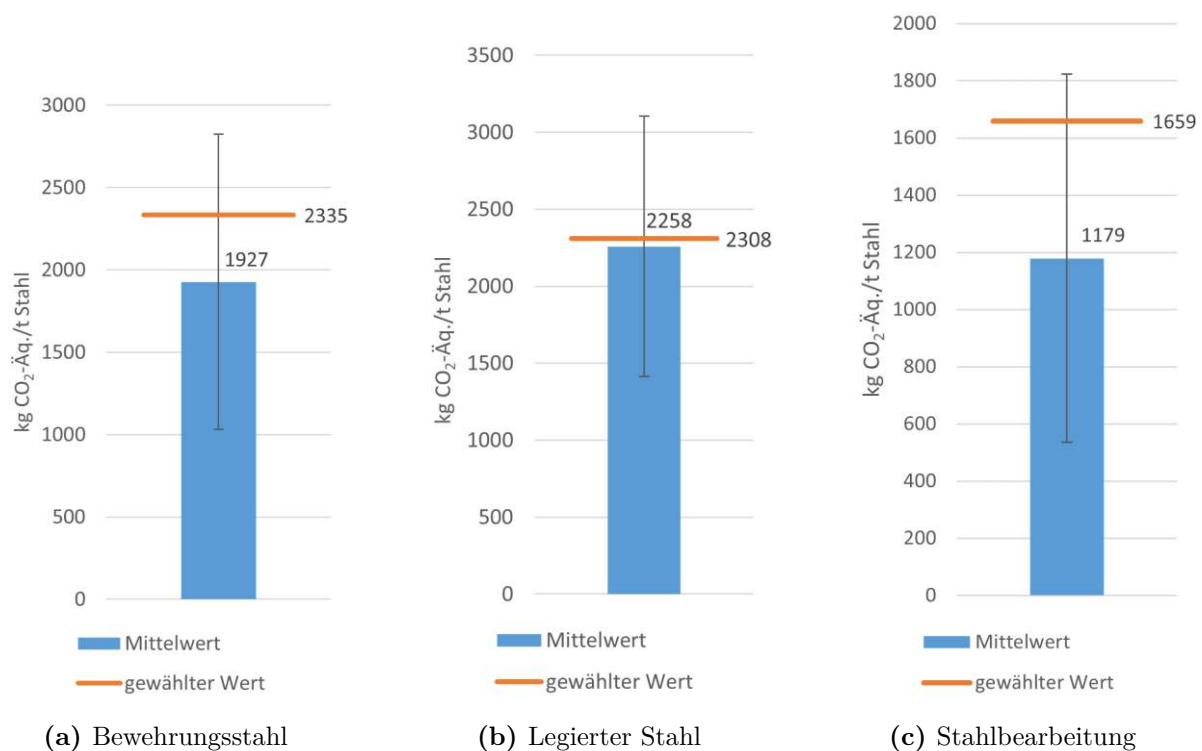


Abb. 4.6: Sensitivitätsanalyse von Bewehrungsstahl und Stahlarbeiten

4.4 Auswertung und Ergebnisse

Als letzter Schritt der Ökobilanz werden Auswertung und Ergebnisse der einzelnen Tunnelquerschnittsvarianten dargelegt. Diese sind für die in Kap. 4.8 ausgewählten Wirkungskategorien zu vergleichen. Daraus lassen sich für die einzelnen Querschnitte signifikante Parameter und Eingangsgrößen identifizieren. Im Zuge der Sensitivitätsprüfung werden Datensätze für den DACH-Raum ausgewertet. Damit wird die Spannweite der Einsparungspotentiale sichtbar. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen der Ökobilanz gezogen.

4.4.1 Wirkungskategorie Klimawandel – Allgemein

Für die Wirkungskategorie Klimawandel wurden die treibhausaktiven Emissionen untersucht. Die Summe der ermittelten CO₂-Äq.-Emissionen der einzelnen Varianten sind in Abb. 4.8 gegeben. Wie zu sehen ist, variieren die Werte zwischen 14,9 t CO₂-Äq./m für Variante 1.1 und 11,5 t CO₂-Äq./m für Variante 2a. Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Varianten mit legiertem Stahl als Längsfugenbewehrung schlechter abschneiden als die herkömmliche Variante. Das lässt sich auf die hohen Emissionen während der Stahlherstellung und -bearbeitung zurückführen. Allgemein stammt der Großteil der Emissionen aus den Prozesssystemen TVA und Tübbing. Der Ringspalt macht im Verhältnis einen geringen Teil aus.

Die absoluten Werte der einzelnen Prozesssysteme sind in Tab. 4.13 aufgeführt. Die relative Einsparung im Vergleich zur herkömmlichen Variante ist für jede Variante angegeben. Beim Tübbingausbau zeigt sich, dass das maximale Einsparungspotential bei gleichbleibendem Normalkraftwiderstand – siehe Tab. 4.1 – mit Variante 2 gegeben ist. Dies lässt sich auf den geringeren Einsatz von CO₂-intensivem Beton zurückführen. Bzgl. der Tübbingge fällt die Ökobilanz für Variante 1.1 und 2.1 schlechter aus. Durch die erhöhten Emissionen von 9,11% und 5,86% stellen

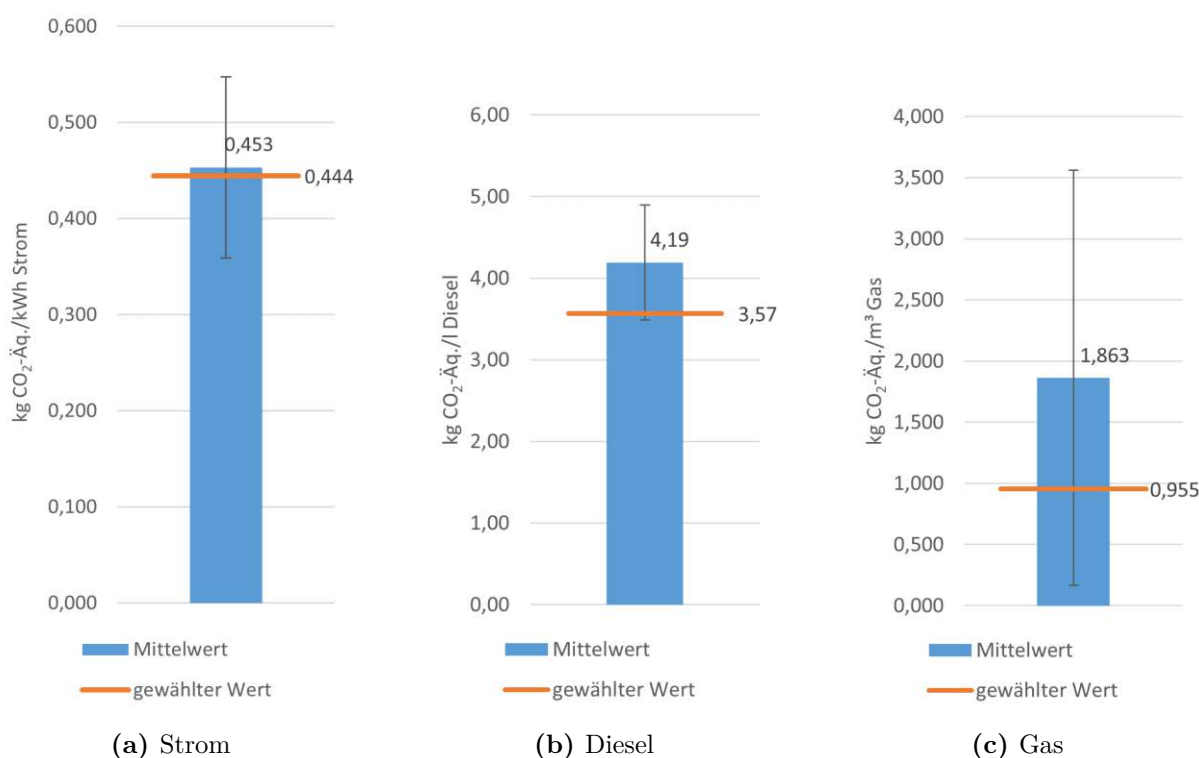


Abb. 4.7: Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Energieträger

sie eine größere Belastung für das Klima dar, als ein herkömmlicher Tübbingausbau. Für Ringspalt und TVA werden durch geringere Ausbruchquerschnitte und geringere Ringspaltvolumina für alle alternativen Querschnitte CO₂-Äquivalente gespart. Dennoch ergibt sich aus dem Defizit beim Tübbingausbau für die Varianten 1.1 und 2.1 keine Reduzierung der Emissionen im Endergebnis.

Tab. 4.13: Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen

	kg CO ₂ -Äquivalente/m Tunnel						
	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Tübbing: Beton	5175	3953	3953	3983	3366	3366	3396
Tübbing: Bewehrung	2522	3411	4445	1941	3494	4781	1655
Summe Tübbing	7697	7364	8398	5924	6861	8148	5051
		4,32%	-9,11%	23,04%	10,87%	-5,86%	34,38%
Ringspalt	765	750	750	750	743	743	743
		1,96%	1,96%	1,96%	2,88%	2,88%	2,88%
TVA	6044	5843	5843	5843	5732	5732	5732
		3,32%	3,32%	3,32%	5,15%	5,15%	5,15%
Summe	14506	13957	14991	12517	13336	14620	11530
		3,78%	-3,35%	13,71%	8,06%	-0,81%	20,54%

Der Vergleich der Tunnelquerschnitte konzentriert sich stark auf die Materialien und die Energiebereitstellung. Die in Abb. 4.9 dargestellte Aufteilung der Emissionen nach Lebenszyklusphasen überrascht daher nicht. Der Löwenanteil der Emissionen wird in der Herstellungsphase – Module A1–A3 – freigesetzt. Die Emissionen der Errichtungsphase liegen für alle Querschnitte unter 4%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dieser Phase nur die Dieselverbrennung für die TVA sowie die Gasverbrennung für die Wärmebehandlung der Tübbinge berücksichtigt

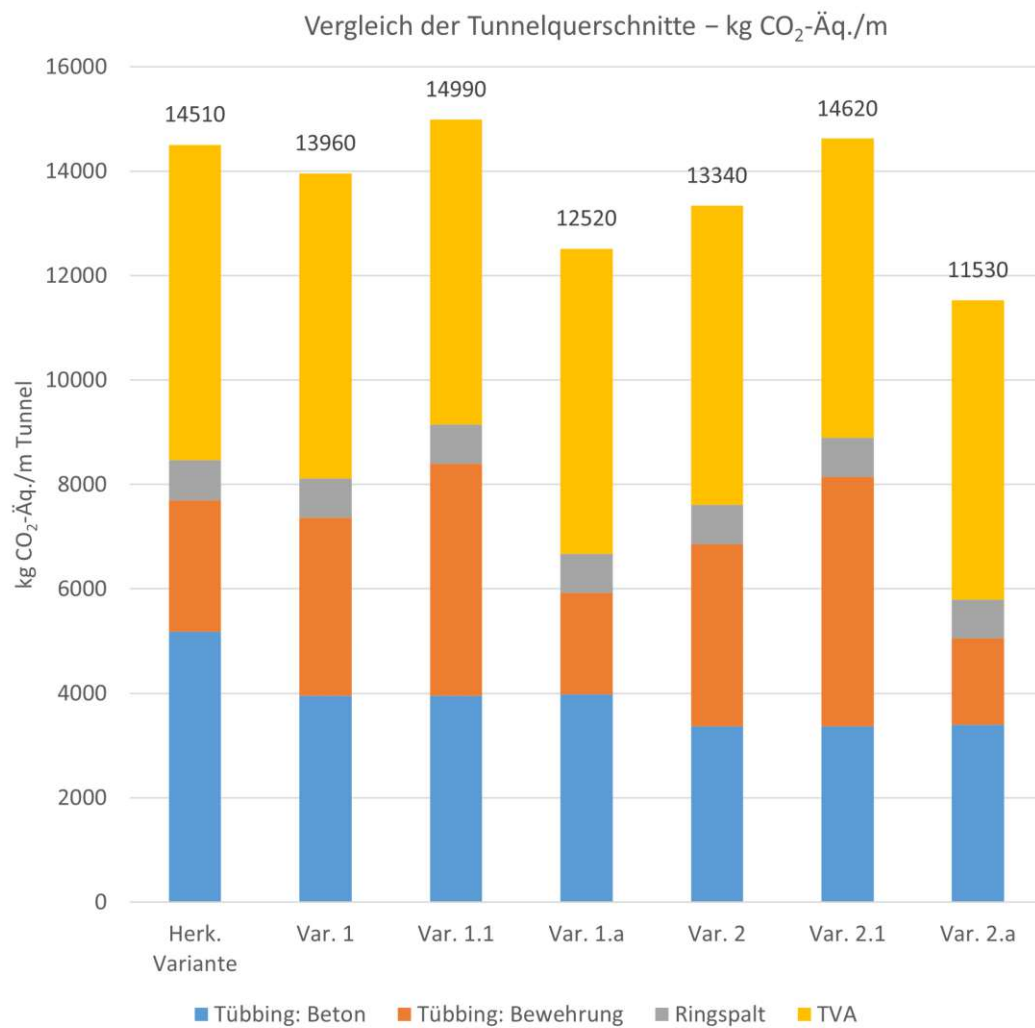


Abb. 4.8: Vergleich der Tunnelquerschnitte für die Wirkungskategorie Klimawandel – Mittelwert für Europa

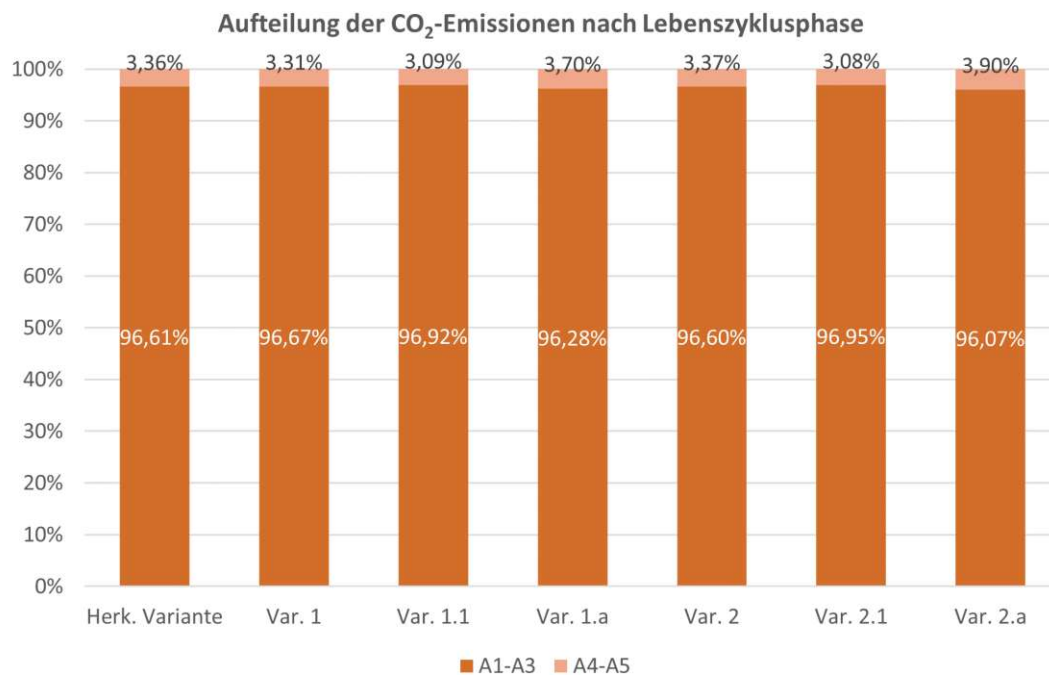


Abb. 4.9: Aufteilung der GWP-Emissionen nach Lebenszyklusmodulen

werden. Trotz des geringen prozentualen Anteils dieser Lebenszyklusphase darf das absolute Einsparpotential nicht vernachlässigt werden. Durch die Reduktion der Summe wird gleichzeitig die lokale Belastung durch gesundheitsschädliche Emissionen aus z.B. Dieselmotoren reduziert.

4.4.2 Wirkungskategorie Klimawandel – Tunnelquerschnittsvarianten

Die untersuchten Tunnelquerschnitte unterscheiden sich anhand des Ausbruchquerschnittes, der Stärke des Tübbingausbaus und der Bewehrung. Somit ergibt sich eine variierende Verteilung der Emissionen auf die einzelnen Prozesse und Flüsse, die zur Bilanzierung des Produktsystems von 1 m Tunnel notwendig ist. Im Folgenden wird eine kurze Beschreibung der Ergebnisse gegeben, die in Abb. 4.10 bis Abb. 4.16 dargestellt sind.

Herkömmliche Variante: Die Gesamtemissionen dieser Variante belaufen sich auf ca. 14510 kg CO₂-Äq./m. Sie stellt die Vergleichsbasis der kommenden Querschnitte dar. Der größte Anteil der Emissionen ergibt sich aus der TVA und hier fast ausschließlich aus dem eingesetzten Strom. Gefolgt wird sie von dem Tübbing-Beton. Dieser schlägt sich mit knapp über einem Drittel auf die Bilanz nieder. Die Bewehrung der herkömmlichen Tübbinge geht mit 17,38% in die Gesamtemissionen ein. Diese ergeben sich aus dem Bewehrungsgrad von 80 kg/m³. Die geringste Beteiligung hat der Ringspalt. Trotz der hohen Emissionsbelastung des Hauptbestandteils Zement, hat der Ringspaltmörtel mit einer Stärke von 0,185 m nur einen geringen volumetrischen Anteil.

Variante 1: Die Gesamtemissionen dieser Variante betragen ca. 13960 kg CO₂-Äq./m. Auch hier hat der Strom den größten Anteil an den Emissionen. Die Beiträge des Tübbingbetons und der Bewehrung liegen wesentlich näher beieinander. Dies ist auf die zusätzliche Längsfugenbewehrung und den damit verbundenen höheren Stahleinsatz zurückzuführen. 5,38% entfallen bei diesem Querschnitt auf den Ringspalt.

Variante 1.1: Die Summe der Emissionen macht für diese Variante ca. 14990 kg CO₂-Äq./m aus. Die Werte für TVA, Beton und Bewehrung nähern sich an. Dennoch bleibt Strom der Fluss mit der größten Umweltrelevanz. An zweiter Stelle folgt die Bewehrung mit 29,65%. Der Grund für den Anstieg gegenüber Variante 1 ist die Stahlbearbeitung. Sie belastet das Prozesssystem um weitere 7%. Durch die insgesamt höheren Emissionen sinkt der Anteil des Ringspalts – bei absolut gleichen Emissionen wie bei Variante 1 – auf 5%.

Variante 1a: Die Gesamtemissionen dieser Variante betragen ca. 12520 kg CO₂-Äq./m. Von der Größenordnung entsprechen die Prozentsätze denen der konventionellen Variante. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier keine zusätzliche Bewehrung eingesetzt wird.

Variante 2: Insgesamt werden bei dieser Variante ca. 13340 kg CO₂-Äq./m emittiert. Im Vergleich zu Variante 1 ist zu erkennen, dass der Bewehrungsstahl einen größeren Anteil an den Emissionen hat, da aufgrund des geringeren Betonvolumens mehr Stahl eingesetzt werden muss, um den Normalkraftwiderstand zu erhalten. Da 1 m³ Stahl ca. 50-mal mehr Emissionen als 1 m³ Beton hat, wirkt sich dies negativ auf die Bilanz aus.¹³⁸

Variante 2.1: Die gesamten Emissionen dieser Ausführung betragen etwa 14620 kg CO₂-Äq./m. Im Verhältnis zu den anderen Varianten ist hier der größte Anteil aus der Bewehrung der Tübbing gegeben. Durch das verringerte Betonvolumen, die zusätzliche Bewehrung aus legiertem Stahl, sowie der Stahlbearbeitung macht dieses Prozesssystem fast ein Drittel der Emissionen aus. Auf den gesamten Querschnitt gerechnet ist die TVA CO₂-intensiver.

Variante 2a: Die Gesamtemissionen dieser Variante summieren sich auf ca. 11530 kg CO₂-Äq./m. Wie bei Variante 1a gleichen die Prozentsätze der herkömmlichen Variante. Ein Unterschied besteht darin, dass der Ringspalt wie bei der konventionellen Variante eine Dicke von 0,185 m aufweist und somit einen größeren Anteil am Gesamtvolumen einnimmt. Somit steigen die daran gekoppelten Emissionen.

4.4.3 Wirkungskategorie Ressourceneinsatz

Neben der Wirkungskategorie Klima steht der Ressourceneinsatz anhand des primären Energiebedarfs zur Untersuchung. Hierbei gilt es zu betonen, dass die Sensitivitätsanalyse für die Treibhausgas-Emissionen durchgeführt wurde. Das bedeutet, dass die Ergebnisse verzerrt werden. Dazu ein Beispiel: Für die CO₂-Äq. pro kWh Strom wurde der europäische Mittelwert angenommen und der entsprechende Datensatz für die gesamte Ökobilanzierung herangezogen. Es ist möglich, bzw. sehr wahrscheinlich, dass der gewählte Datensatz für die MJ-Äquivalente nicht dem europäischen Mittelwert entsprechen. Somit wird folglich nicht der Europäische Durchschnitt des primären Energiebedarfs abgebildet. Dennoch können anhand der Ergebnisse Schlussfolgerungen gezogen werden.

Das Spektrum des primären Energiebedarfs reicht von 156400 MJ-Äq./m bis 190700 MJ-Äq./m. Wie in Abb. 4.17 dargestellt, zeichnet sich für den Energiebedarf ein ähnliches Bild wie bei den Treibhausgasemissionen. Variante 1.1 und 2.1 übertreffen die herkömmliche Variante. Den niedrigsten Energiebedarf hat die Variante 2a. Der Energiebedarf für den Ringspalt fällt für alle Varianten sehr gering aus.

Einen guten Überblick, ob die eingesetzte Energie nachhaltig gewonnen wurde, gibt Abb. 4.18. Sie zeigt ein klares Bild. Bei allen betrachteten Tunnelquerschnitten liegt der Anteil der nicht erneuerbaren Energien bei über 87%. Dies ist auf den hohen Anteil der Stromerzeugung in der

¹³⁸Der Faktor 50 ergibt sich aus den für diese Bilanz berücksichtigten Werten.

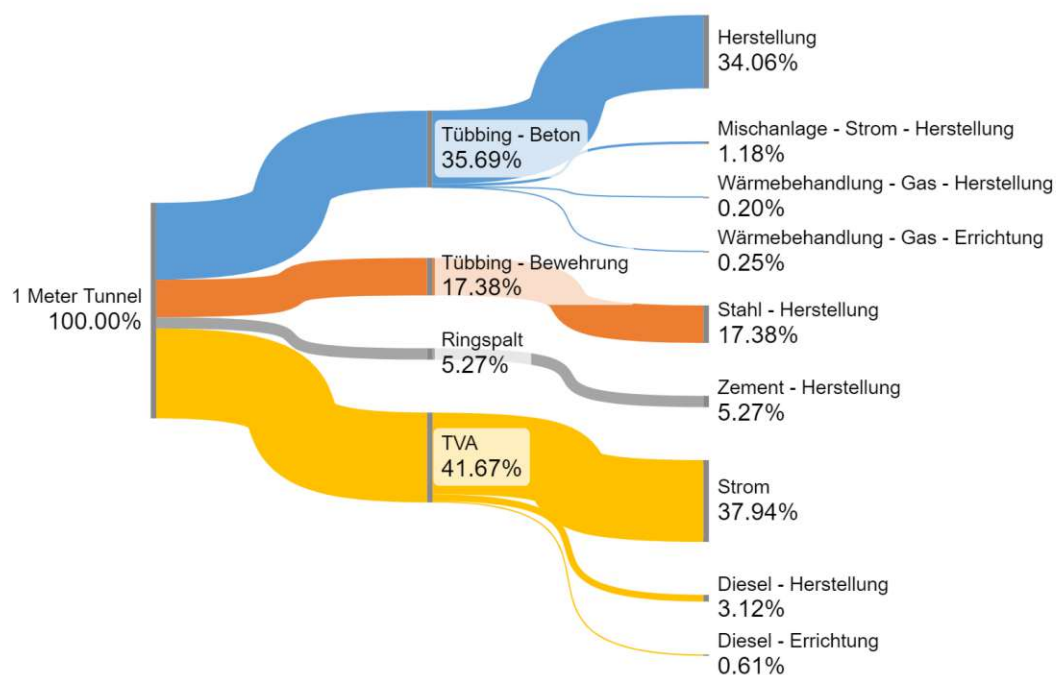


Abb. 4.10: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Herkömmliche Variante

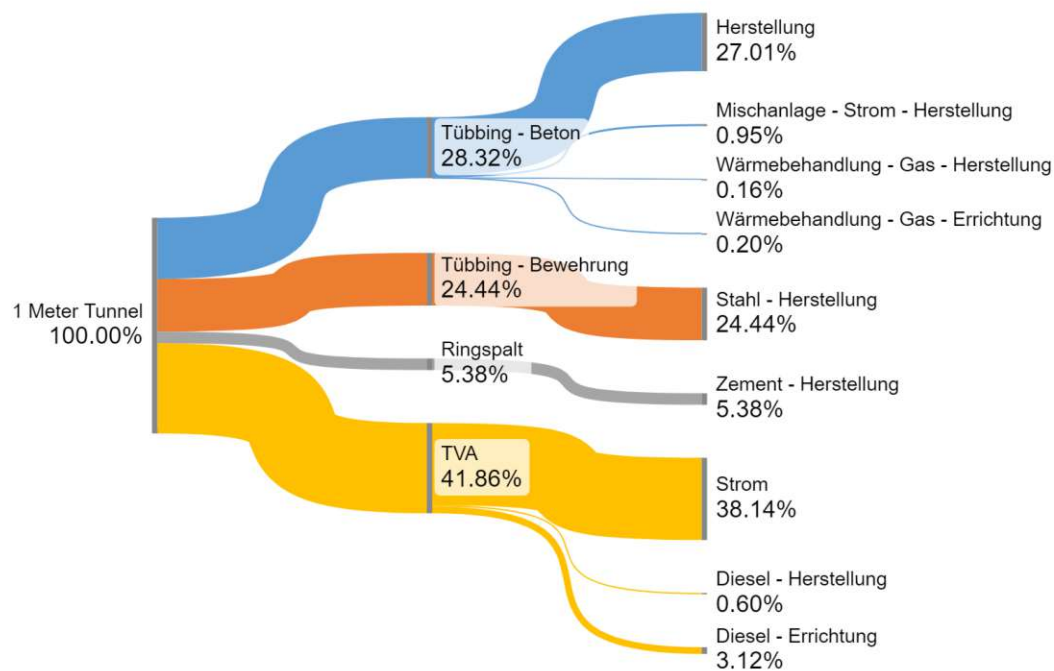
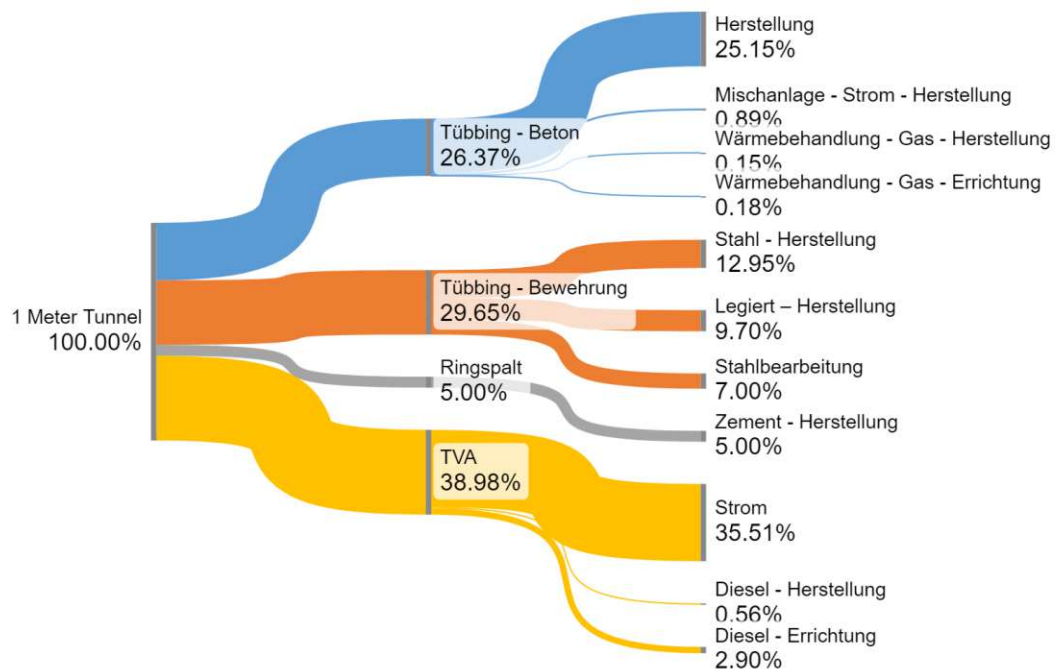
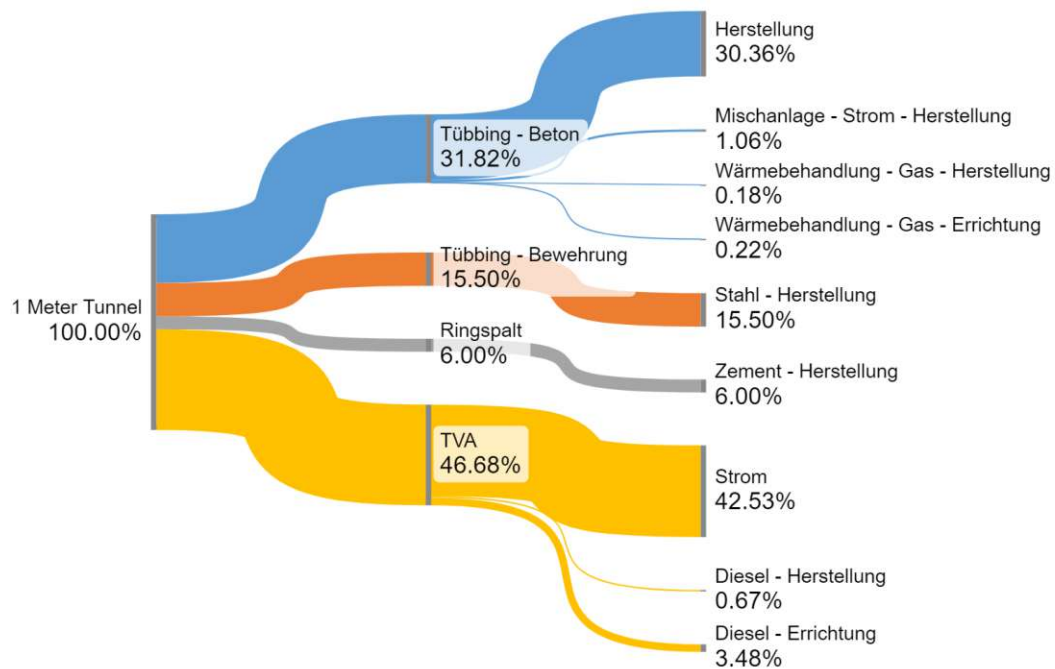
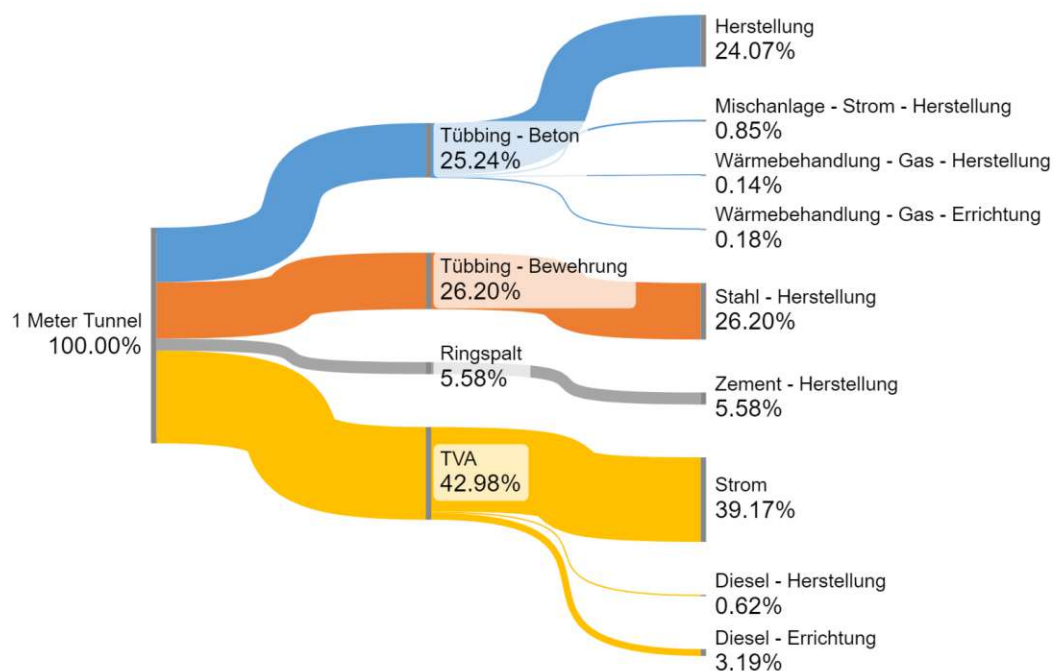
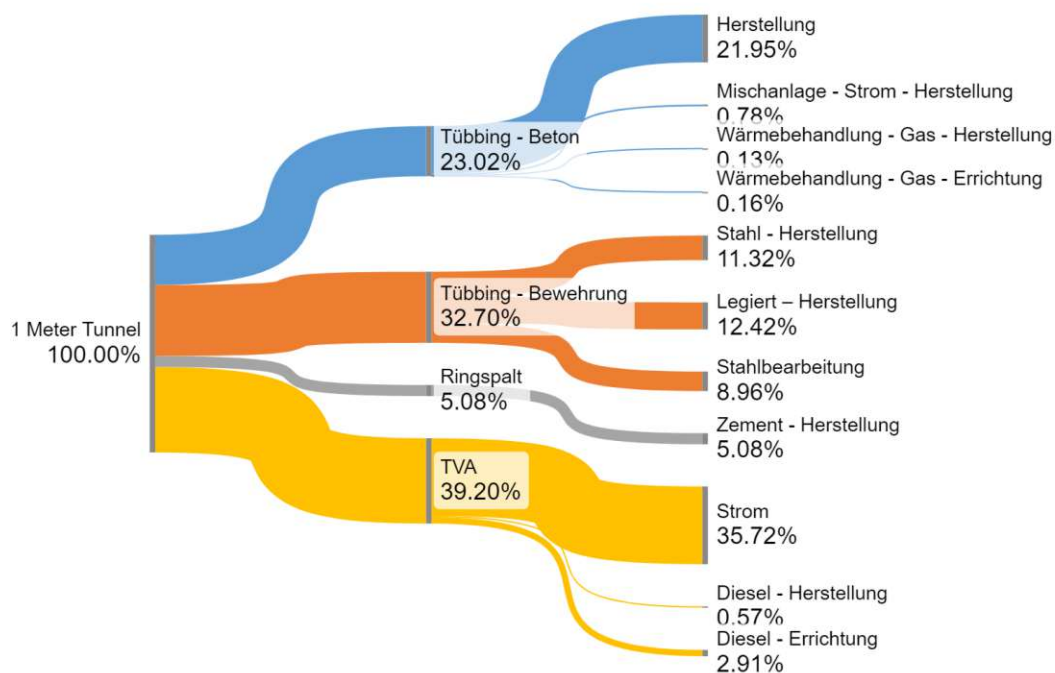


Abb. 4.11: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 1

Abb. 4.12: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 1.1Abb. 4.13: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 1a

Abb. 4.14: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 2Abb. 4.15: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 2.1

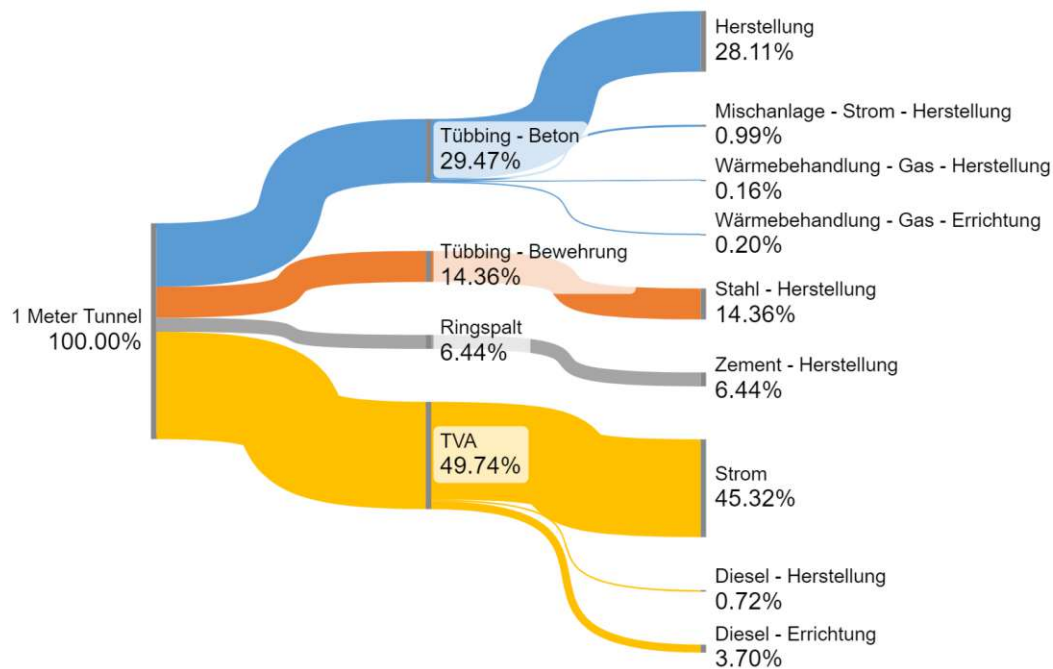


Abb. 4.16: Relative Aufteilung der CO₂-Äq. – Variante 2a

Bilanz zurückzuführen. Wird der Strom in Kohle- oder Gaskraftwerken erzeugt, führt dies zu einem höheren Anteil an nicht erneuerbaren Energien. Auch der Betrieb von Hochöfen und das Brennen von Klinker erfolgt derzeit noch größtenteils auf Basis nicht erneuerbarer Energieträger. Da diese für die Herstellung der benötigten Materialien unverzichtbar sind, verschiebt sich die Bilanz weiter in einen für die Umwelt negativen Bereich.

Strom, Beton und Stahl sind die Haupteinflüsse in die Ökobilanz, sei es für die Wirkungskategorie Klima oder den primären Energiebedarf. Innerhalb Europas ergibt sich eine große Spannweite der Indikatorwerte. Deshalb fließen im Kapitel der Sensitivitätsprüfung nationale Werte der DACH-Region in die Ökobilanz ein.

4.4.4 Sensitivitätsprüfung

Für die Sensitivitätsprüfung werden die in der Ökobilanz einfließenden Datensätze, wenn vorhanden, auf nationale Werte von Österreich, der Schweiz und Deutschland geändert. Anschließend werden die kg CO₂-Äq. der Tunnelquerschnittsvarianten für die einzelnen Länder verglichen.

Österreich

Die für Österreich geänderten Datensätze sind in Tab. 4.14 aufgelistet. Es fällt auf, dass alle neu gewählten Werte niedriger ausfallen, als für den europäischen Durchschnitt. Besonders markant sind die Reduzierungen der Emissionen für Stromproduktion und Bewehrung. Österreich hat einen Anteil von 85% erneuerbarer Energieträger an der inländischen Primärenergieerzeugung.¹³⁹ Beim Bewehrungsstahl lassen sich große Unterschiede in den Herstellungsverfahren feststellen. Das Linz-Donawitz-Verfahren emittiert deutlich mehr Emissionen als die Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen. Zusammengefasst bedeutet das für Österreich eine drastische Reduzierung

¹³⁹Vgl. [5] BMK, S. 16 f

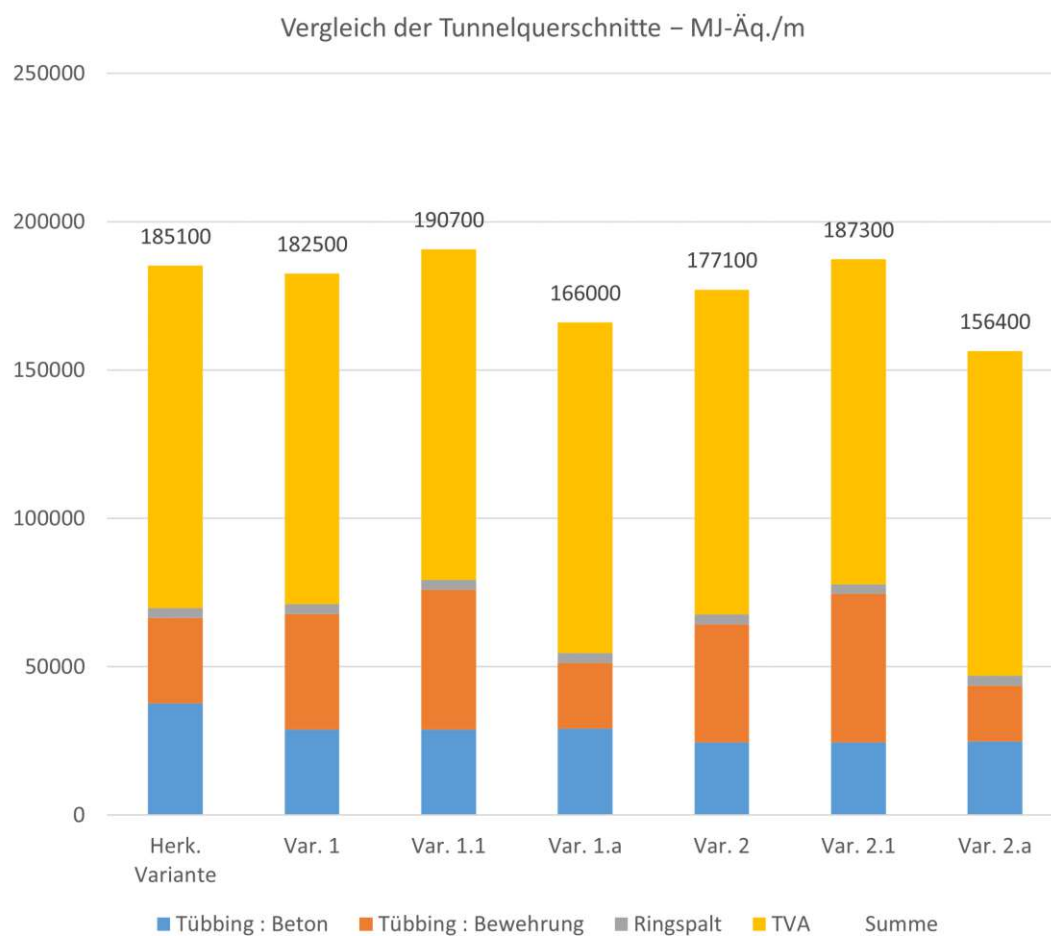


Abb. 4.17: Vergleich der Tunnelquerschnitte für die Wirkungskategorie Ressourceneinsatz

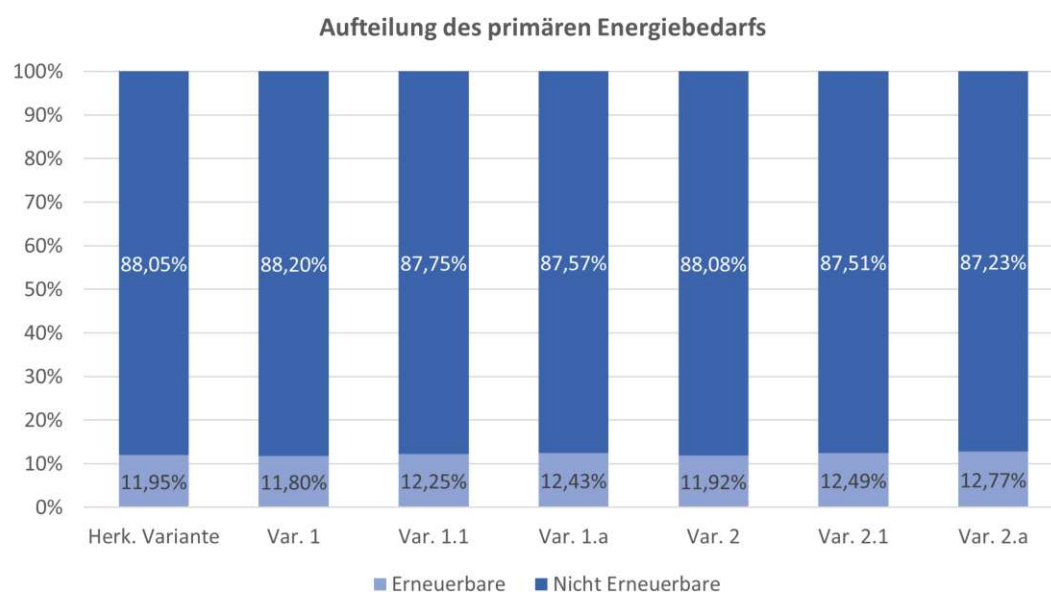


Abb. 4.18: Aufteilung des Energiebedarfs nach Energiequellen

Tab. 4.14: Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Österreich

geänderter Datensatz		Wert Europa	Wert National
Beton	kg CO ₂ -Äq/m ³	365	329
Strom	kg CO ₂ -Äq/kWh	0,444	0,14
Erdgas	kg CO ₂ -Äq/m ³	0,955	0,784
Bewehrungsstahl	kg CO ₂ -Äq/t	2334	555
Legierter Stahl	kg CO ₂ -Äq/t	2308	463

Tab. 4.15: Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Schweiz

geänderter Datensatz		Wert Europa	Wert National
Beton	kg CO ₂ -Äq/m ³	365	329
Strom	kg CO ₂ -Äq/kWh	0,444	0,012
Erdgas	kg CO ₂ -Äq/m ³	0,955	0,645
Bewehrungsstahl	kg CO ₂ -Äq/t	2334	555
Legierter Stahl	kg CO ₂ -Äq/t	2308	537
Zement	kg CO ₂ -Äq/kg	0,862	0,742

um ca. 5 t CO₂-Äq/m für alle betrachteten Varianten. Dies ist in Abb. 4.19 nochmal verdeutlicht. Aus der Abbildung auszulesen ist der reduzierte Anteil aus dem Strom für die TVA. Für Österreich ist somit der Tübbing mit Beton und Bewehrung der maßgebende Einfluss auf die Emissionen.

Schweiz

Die für die Schweiz geänderten Datensätze sind in Tab. 4.15 aufgelistet. Durch den, in Vergleich zu Österreich, noch grüneren Strommix, der sich auf die in der Schweiz eingesetzte Kernkraft zurückverfolgen lässt, sinkt der Einfluss des Betriebs der TVA auf die Gesamtemissionen noch weiter. Wie aus Abb. 4.20 hervorgeht, ist der Tübbing-Beton der Haupttreiber. Insgesamt lässt sich durch die reduzierten Werte der nationalen Datensätze eine Halbierung der CO₂-Äq/m Tunnel für die Schweiz beobachten. Diese gilt es jedoch zu hinterfragen, da der Strommix für den tatsächlich verbrauchten Strom anders ausfällt als die inländische Energieerzeugung. Damit steigen die Emissionen in Regelfall an.

Deutschland

Die für Deutschland geänderten Datensätze sind in Tab. 4.16 aufgelistet. Im Gegensatz zu Österreich und der Schweiz steigen die Emissionen aus dem Betrieb der TVA an. Das liegt daran, dass die in Deutschland produzierte Energie stark auf CO₂-intensiven Energieträger wie Kohle und Gas aufbaut. So stammen lediglich 44% der Energie aus erneuerbaren Quellen.¹⁴⁰ Durch die klimaverträglichere Bewehrungsstahl Produktion sinken vor allem die Emissionen für die Variante 1 und 2. In Summe lassen sich dadurch rund 2 t CO₂-Äq/m für die Tunnelquerschnitte einsparen.

¹⁴⁰Vgl. [11] Bundesamt

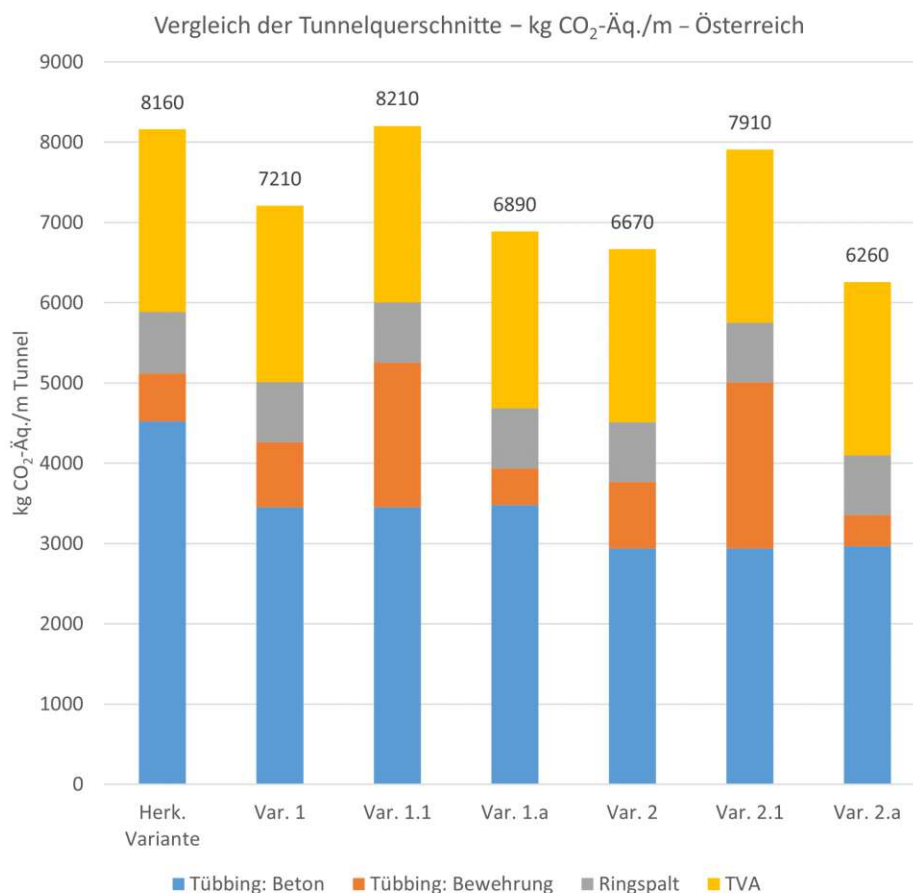


Abb. 4.19: Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für Österreich

Tab. 4.16: Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Deutschland

geänderter Datensatz		Wert Europa	Wert National
Beton	kg CO ₂ -Äq./m ³	365	329
Strom	kg CO ₂ -Äq./kWh	0,444	0,49
Erdgas	kg CO ₂ -Äq./m ³	0,955	0,577
Bewehrungsstahl	kg CO ₂ -Äq./t	2334	555

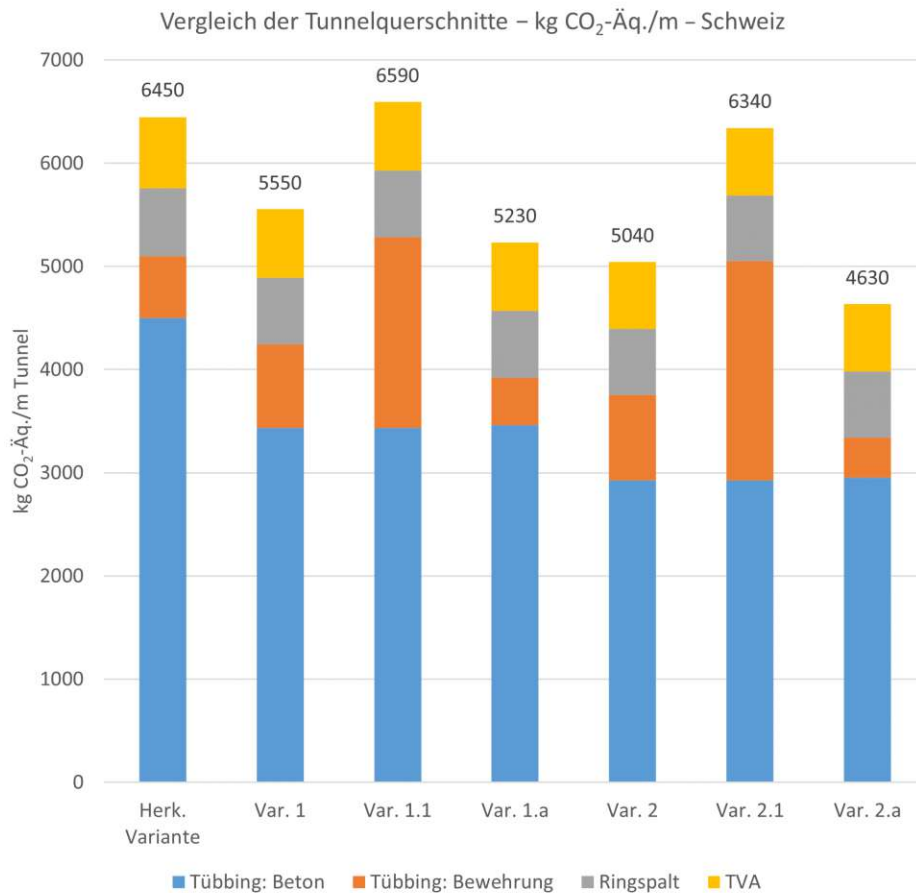


Abb. 4.20: Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für die Schweiz

Eine Gegenüberstellung der Tunnelquerschnittvarianten und der betrachteten Regionen ist in Abb. 4.22 gegeben. Der DACH-Raum schneidet durchgehend mit besseren Werten für die Wirkungskategorie Klima ab. Das lässt sich auf die geringeren Emissionen der Stahl- und Stromproduktion zurückführen. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass sich durch das Austauschen weniger Datensätze große Unterschiede auf tun. Deshalb ist immer streng zu prüfen, welcher Wert für die Ökobilanz eingesetzt wird.

4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie in Kap. 4.4 gezeigt, ergeben sich durch den Einsatz von ressourceneffizienten Tübbing Potentialen zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. Die Normalkraftwiderstände, Gesamtemissionen sowie die relativen Einsparungen sind in Tab. 4.17 aufgelistet. Durch die geringere Tübbingdicke und die zusätzliche Längsfugenbewehrung steigt die Tragfähigkeit schneller als die Emissionen. Dies bedeutet für den gesamten Tunnelquerschnitt der Variante 1 eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 3,78% und für die Variante 2 von 8,06%. Möglich ist dies nur, wenn für die zusätzliche Bewehrung herkömmlicher Bewehrungsstahl verwendet wird. Bei Verwendung von legiertem Stahl verschlechtert sich die Bilanz, wie die Varianten 1.1 und 2.1 zeigen. Diese Ergebnisse beziehen sich auf 1 m Tunnel. Wird ein gesamtes Tunnelprojekt betrachtet, ergeben sich bedeutende Unterschiede. Durch den Wegfall der Zusatzbewehrung weisen die Varianten 1a

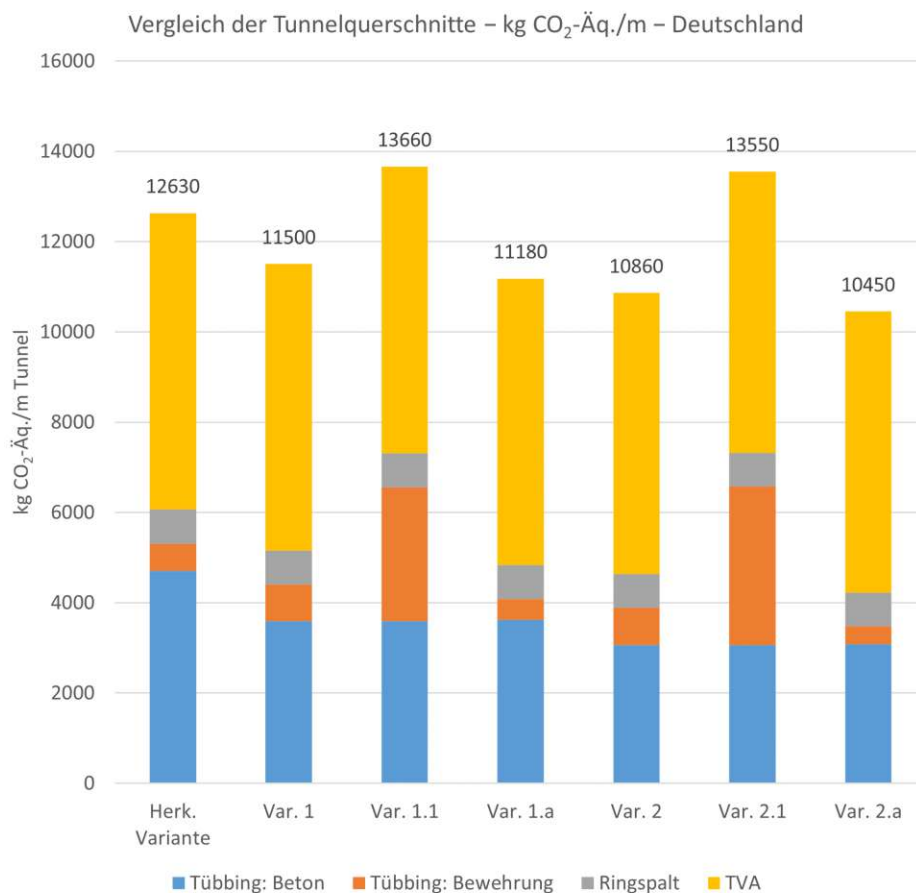


Abb. 4.21: Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für Deutschland

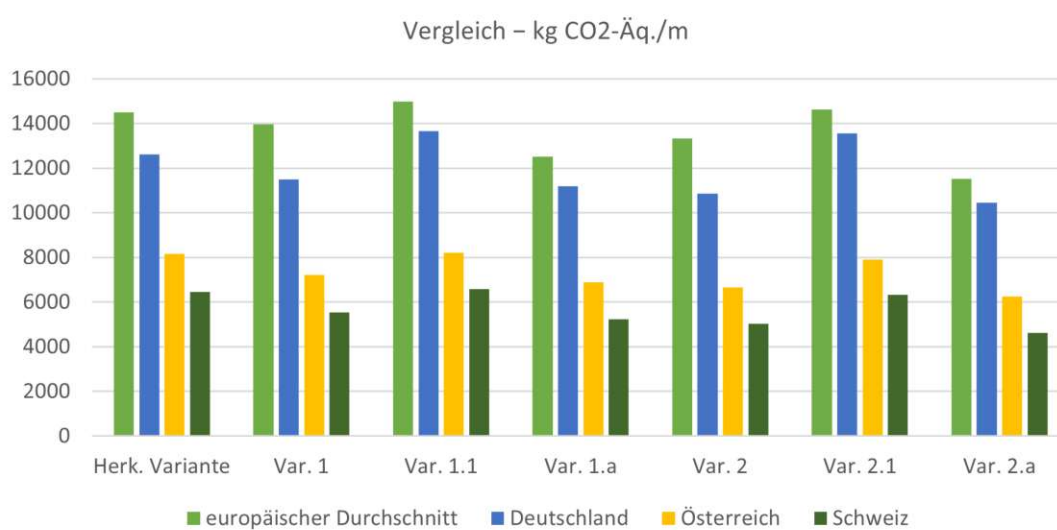


Abb. 4.22: Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte – Vergleich

und 2a den geringsten Normalkraftwiderstand auf. Durch den Verzicht auf Zusatzbewehrung und das geringere Betonvolumen im Vergleich zur herkömmlichen Variante ergeben sich bei diesen Tunnelquerschnitten die geringsten Emissionen.

Tab. 4.17: Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen

	Herk. Var.	Var. 1	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Normalkraftwiderstand MN	20,68	22,18	22,18	16,08	21,40	21,40	13,78
Gesamtemissionen kg CO ₂ -Äquivalente/m Tunnel	14506	13957	14991	12517	13336	14620	11530
Relative Einsparung		3,78%	-3,35%	13,71%	8,06%	-0,81%	20,54%

Die in Tab. 4.17 gegebenen Werte ergeben sich für den europäischen Durchschnitt. Wie die durchgeführte Sensitivitätsprüfung für den DACH-Raum zeigt, sind massive Unterschiede zwischen den Ländern zu beobachten. Haupttreiber dafür ist der Strombedarf der TVA. Aufgrund des großen Energiebedarfs der Anlage ist es entscheidend, welche CO₂-Äq.-Belastung eine Kilowattstunde Strom mit sich bringt. Ein weiterer Treiber der Differenz ist die Stahlherstellung in Europa. Hier variieren die Werte stark. Besonders in Österreich und der Schweiz kann Stahl klimaschonender hergestellt werden als im Rest von Europa.

Um die Ergebnisse der vorliegenden Ökobilanz mit anderen Arbeiten in Relation zu setzen, müssen die Systemgrenzen im Hinterkopf behalten werden. Ein definiertes Ziel der Arbeit ist der Vergleich der unterschiedlichen Tunnelquerschnitte. Dadurch fallen jene Elemente aus der Betrachtung, die bei allen Varianten gleich ausfallen. Beispiel dafür sind die benötigten Einbauten im Tunnel. Ebenfalls außer Acht gelassen wurden die Transportprozesse der Materialien von und zur Baustelle. Durch das Setzen anderer Systemgrenzen verändern sich die Ergebnisse drastisch. Da es sich bei den betrachteten Querschnitten um Beispiele handelt, sind nicht für alle Prozesse, die in der Herstellung eines Tunnels benötigt werden, Daten vorhanden. Die gesetzten Systemgrenzen der gegebenen Arbeit sind dennoch ausreichend zur Erfüllung des gesetzten Ziels.

Wie die vorliegende Ökobilanz zeigt, ermöglicht die alternative Bewehrungsführung in den Tübbing und der damit verbundene geringere Ressourceneinsatz die Einsparung von klimaschädlichem CO₂-Äquivalenten. Die Maßnahme bietet die Möglichkeit, die Gesamtemissionen eines Tunnels mit den heute eingesetzten Baustoffen und Bauverfahren zu reduzieren. Damit lässt sich der ressourceneffiziente Tübbing nahtlos in den heutigen Baubetrieb eingliedern. Durch die Kombination der Ansätze für nachhaltigen Tunnelbau aus Kap. 2.4, erhöht sich das Potential zur Verbesserung nochmals, nicht nur unter den ökologischen, sondern genauso für den ökonomischen und sozialen Aspekt der Nachhaltigkeit.

Kapitel 5

Einsatzpotential für den ressourceneffizienten Tübbing

Die in Kap. 4 bilanzierten Emissionen der Tunnelquerschnitte beziehen sich auf die funktionelle Einheit von 1 m Tunnel. Für die Abschätzung des Einsatzpotentials ressourceneffizienter Tübbinge wird der Betrachtungsraum von einem Meter auf die gesamte Tunnellänge erweitert. Dazu wird ein fiktives Projekt mit Störzonen und Regelzonen angenommen. Durch den Vergleich auf der Ebene der gesamten Tunnellänge werden absolute Einsparpotentiale für das Projekt berechnet. Es wird untersucht, wie sich diese Ergebnisse auf den Einsatz der alternativ bewehrten Tübbinge auswirken. Dabei werden vor allem Bereiche des Bauwesens beleuchtet, in denen Nachhaltigkeit in Zukunft eine noch größere Rolle spielen wird.

5.1 Ökologisches Einsatzpotential anhand eines Projektes

Um das Einsparungspotential der verschiedenen Tunnelquerschnitte mit RET zu prüfen, wurden fünf Tunnel mit unterschiedlichen Ausbauvarianten miteinander verglichen. Untersucht wurden die in der Ökobilanz ermittelten Werte für Europa, Österreich, die Schweiz und Deutschland. Die folgenden Rahmenbedingungen bzgl. des Tunnelprojektes sind für alle untersuchten Tunnel identisch:

- Tunnellänge: 1000 m
- Anteil der Störzonen: 7,5%
- Funktion: eingleisiger Eisenbahntunnel
- Innendurchmesser: 9,1 m
- Vortriebsart: maschineller Vortrieb mit Tübbingausbau.

5.1.1 Untersuchte Tunnelquerschnitte

Zur Erinnerung wird nochmals ein Überblick der untersuchten Varianten in den Abb 5.1 bis Abb. 5.3 gegeben. Klar sichtbar in Grün markiert ist die zusätzliche Längsfugenbewehrung, welche den Normalkraftwiderstand für Tübbinge in Störzonen erhöht. Für den Ausbau der Tunnel werden die im vorhergehenden Kapitel bilanzierten Querschnitte wie folgt eingesetzt:

Tunnel 45: Für diesen Tunnel kommt der herkömmliche Querschnitt zum Einsatz. Die Stärke des Tübbingausbaus beläuft sich für diese Variante auf 45 cm, wie aus Abb. 5.1 zu entnehmen ist. Dieser Ausbau wird auf der gesamten Tunnellänge eingesetzt. Der Ausbruchquerschnitt ist 84,46 m² groß.

Tunnel 35: Für die Störzonen dieses Tunnels kommt die Variante 1 zum Einsatz. Diese verfügt über zusätzliche Längsfugenbewehrung, die in Abb. 5.1a zu sehen ist. Dadurch ist sie auf höhere Belastungen ausgelegt. Auf den Regelbereich wirken geringere Belastungen ein, somit genügt hier der schwächer bewehrte Tunnelquerschnitt der Variante 1a, der in Abb. 5.1b abgebildet ist. Die Stärke des Tübbingausbaus ist für beide Varianten 35 cm. Der Ausbruchquerschnitt ist 81,23 m² groß.

Tunnel 30: Ähnlich wie beim vorhergehenden Tunnel werden bei diesem Tunnel in den Störzonen zusätzlich bewehrte Tübbinge verbaut. Die dazugehörige Querschnittsvariante 2 ist in Abb. 5.2a dargestellt. Für den Regelbereich kommt die in Abb. 5.2b dargestellte Variante 2a ohne zusätzliche Bewehrung zum Einsatz. Aufgrund der wesentlich geringeren Stärke der Tübbinge von 30 cm wird der Ausbruchquerschnitt auf 79,64 m² reduziert.

Tunnel 35 I: Dieser Tunnel wird identisch zum Tunnel 35 ausgeführt mit der Ausnahme, dass in den Störzonen die Querschnittsvariante 1.1 eingesetzt wird. Damit wird ausschließlich in den stärker belasteten Bereichen legierter Stahl eingesetzt.

Tunnel 30 I: Auch bei diesem Tunnel werden die Störzonen durch die verstärkten Tübbinge ausgebaut. Hier kommt die Variante 2.1 zum Einsatz. Die restlichen Geometrien sind die gleichen wie bei Tunnel 30.

5.1.2 Darlegung der Ergebnisse

Ausgehend von den gewählten Tunnelquerschnitten und den in Kap. 4 ermittelten Emissionswerten der einzelnen Varianten pro Tunnelmeter ergeben sich die Gesamtemissionen der Tunnelbauwerke. Dazu werden die einem Querschnitt zugeordneten CO₂-Emissionen mit der Länge multipliziert, in der ein Querschnitt verwendet wird. Neben den Emissionen wurde das Ausbruchsvolumen untersucht. Durch die geringeren Bohrdurchmesser der alternativen Querschnittsausführungen ergibt sich ein geringeres Ausbruchsvolumen und damit ein geringerer Aufwand für die weitere Verarbeitung des Materials.

Unabhängig davon, welche Emissionen emittiert werden, wird durch die Verkleinerung des Querschnittes Ausbruch gespart. Das bedeutet einen geringeren Eingriff in die Umwelt und gleichzeitig ein geringeres Volumen für den Transport und gegebenenfalls geringere Deponierungskosten. Je nach Bodenqualität ziehen die Weiterver- und bearbeitung unterschiedlichste Kosten und Aufwände mit sich. Durch den Ausbau mit Tübbing der Stärke 35 cm statt 45 cm verringern sich diese um 3,82% und bei 30 cm um 5,70%. Gemeinsam mit den absoluten Einsparungen sind die Ergebnisse in Tab. 5.1 gegeben. Diese Einsparungen werden unabhängig von dem Land, in dem der Tunnel gebaut wird, erzielt.

	Ausbruch		
	45	35 und 35 I	30 und 30 I
Ausbruchquerschnitt	84,46 m ²	81,23 m ²	79,64 m ²
Ausbruchvolumen gesamt	84459 m ³	81233 m ³	79643 m ³
Einsparung – absolut		3226 m ³	4816 m ³
Einsparung – relativ		3,82%	5,70%

Tab. 5.1: Ausbruch – Einsparungspotentiale

Die Ergebnisse der Berechnung für die Treibhausgas-Emissionen sind in Tab. 5.2 und Tab. 5.3 gegeben. Es zeigt sich klar, dass die relativen Einsparungen von Europa und den DACH-Ländern stark variieren. Das lässt sich darauf zurückführen, dass bei den Emissionswerten für Europa und

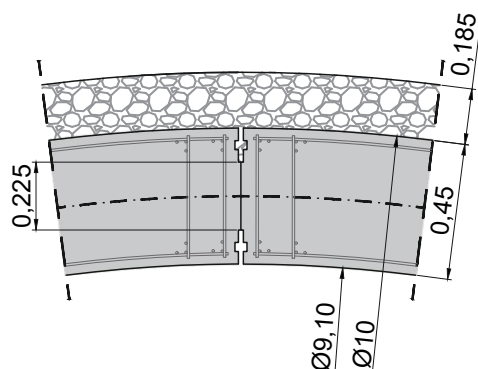
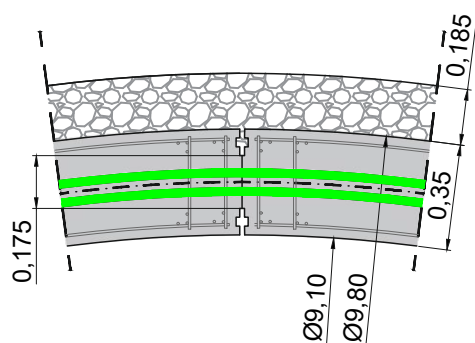
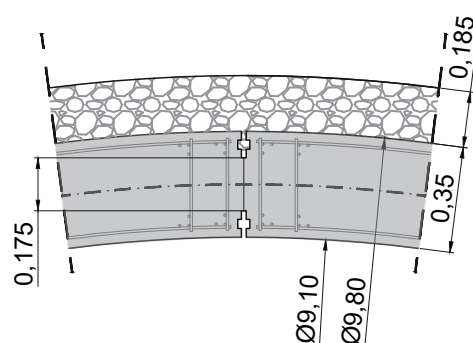


Abb. 5.1: Tunnel 45 – Herkömmlicher Tunnelquerschnitt

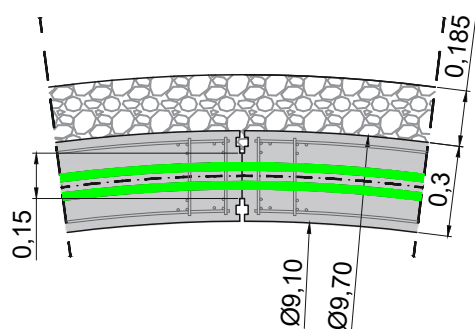


(a) Variante 1 bzw. Variante 1.1

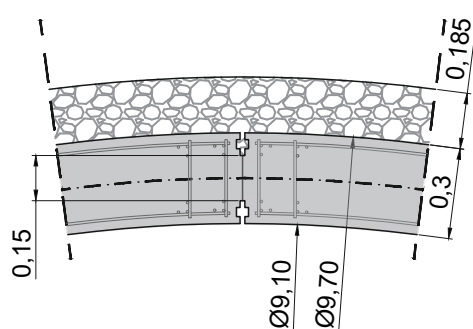


(b) Variante 1a

Abb. 5.2: Tunnel 35 und Tunnel 35 l – eingesetzte Tunnelquerschnitte



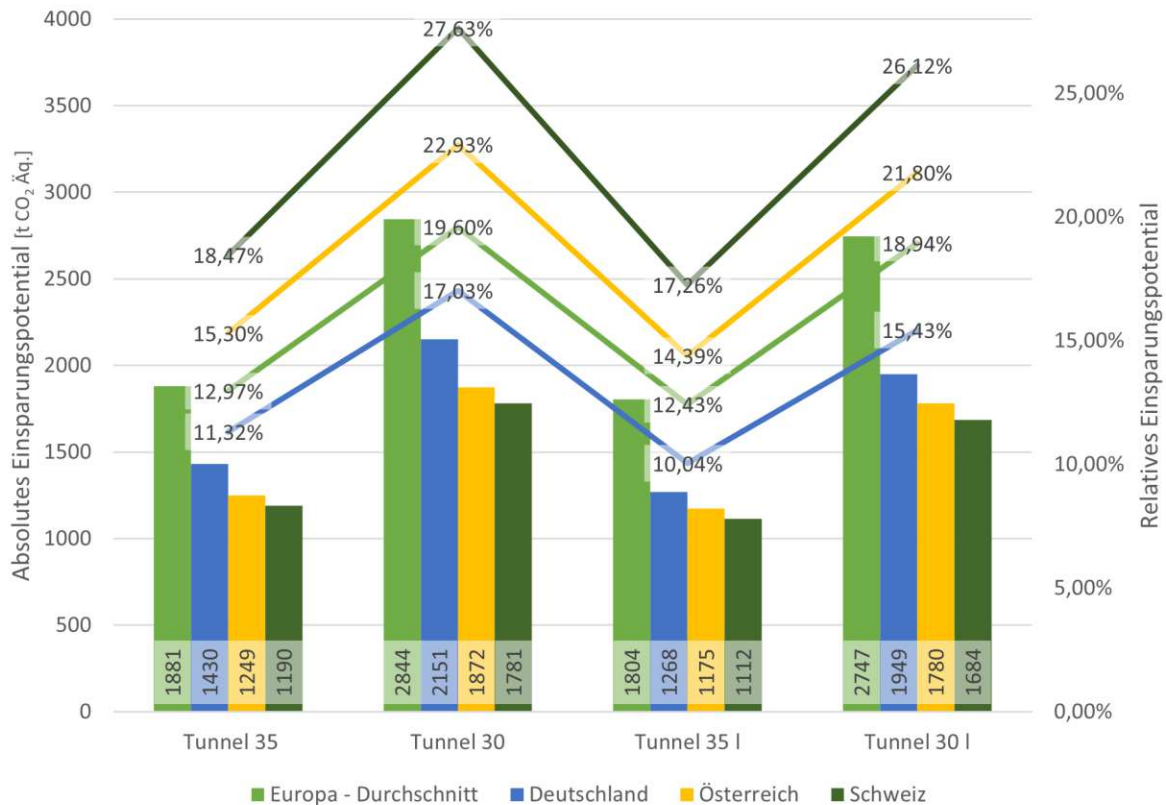
(a) Variante 2 bzw. Variante 2.1



(b) Variante 2a

Abb. 5.3: Tunnel 30 und Tunnel 30 l – eingesetzte Tunnelquerschnitte

Abb. 5.4: Relatives und absolutes Einsparungspotential der Tunnelvarianten



Deutschland der Stromverbrauch der TVA der maßgebende Treiber für die CO₂-Emissionen ist. Dieser ist direkt gekoppelt an das Ausbruchvolumen. Da dieses im Vergleich nur gering reduziert wird – 3,82% für Tunnel 35 und 35 I sowie 5,70% für Tunnel 30 und 30 I wie aus Tab. 5.2 und Tab. 5.3 ersichtlich – wird die gesamte Reduktion gedämpft. Der umgekehrte Trend lässt sich für Österreich und die Schweiz feststellen. Da in deren Bilanz der Tübbingausbau für einen Großteil der Emissionen verantwortlich ist, sind die relativen Einsparungen größer. Es lässt sich folglich der allgemein gültige Zusammenhang feststellen, dass ein größerer Einfluss des Tübbings auf die Ökobilanz dazu führt, dass die Emissionen des gesamten Tunnelquerschnitts umso stärker positiv beeinflusst werden. Dieser Trend zeigt sich ebenfalls in Abb. 5.4. Wie abgebildet entwickeln sich die relativen und absoluten Einsparungspotentiale gegenläufig. So zeigt beispielsweise das größte prozentuale Potential zur Reduzierung der CO₂-Äquivalente, jedoch fällt der absolute Betrag am geringsten aus. Aus Abb. 5.2 und Tab. 5.3 geht ebenfalls hervor, dass die Gesamtemissionen des Tunnels in der Schweiz und Österreich wesentlich geringer sind als der europäische Durchschnitt.

Die Berechnungen zeigen, dass für Tunnel 35 I und 30 I, also jene Tunnel, bei denen legierter Stahl für die Zusatzbewehrung zum Einsatz kommt, fast ebenso große Einsparungen erzielt werden wie bei den Tunneln 35 und 30. Obwohl die Querschnittsvarianten 1.1 und 2.1 in den Störzonen eine höhere CO₂-Belastung aufweisen als ein Herkömmlicher, entwickelt sich die Bilanz über die gesamte Länge des Tunnels in eine klimaschonendere Richtung. Das lässt sich darauf zurückführen, dass die Störzonen nur einen geringen Teil des Projektes ausmachen. Mit dem legierten Stahl wird der Problematik des Rostes bei exponierter Bewehrung entgegengewirkt. Somit wird die Dauerhaftigkeit der Tübbinge erhöht, auch bei stumpf stoßender Bewehrung.

Tab. 5.2: Ergebnisse des Vergleichs – Tunnel 45, 35 und 30

Werte für Europa					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	14,50	13,96	12,52	13,34	11,53
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	14506 t CO ₂ -Äq.	12625 t CO ₂ -Äq.		11662 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1881 t CO ₂ -Äq.		2844 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		12,97%		19,60%	
Werte für Deutschland					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	12,63	11,50	11,18	10,86	10,45
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	12633 t CO ₂ -Äq.	11203 t CO ₂ -Äq.		10482 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1430 t CO ₂ -Äq.		2151 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		11,32%		17,03%	
Einsparung – relativ zu Europa		11,26%		10,12%	
Werte für Österreich					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	8,16	7,21	6,89	6,67	6,26
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	8164 t CO ₂ -Äq.	6914 t CO ₂ -Äq.		6291 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1249 t CO ₂ -Äq.		1872 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		15,30%		22,93%	
Einsparung – relativ zu Europa		45,23%		46,05%	
Werte für die Schweiz					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	6,45	5,55	5,23	5,05	4,63
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	6446 t CO ₂ -Äq.	5256 t CO ₂ -Äq.		4665 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1190 t CO ₂ -Äq.		1781 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		18,47%		27,63%	
Einsparung – relativ zu Europa		58,37%		60,00%	

Tab. 5.3: Ergebnisse des Vergleichs – Tunnel 45, 35 l und 30 l

Werte für Europa					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2.1	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	14,50	14,99	12,52	14,62	11,53
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	14506 t CO ₂ -Äq.	12702 t CO ₂ -Äq.		11759 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1804 t CO ₂ -Äq.		2747 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		12,43%		18,94%	
Werte für Deutschland					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2.1	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	12,63	13,66	11,18	13,55	10,45
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	12633 t CO ₂ -Äq.	11365 t CO ₂ -Äq.		10684 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1268 t CO ₂ -Äq.		1649 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		10,04%		15,43%	
Einsparung – relativ zu Europa		10,53%		9,14%	
Werte für Österreich					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2.1	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	8,16	8,21	6,89	7,91	6,26
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	8164 t CO ₂ -Äq.	6989 t CO ₂ -Äq.		6384 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1175 t CO ₂ -Äq.		1780 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		14,39%		21,80%	
Einsparung – relativ zu Europa		44,98%		45,71%	
Werte für die Schweiz					
Tunnel	45	35	30		
Querschnittsvariante	Herk.Variante	Var. 1.1	Var. 1a	Var. 2.1	Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	6,45	6,60	5,23	6,34	4,63
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	6446 t CO ₂ -Äq.	5334 t CO ₂ -Äq.		4762 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1112 t CO ₂ -Äq.		1684 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – relativ		17,26%		26,12%	
Einsparung – relativ zu Europa		58,01%		59,50%	

5.2 Diskussion des Einsatzpotentials

Wie sich anhand des ressourceneffizienten Tübbings zeigt, steht die zukünftige Optimierung des Tunnelbaus nicht in Konkurrenz mit der Nachhaltigkeit. Die vorhergehenden Kapitel haben bewiesen, dass durch den Einsatz des RET Ressourcen und Emissionen gespart werden. Aus dem heraus ergeben sich weitere Vorteile für das System, angefangen von der Herstellung der Tübbinge bis hin zur Finanzierung von Tunnelbauprojekten.

5.2.1 Baubetriebliche Aspekte

Kernstück des Forschungsprojektes zum ressourceneffizienten Tübbing ist die Zusatzbewehrung, die sicherstellt, dass bei kleiner werdendem Querschnitt der gleiche Normalkraftwiderstand erreicht wird. Diese zusätzliche Stahlmenge wird nicht wie in anderen Projekten durch aufwendige Formteile oder Faserbeton eingebracht, sondern durch konventionelle Stabbewehrung. Diese fügt sich nahtlos in den Bewehrungsschritt ein. Die Tübbinge für die Störzonen werden einfach durch zusätzliche Bewehrung in den Längsfugen verstärkt. Die Integration des Systems in den Bauablauf ist somit beinahe nahtlos. Bei einer drastischen Reduzierung des Tübbingquerschnittes ist zu prüfen, ob durch den Einsatz der Zusatzbewehrung die im Projekt geforderten Randabstände eingehalten werden. Da die Bewehrungsstäbe in den Fugen stumpf aneinanderstoßen, muss beim Einbau der Tübbinge sehr genau gearbeitet werden. Bei zu großem Versatz der Tübbinge untereinander kommt es zu keiner Überdeckung der lastübertragenden Flächen. Diesem Aspekt ist daher besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

5.2.2 Nachhaltigkeitsaspekte

Anstatt den gesamten Tunnel auf die Störzone auszulegen, wie es bei herkömmlichen Verfahren der Fall ist, wird beim RET die Störzone mit verstärkten Tübbingen von geringerem Querschnitt ausgekleidet. Für den restlichen Tunnel bedeutet dies eine Einsparung wertvoller Ressourcen. Damit wird ein Kompromiss zwischen dem stetig wachsenden Bedarf an unterirdischer Verkehrsinfrastruktur und den immer knapper werdenden Rohstoffen der Erde gefunden. Ein weiterer Effekt des schmäleren Tunnelausbaus ist die Reduzierung des Bohrdurchmessers. Dadurch werden große Mengen an Aushub eingespart. Dieser muss nicht transportiert, weiterverarbeitet oder behandelt werden. Der soziale Aspekt der Nachhaltigkeit wurde in der Analyse nicht behandelt. Dennoch lassen sich weder Verbesserung noch Verschlechterung durch den Einsatz von RET von der Autorin festmachen. Einzig und allein durch das Zulegen der zusätzlichen Bewehrung entsteht ein etwas größerer Arbeitsaufwand für die Arbeiter.

5.2.3 Ökonomische Aspekte

Neben der ökologischen Nachhaltigkeit wird auch der ökonomische Aspekt berücksichtigt. Immer häufiger werden strengere Umweltauflagen an die Finanzierung von Projekten gekoppelt. Ein Beispiel dafür ist die Taxonomie. Wenn die geforderten Kriterien, wie der Schutz des Klimas und der Ökosysteme, nicht erfüllt sind, wird die Finanzierbarkeit kritisch. Dies hat Auswirkungen auf alle Ebenen des Bauwesens. So wirkt sich die Verordnung auf Arbeitnehmer und Arbeitgeber genauso aus wie auf ein Produkt, in diesem Fall ein Tunnelbauwerk. Durch den Einsatz ressourceneffizienter Bauweisen werden die Umweltbelastungen nachweislich reduziert. Die Chancen, die gestellten Anforderungen zu erfüllen, steigen.

Die vertragliche Integration ökologischer Aspekte, vor allem jener der Treibhausgasemissionen, ist immer stärker im Kommen. Auftraggebern ist es möglich durch die Definition von Klimaschutz als Eignungskriterium oder Zuschlagskriterium Angebote aus dem Bewerb auszuschließen. Die

Bewertung der Kriterien erfolgt anhand unterschiedlichster Aspekte. Eine Möglichkeit ist die Bepreisung der im Bauprozess emittierten CO₂-Emissionen. Damit stellt sich der im Angebot dargestellte Preis nicht mehr nur aus den kalkulierten Werten zusammen, sondern noch zusätzlich durch monetarisierte Emissions-Äquivalente.¹⁴¹ In diesem Zusammenhang wird ebenfalls vom Einsatz des RET profitiert. Durch die geringeren Emissionen können geringere Angebotspreise erstellt werden. Damit bleibt man zukünftig konkurrenzfähig.

¹⁴¹Vgl. [80] Püstow et al., S. 10 ff.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Erkenntnisse und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und Ökobilanz werden hier in Kürze nochmals dargelegt. Dieser Überblick spannt die Brücke zu den am Anfang der Arbeit gestellten Forschungsfragen. Anhand der gewonnenen Outputs sind diese zu beantworten. Den Schluss der Arbeit bildet ein kurzer Ausblick auf zukünftige Fragestellungen im Tunnelbau.

Der anthropogene Klimawandel und die daraus resultierenden Klimaziele des Pariser Abkommens sind neben einer immer größer werdenden Ressourcenknappheit die Motivation für nachhaltigeres Handeln in der Baubranche und damit eingeschlossen dem Tunnelbau. Für die Umsetzung ist jedoch das Umreißen und Abstecken der Begrifflichkeiten Tunnelbau und Nachhaltigkeit notwendig.

Letztere umfasst drei Ebenen. Die Erste ist die ökologische Ebene. Diese beschäftigt sich mit dem rücksichtsvollen Umgang mit natürlichen Ressourcen. Gemessen wird das anhand definierter Indikatoren und Parameter, welche die Emissionen in Wirkungskategorien einordnen und bewerten. Ganzheitlich für ein Produkt, z.B. einem Tunnel, werden die Ergebnisse solcher Betrachtungen in einer Ökobilanz – auch genannt Life-Cycle-Assesment – zusammengefasst. Mit der *ÖNORM EN ISO 14040* [72] ist die normative Grundlage für die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen auf internationaler Ebene gegeben. Anhand den in Österreich gültigen *ÖNORM B 1801-1, 1801-2 und 1801-4* [62] [63] [64] werden die Lebenszykluskosten eines Bauwerks ermittelt. Diese sind maßgebend für die Bewertung ökonomischer Nachhaltigkeit. Durch die Verteilung der Kosten innerhalb der definierten Lebensphasen sind Potentiale zur Optimierung abzuleiten. Insbesondere für Infrastrukturbauten, deren Nutzungsdauer oft 100 Jahre überschreitet, ist eine Minimierung der Betriebs- und Instandhaltungskosten anzustreben. Es gibt keine klaren Indikatoren und Verteilungen für die soziale Nachhaltigkeit, wodurch eine objektive Beurteilung erschwert wird. Der Faktor Mensch kann nicht aus der Analyse herausgelöst werden.

Aufgrund von historischen und geografischen Gegebenheiten spielt der Tunnelbau in Österreich eine besondere Rolle. Durch den derzeitigen Bau mehrerer Jahrhundertprojekte, wie der neuen U-Bahnlinie U5, sowie dem Semmering- und Brennerbasistunnel, werden urbane und internationale Verkehrsachsen weiter gestärkt. Die Schaffung neuer Infrastruktur ist unabdingbar, dennoch ist es von entscheidender Bedeutung zu berücksichtigen, wie sich der Bauprozess auf die Umwelt auswirkt. So stammt ein Großteil der von Österreich emittierten THG-Emissionen der Industriegütererzeugung von den Materialien Stahl und Zement. Unabhängig davon, ob der Tunnel zyklisch oder kontinuierlich vorangetrieben wird, sind beide Materialien elementare Bestandteile des Tunnelausbaus. Bei der Wahl der für ein Projekt optimalen Tunnelbauweise muss auf zahlreiche Faktoren, wie z.B. Geologie, Wasseraufkommen und Ausbruchquerschnitt geachtet werden. Es stehen die geschlossene, die offene sowie die Absenkbauweise zu Verfügung. Der bereits erwähnte zyklische Vortrieb gliedert sich in die geschlossene Bauweise ein. Das Verfahren ist sehr aufwandsintensiv, da es zeitlich aufeinander folgende, sich wiederholende Arbeitsschritte des Lösens, Schuttern, Sichern und Ausbauens des Tunnelquerschnitts erfordert. Da keine allzu kostspieligen Gerätschaften notwendig sind, fallen die Personalkosten für den Betrieb der Maschinen stark ins Gewicht. Ein Vorteil dieser Vortriebsart ist die flexible Gestaltung des

Querschnitts. Das Gegenteil dazu bildet der maschinelle Vortrieb mit Tunnelvortriebsmaschine. Diese werden speziell für die Anforderungen eines Projektes gefertigt, darunter der Tunneldurchmesser. Gegenüber spontanen Anpassungen sind sie daher unflexibel. Es stellt sich somit die Frage, wie sich in gewachsenen und verhältnismäßig rigiden Systemen wie dem Tunnelbau nachhaltige Ansätze etablieren sollen. Herunter gebrochen auf die einzelnen Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerks sind zahlreiche organisatorische und technische Ansätze zur ökologischen, ökonomischen und sozialen Optimierung gefunden worden. Eine genaue Zusammenfassung ist unter der Forschungsfrage 1 gegeben.

Neben den recherchierten Ansätzen zur nachhaltigen Gestaltung des Tunnelbaus wurde mit dem Forschungsprojekt des ressourceneffizienten Tübbing ein weiterer solcher Ansatz gefunden. Um die Spezifikationen dieses alternativ bewehrten Ausbaus auszuarbeiten, wird ein Überblick über herkömmliche Tübbinge gegeben. Diese unterscheiden sich in Bezug auf Geometrie, Auskleidungssystem, Material, Fugen und Dichtheitsfunktionen. Die Bauteile unterliegen strengen Anforderungen hinsichtlich Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Um eine hohe Qualität sicherzustellen, muss ein striktes Kontroll- und Prüfprogramm für die Eingangsressourcen der Materialien, die Materialien selbst sowie die Tübbinge als Ganzes durchgeführt werden. Nach erfolgreicher Produktion werden sie durch einen Erektor im Tunnel eingebaut. Die Ringspaltverpressung dient dem Zusammenhalt zwischen dem Tübbing und dem umgebenden Gebirge. Hierfür werden zementhaltige Mörtel oder spezielle 2-Komponenten-Mörtel verwendet. Letztere zeichnen sich durch eine lange Verarbeitbarkeit aus, schneiden jedoch in Bezug auf die CO₂-Emissionen schlecht ab. Wie gezeigt, benötigt die Herstellung der Tübbinge und des Ringspalts Beton, Stahl sowie Zement und weitere Zusatzmittel und -stoffe. Dies bedeutet einen hohen Ressourcenverbrauch für ein Tunnelprojekt. Zudem sind die Ausbauten von Tunneln entlang einer Trasse auf die Störzonen ausgelegt und fallen dementsprechend stärker aus. Dadurch kommt es im Regelbereich zu einer Überdimensionierung der Tübbinge. Dies führt zu einer Verschwendung von Ressourcen. Der Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau des Instituts für Tragkonstruktionen an der TU Wien hat sich dieser Problematik angenommen. Gedreht wurde an den beiden existierenden Stellschrauben zur Optimierung der Tübbinge: Beton und Stahl. Durch eine Reduzierung des Betonquerschnitts und Einbringen einer zusätzlichen Bewehrung entlang der stark beanspruchten Längsfugenstöße der Segmente, wird die Tragfähigkeit der alternativ bewehrten Tübbinge im Vergleich zu ihren herkömmlichen Pendanten beibehalten. In Bereichen mit geringerer Belastung entfällt die Zusatzbewehrung. So wird ein ressourcenoptimierter Ausbau entlang des Tunnels geschaffen.

Die gewonnen Erkenntnisse über den RET stellen wichtige Eingangsdaten für die Ökobilanz dar. Zweck dieser ist der Vergleich von 7 Tunnelquerschnitten. Als Referenz wird ein Tübbingausbau bilanziert, der mit heutigen Stand der Technik hergestellt wird. Anhand dessen werden mit dem ressourceneffizienten Tübbing ausgestattete Querschnitte verglichen. Zwei dieser Varianten werden mit legiertem Stahl als Zusatzbewehrung angenommen. Das folgt aus der Problematik, dass die Bewehrungsstäbe der Längsfugenbewehrung stumpf aufeinander stoßen. Damit sind sie besonders anfällig auf Einwirkungen, wie Rost. Zum Vergleich dazu, werden zwei weitere Querschnitte, die identisch zu den vorher beschriebenen sind, untersucht. Einziger Unterschied ist, dass die Bewehrung mit herkömmlichen B 550 Stahl hergestellt wird. Die geometrischen Abmessungen der restlichen zwei Varianten entsprechen jenen der genannten Varianten. Einziger Unterschied ist der Entfall der zusätzlichen Bewehrung. Die Auswertung der Untersuchten Tunnelquerschnitte wird entsprechend der *ÖNORM EN ISO 14040* [72] durchgeführt. Für die geografischen Systemgrenzen wurde Europa gewählt. Die betrachteten Prozesse schließen die benötigten Materialien zur Herstellung von Tübbingen und Ringspalt mit ein, sowie die Stromerzeugung der TVA. Aspekte wie z.B. der Transport der Materialien vom Werk auf die Baustelle, oder die Baustelleneinrichtung wurden nicht berücksichtigt. Die funktionelle Einheit,

spricht jene Größe, auf die sich die Ergebnisse der Ökobilanz beziehen, wird mit 1 Meter Tunnel bestimmt. Durch die Reduzierung der Tübbingausbaustärke von 45 cm auf 35 cm reduzieren sich die CO₂-Äq.-Emissionen des gesamten Tunnelquerschnitts um 3,78%. Bei nur mehr 30 cm sind es sogar 8,06% Einsparung mithilfe des RET. Wenn die Zusatzbewehrung des RET mit legierten Stahl verwirklicht wird, kommt es aufgrund der Emissionen aus der Stahlbearbeitung zu einer Verschlechterung der Bilanz. Diese beläuft sich im Vergleich zu einem herkömmlichen Tunnelquerschnitt auf 3,35% bei einem RET mit 35 cm und 0,81% bei 30 cm. Bezogen auf die Projektebene werden durch die Kombination des Einsatzes der Querschnitte mit und ohne Zusatzbewehrung aus legiertem, Stahl, jedoch deutliche Verringerungen der Emissionen erzielt. Für eine genaue Beschreibung und Auflistung aller Resultate wird auf die Forschungsfragen 2 und 3 verwiesen. Bei der Sensitivitätsprüfung zeigt sich, dass je nach gewählten Datensatz für einen Prozess/Fluss, die Ergebnisse stark variieren. Somit muss die Vergleichbarkeit zweier Studien immer geprüft werden.

Die Auswirkungen des Einsatzes von RET auf ein gesamtes Projekt werden anhand der Ausweitung der Betrachtungsebene von der funktionellen Einheit 1 m Tunnel auf die Länge eines Beispielprojekts abgeschätzt. Es werden 5 Tunnel mit unterschiedlichen Tunnelausbauten betrachtet. Die Länge der Tunnel beträgt 1000 m, wobei 75 m auf Störzonen und 925 m auf Regelbereiche entfallen. Der Innendurchmesser beträgt 9,1 m. Es werden jene Tunnelquerschnitte verwendet, die in der Ökobilanz behandelt wurden. Als Vergleichsbasis dient der Tunnel 45, der mit einem Tübbingausbau von 45 cm Stärke auf dem heutigen Stand der Technik gebaut ist. Für die anderen Tunnel werden Ausbauten mit ressourcenoptimierten Varianten verwendet. In den Störzonen werden die verstärkten Tübbinge und im Regelbereich die unverstärkten Tübbinge eingebaut. Die Ergebnisse der Analyse variieren je nach betrachtetem Land stark. Es lässt sich hervorheben, dass Tunnel in Österreich im Vergleich zu Europa relativ klimaschonend hergestellt werden. Zwar stellen solche Bauwerke immer noch einen massiven Einschnitt in die Umwelt dar, dennoch ist dieser nicht so extrem wie in anderen Ländern. Durch den RET wird außer den Emissionen zusätzlich der Bohrdurchmesser reduziert. Das zieht eine Verringerung des Ausbruchvolumen von 3,83% bis 5,70% mit sich. Die Aufteilung der relativen und absoluten Reduktionspotentiale wird in Forschungsfrage 3 näher erläutert.

Die zusätzliche Bewehrung des RET wird einfach durch das Einlegen der Stabbewehrung in die Längsfugen realisiert. Dadurch integriert sich das System reibungslos in bisherige Arbeitsabläufe. Im Vergleich zu anderen Ansätzen, die spezielle Formteile oder verschiedene Betonierabschnitte einbeziehen, zeichnet sich dieser Ansatz durch seine Einfachheit aus. Vor dem Einsatz ist die konstruktive Durchbildung zu überprüfen. Die Randabstände der stumpf gestoßenen Bewehrung stellen eine Schwachstelle dar. Daher ist beim Einbau der Segmente Vorsicht geboten. Allgemein betrachtet stellt das RET-System eine Möglichkeit dar, in den rigiden Randbedingungen des maschinellen Tunnelbaus flexible Tragfähigkeiten der Ausbauten zu integrieren. Im gleichen Zug werden Emissionen und Aushub eingespart. Dies hat einen positiven Einfluss auf die sich stetig verschärfenden Anforderungen im Bauwesen bezüglich Nachhaltigkeit. Angefangen von der Ausschreibung bis hin zur Finanzierung von Projekten wird der ökologische Aspekt bedeutender. Somit ergibt sich ein größer werdendes Einsatzfeld für den ressourcenoptimierten Tübbing.

6.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Verlauf der Arbeit wurden die zu Beginn gestellten Forschungsfragen beantwortet. Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse trugen dazu bei, im weiteren Verlauf Antworten zu finden.

Forschungsfrage 1: Durch welche Maßnahmen können die Emissionen des Tunnelbaus mit heutigem Stand der Technik bereits reduziert werden?

Es gibt zahlreiche organisatorische und technische Ansätze, die Nachhaltigkeit im Tunnelbau zu verbessern. Eine Gliederung dieser Maßnahmen erfolgt anhand der 6 Lebenszyklusphasen definiert nach *ÖNORM EN 15978* [67]. Grundsätzliche Entscheidungen, welche die nachkommenden Phasen maßgebend beeinflussen, werden durch organisatorische Maßnahmen in der Planungsphase getroffen. Dazu gehören UVP, integrale Planung und nachhaltige Vergabe. Die zweite Phase – Modul A1–A3 – beschäftigt sich mit der Herstellung. Der Fokus der Maßnahmen liegt hierbei naturgemäß auf den primär im Tunnelbau eingesetzten Baumaterialien Beton und Stahl. Dabei spielen neuartige Zementrezepturen und die Verbesserung bestehender Herstellungsprozesse eine tragende Rolle für die Nachhaltigkeit des Betons. Stahl baut stark auf neue Produktionsschritte wie der Direktreduktion durch CO₂-neutrale Gase und den Einsatz von Stahlschrott zur Senkung der Eingangsressourcen.

Aus technischer Perspektive ist während der Errichtungsphase – Modul A4–A5 – die nachhaltige Behandlung des Ausbruchs neben der Optimierung der Tragkonstruktionen und dem Einsatz von Robotern zur Unterstützung der Arbeiter bei der Tübbingherstellung der entscheidende Faktor. Aufgrund der enormen Menge ist es wichtig, nicht länger das Ausbruchmaterial als Abfall zu betrachten, sondern als neue Rohstoffquelle. Für den Baustellenbetrieb stellt sich die Internierung der Lean-Prinzipien als viel versprechender Ansatz heraus.

Die Nutzungsphase – Modul B1–B8 – stellt die längste Phase im Lebenszyklus eines Bauwerks dar. Daher sind energiesparende Maßnahmen wie neuartige Beleuchtungssysteme und effiziente Belüftung besonders wichtig, um ökologische und ökonomische Verbesserungen zu erzielen. Eine weitere Möglichkeit ist die Energieerzeugung vor Ort, wobei den Energietunneln besonderes Potential zugesprochen wird. Diese ermöglichen die Nutzung thermischer Energie durch Bauteilaktivierung. Digitalisierung und Automatisierung erleichtern die Instandsetzung und Instandhaltung. Die computergestützte Analyse von Schadensbildern und die Inspektion von Tunneln durch Roboter finden in diesem Bereich Anwendung. Aus organisatorischer Sicht spielt die Sicherheit während des Betriebs eine entscheidende Rolle. Durch verbesserte Frühwarnsysteme und Verkehrssysteme wird das Unfallrisiko weiter reduziert.

Die Entsorgungsphase – Modul C1–C4 – spielt eine untergeordnete Rolle für die ermittelten Maßnahmen. Da der Rückbau aus Sicherheitsgründen meist nicht möglich ist, verbleiben die Materialien größtenteils in ihrem Zustand. Daher ist es wichtig, bei der Materialauswahl auf Umweltverträglichkeit zu achten, da Schadstoffe sonst für mehrere Jahrhunderte im System verbleiben.

Es gibt Maßnahmen, die sich nicht nur auf die Systemgrenzen – Modul D – beschränken. Insbesondere alternative Antriebe fallen bei den technischen Entwicklungen auf. Im Bereich Transport und Logistik haben LKW, die mit Wasserstoff betrieben werden, ein großes Einsatzfeld. Für kleine und mittlere Verbraucher stellt der elektrische Antrieb die beste Alternative dar. Durch den lokal emissionsfreien und leisen Betrieb verbessern sich die Arbeitsbedingungen im Umfeld der Maschinen. Alternative Kraftstoffe aus erneuerbaren Energiequellen, wie z.B. Biomasse, bieten die Möglichkeit, bereits bestehende Geräte klimaschonender zu betreiben. Eine Prämisse für alle eingesetzten neuartigen Kraftstoffe ist, dass sie zu 100% aus erneuerbaren Quellen stammen. Ansonsten tritt keine Verbesserung bzw. Verschlechterung im Vergleich zu fossil betriebenen Pendants ein. Organisatorische Maßnahmen verfolgen zunehmend einen ganzheitlichen Ansatz bei der Betrachtung von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken. Dabei werden Bewertungen unter festgelegten Kriterien durchgeführt, um die Nachhaltigkeit des betrachteten Objekts zu evaluieren. Zur Bereitstellung von Informationen können BIM-Modelle herangezogen werden. Im Tunnelbau wird BIM oft zur Parametrisierung von komplexen Modellen verwendet. Die Wirkungsbereiche der Umweltverträglichkeitsprüfung und der Taxonomie beginnen bereits vor

dem eigentlichen Baubeginn des Projekts. Die Finanzierung ist eine der ersten Fragen, die sich bei der Planung und Entwicklung eines Projekts stellen. Die Entscheidungen in diese Richtung werden immer stärker durch die vom Europäischen Parlament erlassene Taxonomie beeinflusst. Auf Unternehmensebene setzt sich Green Governance immer weiter durch. Unternehmen werden zunehmend von externen Kräften dazu gedrängt, soziale und ökologische Belange in ihre Politik zu integrieren.

Forschungsfrage 2: Welche Bestandteile haben den größten GWP-Anteil bei einem herkömmlichen Tunnelquerschnitt im kontinuierlichen Vortrieb?

Für die durchgeführte Ökobilanz hat sich gezeigt, dass für den maschinellen Vortrieb die Materialien Beton, Zement sowie die Bewehrung einen maßgebenden Einfluss auf die Emissionen haben. Weiter schlägt sich die Herstellung der Tunnelquerschnitte mittels TVA stark in der Bilanz nieder. Je nach betrachtetem Land variieren die Anteile jedoch stark. Dieser Tatbestand ist in Abb. 6.1 abgebildet. Die abgebildeten Schwankungen ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Emissionen, die in den einzelnen Ländern bzw. Regionen für die Herstellung von Gütern emittiert werden. Besonders hervorzuheben sind hier die Differenzen bei der Strom- und Stahlerzeugung.

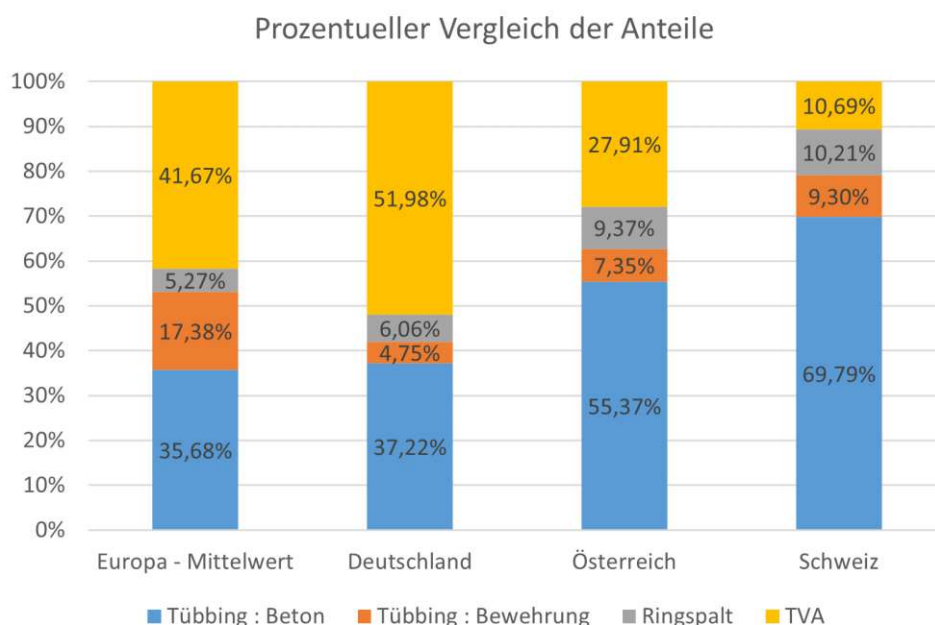


Abb. 6.1: Prozentuale Verteilung der Anteile in Bezug auf die CO₂-Äq.-Emissionen

Die Emissionen der Tübbinge, sowie des Ausbaus, ergeben sich beinahe zu 100% aus den benötigten Materialien. Nur geringe Anteile entfallen auf Prozesse, wie das Mischen des Betons oder die Wärmebehandlung der Tübbinge. Werden die Prozentsätze für die Tübbinge und den Ringspalt unter dem Begriff Ausbau zusammengefasst, ergibt sich ein Einfluss von 48,02% bis 89,31% auf die Gesamtbilanz. Den größten Anteil daran bildet für alle in Abb. 6.1 gezeigten Analysen der Beton für die Tübbinge. Aufgrund des energie- und emissionsreichen Herstellungsprozess des Zements schlägt sich dieser Bestandteil stark auf die Bilanz nieder. Ein weiter Grund dafür sind die großen benötigten Mengen, die für den Ausbau eines gesamten Tunnels notwendig sind.

Weiterer wichtiger Bestandteil ist der Stahl für die Bewehrung der Tübbinge. Wie aus Abb. 6.1 zu sehen ist, fällt der Anteil für Europa mit 17,38% deutlich höher aus als für den Rest der

Länder. Grund dafür ist, dass Stahl in der DACH-Region klimaschonender hergestellt werden kann.

Zement stellt neben dem Beton ebenfalls für den Ringspaltmörtel einen Hauptbestandteil dar. Andere Bestandteile, wie die Gesteinskörnung oder Bentonit, wurden in dieser Betrachtung ausgeschieden, da sie im Verhältnis zum Zement einen vernachlässigbaren Einfluss haben. Analysiert wurde eine bedingt aktive Rezeptur von 150 kg Zement/m³ Mörtel. Andere Mischungen, wie der Zweikomponentenmörtel, haben einen schlechteren Einfluss auf die Umwelt. Grund dafür ist der noch höhere Anteil an Zement sowie unterschiedliche Chemikalien, welche die langen Verarbeitungszeiten der Mörtel garantieren.

Die primäre Eingangsressource für den Betrieb der TVA ist Strom. Je nachdem wie groß die an die Produktion gekoppelten Emissionen sind, fällt der Anteil an der Gesamtbilanz aus. Somit kann direkt von Abb. 6.1 abgelesen werden, ob die Stromproduktion aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Quellen stammt. Die Schweiz und Österreich zeichnen sich durch eine sehr *grüne* Herstellung aus. Damit belaufen sich die Anteile auf 10,69% für die Schweiz bzw. 27,91% für Österreich. Der Strommix von Deutschland ist durch Kohle- und Gaskraftwerke geprägt, somit steigt der Anteil auf über die Hälfte.

Als Resümee lässt sich sagen, dass eine große Vorsicht bei der Betrachtung verschiedener Ökobilanzen geboten ist. Alleine durch die Variation eines Eingabeparameters ist ein komplett anderer Ausgang einer ökologischen Analyse möglich.

Forschungsfrage 3: Inwiefern wirkt sich die ressourceneffiziente Bauweise des RET auf die Ökobilanz des Tunnelquerschnitts aus?

Ein Tunnelquerschnitt mit ressourceneffizienten Tübbing vermindert aufgrund des geringeren Materialeinsatzes, sowie des kleineren Bohrdurchmessers, seine Emissionen von 14,50 CO₂-Äq./m Tunnel auf 13,95 CO₂-Äq./m Tunnel bzw. 13,34 CO₂-Äq./m Tunnel. Diese Verringerung ist auf die Reduktion der Stärke des Tübbingausbaus von 45 cm auf 35 cm bzw. 30 cm zurückzuführen. Dies zieht die Abnahme des Ringspaltmaterials, sowie des Ausbruchquerschnittes mit sich. Aus Tab. 6.1 quantifizieren sich diese Einsparungen auf 1,96%–2,88% für den Ringspalt und 3,32%–5,15% für den Betrieb der TVA. Wie aus Tab. 6.1 zu entnehmen ist, werden durch den optimierten Tübbingausbau der Variante 2 relativ gesehen die größten Verbesserungen erzielt. Die Tragfähigkeit der Elemente bleibt durch die zusätzlich eingebaute Längsfugenbewehrung erhalten. Ganzheitlich gesehen lassen sich mit einem ressourceneffizienten Ausbau der Stärke von 35 cm 3,78% und für 30 cm 8,06% einsparen. Für die Varianten mit den legierten Bewehrungsstahl ergibt sich auf die funktionelle Einheit von 1 m Tunnel ein Nachteil bzgl. Emissionen. Betrachtet man jedoch die Ergebnisse aus Tab. 6.2, so ist erkenntlich, dass über den gesamten Tunnel hinweg Einsparungen erzielt werden.

Die genannten Ergebnisse beziehen sich auf einen Meter Tunnel. Um die baupraktische Realität darzustellen, werden die Auswirkungen des optimierten Ausbaus auf die Projektebene erweitert. Angenommen wird ein Tunnel mit einer Länge von 1000 m, einem Anteil der Störzonen von 7,5% und ein Innendurchmesser von 9,1 m. In den Störzonen des Tunnels kommt der mit der Zusatzbewehrung verstärkte RET zum Einsatz. Für die Regelbereiche bleibt die Geometrie dieselbe, nur die zusätzliche Bewehrung entfällt. Damit sinken die Emissionen und Ressourcen in diesem Bereich noch weiter. Vergleichsbasis ist ein herkömmlicher Querschnitt. Die Ergebnisse der fünf untersuchten Tunnel sind in Tab. 6.2 gegeben. Wie sich zeigt, ergeben sich für alle Tunnel mit RET-Ausbau eine Reduktion der Emissionen von 12,43–19,60%.

Forschungsfrage 4: Wie gestaltet sich das Einsatzpotential des ressourceneffizienten Tübbing im Tunnelbau von Morgen?

Durch das optimierte System des RET werden zwei Herausforderungen mit einer Maßnahme adressiert: Ressourcenknappheit und CO₂-Emissionen. Der geringere Materialeinsatz der

Tab. 6.1: Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen

Tübbingstärke cm	Herkömmliche Var. 45	Var.1 35	Var.2 30	Var.1.1 35	Var. 2.1 30
Normalkraftwiderstand MN	20,68	22,18	21,40	22,18	21,40
kg CO ₂ -Äquivalente/m Tunnel					
Tübbingausbau	7697	7364 4,32%	6861 10,87%	8398 -9,11%	8148 -5,86%
Ringspalt	765	750 1,96%	743 2,88%	750 1,96%	743 2,88%
TVA	6044	5843 3,32%	5732 5,15%	5843 3,32%	5732 5,15%
Summe	14506	13957 3,78%	13336 8,06%	14991 -3,35%	14620 -0,81%

Tab. 6.2: Ergebnisse des Vergleichs – unterschiedliche Tunnelvarianten

Tunnel Querschnittsvariante	45 Herk.Variante	35 Var. 1	30 Var. 1a	30 Var. 2	30 Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel	14,50	13,96	12,52	13,34	11,53
Einsatzort	Störzone, Regelbereich	Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m	1000	75	925	75	925
Gesamtemissionen	14506 t CO ₂ -Äq.	12625 t CO ₂ -Äq.		11662 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1881 t CO ₂ -Äq.		2844 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung –relativ		12,97%		19,60%	
Tunnel Querschnittsvariante		35 l Var. 1.1	30 l Var. 1a	30 l Var. 2.1	30 l Var. 2a
t CO ₂ -Äq./m Tunnel		14,99	12,52	14,62	11,53
Einsatzort		Störzone	Regelbereich	Störzone	Regelbereich
Eingesetzte Länge – m		75	925	75	925
Gesamtemissionen		12702 t CO ₂ -Äq.		11759 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung – absolut		1804 t CO ₂ -Äq.		2747 t CO ₂ -Äq.	
Einsparung –relativ		12,43%		18,94%	

alternativen Bewehrungsführung führt zu einer Einsparung von Ressourcen, wodurch diese vermieden werden, noch bevor sie entstehen. Dies unterstreicht das Potential des RET-Einsatzes. In Kombination mit der nahtlosen Integration des Systems in bestehende Bauprozesse wird eine nachhaltige Lösung auf allen Ebenen erreicht. Bei einer weiteren Betrachtungsebene wird die Synergie mehrerer Maßnahmen möglich. Hierbei profitiert die Tübbingherstellung zukünftig von neuartigen, klimaschonenden Zementen. Die Stahlproduktion erfolgt rein elektrisch, und die aufwendige Bewehrungsarbeit wird von Robotern übernommen. Obwohl die Umsetzung dieser Ansätze noch in der Zukunft liegt, entwickelt sich in diesen Bereichen mehr als je zuvor.

6.2 Ausblick

Der Grundtenor im Bauwesen ist eindeutig: Nachhaltigkeit wird immer wichtiger. Es gibt bereits viele Möglichkeiten, um den Schritt in eine ökologische, soziale und ökonomische Zukunft zu gehen. Eine Herausforderung besteht darin, diese Ansätze in die herkömmlichen Strukturen des Bauwesens zu integrieren. Das Forschungsprojekt zum ressourceneffizienten Tübbing schafft diesen Übergang. Zukünftig ist zu untersuchen, inwieweit noch weitere Optimierungen für die

Tragstrukturen des maschinellen Tunnelbaus möglich sind. Die Zukunft des Tunnelbaus ist durch die Weiterentwicklung bisheriger und die Entwicklung neuer Baumethoden bestimmt. In Bezug auf Ökobilanzen steht mit BIM ein wichtiges Tool zu Verfügung. Durch die Verknüpfung der Bauteile mit ökologischen Kennwerten werden Analysen auf Knopfdruck erstellt. Damit fällt der Vergleich unterschiedlicher Ausführungsvarianten leichter. Vor mehreren Jahrzehnten ermöglichte die Neue Österreichische Tunnelbaumethode einen ressourcenschonenden Ansatz. Auch zukünftig bieten sich viele Möglichkeiten, den Tunnelbau weiter zu revolutionieren.

Durch den immer größer werdenden Bedarf an Infrastruktur ist Innovation gefragt, den durch die knapper werdenden Ressourcen humaner und materieller Natur gestaltet sich die Errichtung solcher Bauwerke schwieriger als je zuvor. Besonders für jene Länder, die noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen, ist die Einbindung nachhaltiger Prinzipien oft herausfordernd. So liegt eine große Verantwortung bei den westlichen Ländern das geschaffene Know-How verfügbar zu machen, um den Tunnelbau von Morgen zu stärken.

Literatur

- [1] D. Adam. *Studienblätter zur Vorlesung Tunnelbau im Festgestein und Lockergestein*. Wien, 2017.
- [2] ASFINAG. *Eintrag zu Photovoltaik von 25.07*. E-mail. 19. Sep. 2023.
- [3] M. Barla, A. Di Donna und A. Perino. *Application of energy tunnels to an urban environment*. In: Geothermics 61 (2016). Publisher: Elsevier.
- [4] BMK. *Ausbauübersicht Tunnel, Bundesstraßen A und S*. Wien, 2022. (Zugriff am 27. 07. 2023).
- [5] BMK. *Energie in Österreich: Zahlen, Daten, Fakten*. In: (2023). URL: <https://www.bmk.gv.at/themen/energie/publikationen/zahlen.html>.
- [6] BMK. *Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V)*. 2014. URL: https://www.bmk.gv.at/themen/mobilitaet/transport/international_eu/eu/ten.html (Zugriff am 08.08.2023).
- [7] BMK. *UVP – Verfahren*. URL: <https://www.usp.gv.at/umwelt-verkehr/umweltvert-raeglichkeitspruefung/uvp-verfahren.html> (Zugriff am 17.09.2023).
- [8] R. Breitenbücher. *Spezielle Anforderungen an Beton im Tunnelbau*. In: *Beton-Kalender 2014*. John Wiley Sons, Ltd, 2013, S. 391–422. ISBN: 9783433603352. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783433603352.ch10>.
- [9] R. Breitenbücher und b.-Y. Youn-Cale. *Praxisrelevante Korrelationen der Ausgangsstoffe und der Zusammensetzung mit den Eigenschaften von einkomponentigen Ringspaltmörteln*. In: *Taschenbuch für den Tunnelbau 2018: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau, 42. Jahrgang*. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/chapter-epub/10.1002/9783433608753.ch4> (Zugriff am 27. 11. 2023).
- [10] Brill. *Statistik der Eisenbahn-Tunnel in Österreich*. 2023. URL: <https://www.eisenbahntunnel.at/inhalt/statistik.html> (Zugriff am 27. 07. 2023).
- [11] S. Bundesamt. *Bruttostromerzeugung in Deutschland*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Energie/Erzeugung/Tabellen/bruttostromerzeugung.html> (Zugriff am 04. 01. 2024).
- [12] Bundeskanzleramt. *Nachhaltige Entwicklung - Agenda 2030 / SDGs - Bundeskanzleramt Österreich*. URL: <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/themen/nachhaltige-entwicklung-agenda-2030.html> (Zugriff am 27. 09. 2023).
- [13] H. C. v. Carlowitz. *Sylvicultura oeconomica*. Google-Books-ID: bHJDAAAACAAJ. Braun, 1732. 326 S.
- [14] T. Cordes und K. Voit. *Strukturoptimierung von Spritzbetonschalen – Versagensanalysen von Spritzbetonschalen bei Betrachtung von Vortriebsoptimierungen*. In: Geomechanics and Tunnelling null (2023), null. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/0eee9b610456ac121a8ad6605ba034bdf3ee58dd>.
- [15] DAUB. *Empfehlungen zur Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen*. Köln, 2010. URL: https://www.daub-ita.de/fileadmin/documents/daub/withdrawn/2010-11_DAUB_Empfehlung_zur_Auswahl_von_Tunnelvortriebsmaschinen.pdf.

- [16] DAUB. *Taschenbuch für den Tunnelbau 2014: Kompendium der Tunnelbautechnologie Planungshilfe für den Tunnelbau*. 1. Aufl. Wiley, 22. Okt. 2013. ISBN: 978-3-433-03055-4 978-3-433-60357-4. DOI: 10.1002/9783433603574. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9783433603574> (Zugriff am 12.10.2023).
- [17] Der Standard. *Vorarlberger Baufirma testet "Roboterhundeäuf Baustellen*. DER STANDARD. 24. Sep. 2020. URL: <https://www.derstandard.at/story/2000120212591/vorarlberger-baufirma-testet-roboterhunde-auf-baustellen> (Zugriff am 13.09.2023).
- [18] C. Diendorfer, B. Gahleitner, B. Dachs, T. Kienberger, P. Nagovnak, H. Böhm, S. Moser, G. Thenius und K. Knaus. *Klimaneutralität Österreichs bis 2040 – Beitrag der österreichischen Industrie*. Wien, 2021.
- [19] 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*. In: Geomechanics and Tunnelling 7.5 (2014). Publisher: Wiley Online Library, S. 601–609.
- [20] S. Englert. *JGZ, SWS von Schunk - Hohe Flexibilität in der robotergestützten Tübbingproduktion - Automation.at*. URL: https://www.automation.at/bericht/greifer/hohe-flexibilitaet-in-der-robotergestuetzten-tuebbingproduktion-_2022-01-26 (Zugriff am 16.09.2023).
- [21] H. Erben und R. Galler. *Tunnel spoil – New technologies on the way from waste to raw material / Tunnelausbruch – Neue Technologien für den Weg vom Abfall zum Rohstoff*. In: Geomechanics and Tunnelling 7 (2014), null. DOI: 10.1002/GEOT.201400043. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/e706320ac28c0b8544fe6d9d56cc3c667113f8d4>.
- [22] G. H. Erhardter, J. Weil, L. Bacher, F. Heil und P. Kompolschek. *Building information modelling based ground modelling for tunnel projects – Tunnel Angath/Austria*. In: Tunnelling and Underground Space Technology null (2023), null. DOI: 10.1016/j.tust.2023.105039. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/21dba34f7ab46040c55b167ef4146a25b9af20e6>.
- [23] Europäische Union. *Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 (Text von Bedeutung für den EWR)*. Legislative Body: CONSIL, EP. 18. Juni 2020. URL: <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/deu> (Zugriff am 17.09.2023).
- [24] European Commission. *Die neue EU-Verkehrsinfrastrukturpolitik – Hintergrund*. 2013. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/MEMO_13_897 (Zugriff am 09.08.2023).
- [25] Y. Fang, J. Shen, J. Chen, J.-y. Wang und W. Li. *Study on Fire Smoke Characteristic in Double-tube Road Tunnel with Complementary Ventilation System*. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 741 (2020), null. DOI: 10.1088/1757-899X/741/1/012108. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/8629cfe32d452ed2c1d2f2d84a6e37a52f083a04>.
- [26] W. Fentzloff, S. Rothe, C. Stahn und D. Papantonakis. *BIM meets Lean – Logistics study of a long tunnel using BIM and Lean methods*. In: Geomechanics and Tunnelling 14.3 (2021), S. 286–297. ISSN: 1865-7389. DOI: 10.1002/geot.202100012. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/geot.202100012> (Zugriff am 27.01.2024).

- [27] P. Friedrich und F. Wendland. *Ökologisch nachhaltig oder nicht? Die Einführung der EU Taxonomy for Sustainable Activities: Ein verbindliches Klassifikationssystem nachhaltiger Wirtschaftsaktivitäten in der EU*. Working Paper 14/2021. IW-Policy Paper, 2021. URL: <https://www.econstor.eu/handle/10419/235888> (Zugriff am 02.10.2023).
- [28] FSV. *RVS 09.01.42 Baulicher Brandschutz in Straßentunnel*. Forschungsber. Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2015.
- [29] FSV. *RVS 09.01.42 Geschlossene Bauweise im Lockergestein unter Bebauung*. Forschungsber. Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, 2013.
- [30] Geomechanics and Tunnelling. *3.4.12 Limberg III-storage hydropower station-sustainable tunnel anchorage*. In: Geomechanics and Tunnelling 16.2 (Apr. 2023), S. 218–221. ISSN: 1865-7362, 1865-7389. DOI: 10.1002/geot.202370206. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.202370206> (Zugriff am 13.09.2023).
- [31] A. Gerger, H. Urban und C. Schranz. *Augmented Reality for Building Authorities: A Use Case Study in Austria*. In: Buildings 13.6 (4. Juni 2023), S. 1462. ISSN: 2075-5309. DOI: 10.3390/buildings13061462. URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/13/6/1462> (Zugriff am 18.09.2023).
- [32] G. Girmscheid. *Bauprozesse und bauverfahren des tunnelbaus*. John Wiley & Sons, 2013. URL: https://books.google.at/books?hl=de&lr=&id=ewzHlMny5y4C&oi=fnd&pg=PA1&dq=%E2%80%A2%09G.+Girmscheid.+%E2%80%9EBauprozesse+und+Bauverfahren+des+Tunnelbaus%E2%80%9C&ots=ij0fvxzOgz&sig=MnWRuH-jTKapxT53Hcwf3zK2bWs&redir_esc=y#v=onepage&q=%E2%80%A2%09G.%20Girmscheid.%20%E2%80%9EBauprozesse%20und%20Bauverfahren%20des%20Tunnelbaus%E2%80%9C&f=false.
- [33] Globescan. *GlobeScan / SustainAbility Survey 2021 Sustainability Leaders*. 2021. (Zugriff am 21.07.2023).
- [34] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauprozessplanung*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2019. 261 S.
- [35] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, Forschungsbereich Baubetrieb und Bauverfahrenstechnik, 2017. 308 S.
- [36] G. Goger. *Studienblätter zur Vorlesung Bauverfahren im Tunnel- und Hohlraumbau*. Wien, 2023.
- [37] M. Hausmann. *Einfluss der Ringspaltverpressung auf die Beanspruchung der Tübbingröhre in Tunnellängsrichtung*. Pages: no. 46 Publication Title: Report Geotechnik Universität Duisburg-Essen. Diss. 29. Jan. 2021. DOI: 10.17185/DUEPUBLICO/73992. URL: https://duepublico2.uni-due.de/receive/duepublico_mods_00073992 (Zugriff am 12.10.2023).
- [38] H. Helms, H. Fehrenbach, K. Biemann et al. *Klimabilanz von strombasierten Antrieben und Kraftstoffen*. In: (2019).
- [39] Herrenknecht. *MULTI-SERVICE-FAHRZEUGE (MSV)*. URL: <https://www.herrenknecht.com/de/produkte/productdetail/multi-service-fahrzeuge/> (Zugriff am 10.11.2023).

- [40] M. Hilgers. *Alternative Kraftstoffe*. In: *Alternative Antriebe und Ergänzungen zum konventionellen Antrieb*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016, S. 47–61. ISBN: 978-3-658-15492-9. DOI: 10.1007/978-3-658-15492-9_6. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-658-15492-9_6.
- [41] M. Q. Huang, J. Ninić und Q. Zhang. *BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* (2020), S. 103677. DOI: 10.1016/j.tust.2020.103677. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/42a9e36476df6a67ace3ff5618470b9f5e138034>.
- [42] M. Huymajer, M. Woegerbauer, L. Winkler, A. Mazak-Huemer und H. Biedermann. *An interdisciplinary systematic review on sustainability in tunneling—bibliometrics, challenges, and solutions*. In: *Sustainability* 14.4 (2022). Publisher: MDPI, S. 2275.
- [43] C. C. Ikeagwuani, D. C. Nwonu, D. A. Obetule, M. U. Omeje und T. Festus. *Potential of Bamboo Stem Ash as Supplementary Cementitious Material in Concrete Production*. In: *International Journal of Engineering Research and null* (2019), null. DOI: 10.17577/IJERTV8IS080028. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/3b0d3d5c754d848d0e73394993d2c39c66c725f4>.
- [44] Intergovernmental Panel on Climate Change. *1,5 °C GLOBALE ERWÄRMUNG Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C*. Geneva: World Meteorological Organization, 2018, S. 32.
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Synthesebericht zum Sechsten IPCC-Sachstandsbericht (AR6) Hauptaussagen aus der Zusammenfassung für die politische Entscheidungsfindung*. 6. 11. Juli 2023, S. 6. URL: https://www.de-ipcc.de/media/content/Hauptaussagen_AR6-SYR.pdf (Zugriff am 25. 07. 2023).
- [46] International Tunneling and Underground Space Association. *Tunnel Market Survey 2019*. 2019.
- [47] Z. Jiang, C. Jia, P. Zheng, Y. Gong, N. Li, A. Ahmed, Z. Zhang und D. Luo. *A Transverse Deceleration Energy Harvester Based on a Sliding Plate for Self-Powered Applications in Near-Zero Energy Road Tunnels*. In: *SSRN Electronic Journal* (2022), null. DOI: 10.2139/ssrn.4109361.
- [48] Keestrack. *Keestrack optimiert elektrische Antriebstechnologien*. Keestrack. 25. Apr. 2019. URL: <https://keestrack.com/de/news-press/keestrack-optimiert-elektrische-antriebstechnologien> (Zugriff am 18. 09. 2023).
- [49] A. Kleine. *Die drei Dimensionen einer Nachhaltigen Entwicklung*. In: *Operationalisierung einer Nachhaltigkeitsstrategie: Ökologie, Ökonomie und Soziales integrieren*. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 5–24. ISBN: 978-3-8349-9414-1. DOI: 10.1007/978-3-8349-9414-1_2. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9414-1_2.
- [50] klimaaktiv. *Gebäudebewertungssysteme im Vergleich Version 10/2016*. In: (Okt. 2016). (Zugriff am 02. 10. 2023).
- [51] S. Klüh und F. Leismann. *Brandschutz in unterirdischen Verkehrsanlagen bei zunehmender E-Mobilität Erkenntnisse aus Brandversuchen, Nachweiskonzept für Brandbekämpfungsanlagen in Parkgaragen*. In: *Forschung + Praxis: U-Verkehr und unterirdisches Bauen*. STUVA-Tagung 2021 - Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur. 2021. URL: <https://trid.trb.org/view/2195133> (Zugriff am 02. 10. 2023).

- [52] A. Lajunen, J. Suomela, J. Pippuri, K. Tammi, T. Lehmuspelto und P. Sainio. *Electric and Hybrid Electric Non-Road Mobile Machinery – Present Situation and Future Trends*. In: World Electric Vehicle Journal 8.1 (25. März 2016), S. 172–183. ISSN: 2032-6653. DOI: 10.3390/wevj8010172. URL: <http://www.mdpi.com/2032-6653/8/1/172> (Zugriff am 02.10.2023).
- [53] LOK Report. *LOK Report - Dänemark/Deutschland: Erster Teil des Fehmarnbelt-Tunnels betoniert*. URL: <https://www.lok-report.de/news/europa/item/42547-daenemark-deutschland-erster-teil-des-fehmarnbelt-tunnels-betoniert.html> (Zugriff am 25.08.2023).
- [54] P.-M. Mayer, S. Wild, K. Usel und W. Friedemann. *Innovativer Einsatz von Industrierobotern in einer teilautomatisierten Tübbingproduktion*. In: Geomechanics and Tunnelling 16.2 (Apr. 2023), S. 205–215. ISSN: 1865-7362, 1865-7389. DOI: 10.1002/geot.202200076. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/geot.202200076> (Zugriff am 13.09.2023).
- [55] J. Ninić, H.-G. Bui und G. Meschke. *BIM-to-IGA: A fully automatic design-through-analysis workflow for segmented tunnel linings*. In: Adv. Eng. Informatics 46 (2020), S. 101137. DOI: 10.1016/j.aei.2020.101137. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/377b229b5a9e2c3f790a7f45d5667b3366e41746>.
- [56] A. Nowak. *Definition: ökologische Nachhaltigkeit*. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekologische-nachhaltigkeit-53450/version-276539> (Zugriff am 17.08.2023).
- [57] A. Nowak. *Definition: ökonomische Nachhaltigkeit*. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/oekonomische-nachhaltigkeit-53449> (Zugriff am 17.08.2023).
- [58] A. Nowak. *Definition: soziale Nachhaltigkeit*. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/soziale-nachhaltigkeit-53451> (Zugriff am 17.08.2023).
- [59] O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger, Dipl.-Ing. Marion Decker und Dipl.-Ing. Clemens Proksch-Weilguni. *Dünnwandiger und ressourceneffizienter Tübbing für den Tunnelbau*. Wien, 2022.
- [60] R. Obernosterer, L. Winkler, B. Lepuschitz, M. Weigert, H. Daxbeck, G. Goger, N. Hörzinger und N. Kisliakova. *Die CO₂ neutrale Baustelle – ein Beitrag zum Klimaschutz der österreichischen Bauwirtschaft*. Wien, 2021.
- [61] ÖGG. *Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit kontinuierlichem Vortrieb*. Forschungsber. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, 2013. 49 S.
- [62] ÖNORM B 1801-1: 2022-03-01. *ÖNORM B 1801-1: Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 14: Objekterrichtung*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [63] ÖNORM B 1801-2: 2011-04-01. *ÖNORM B 1801-2: Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 2: Objekt-Folgekosten*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [64] ÖNORM B 1801-4: 2014-04-01. *ÖNORM B 1801-4: Bauprojekt- und Objektmanagement – Teil 4: Berechnung von Lebenszykluskosten*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [65] ÖNORM B 2203-2: 2005-01-01. *ÖNORM B 2203-2: Untertagebauarbeiten – Werkvertragsnorm – Teil 2: Kontinuierlicher Vortrieb*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [66] ÖNORM B 4710: 2018-01-01. *ÖNORM B 4710: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität*. Austrian Standards Institute. Wien.

- [67] ÖNORM EN 15978 – 1: 2021-10-01. *ÖNORM EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden – Teil 1: Umweltqualität*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [68] ÖNORM EN 15804: 2022-02-15. *ÖNORM EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktedeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [69] ÖNORM EN 16309: 2014-11-15. *ÖNORM EN 16309: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der sozialen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethoden*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [70] ÖNORM EN 1991-1-7: 2014-09-01. *ÖNORM EN 1991-1-7: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [71] ÖNORM EN 1992-1-1: 2015-02-15. *ÖNORM EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [72] ÖNORM EN ISO 14040: 2021-03-01. *ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [73] ÖNORM EN ISO 14044: 2021-03-01. *ÖNORM EN ISO 14044: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Austrian Standards Institute. Wien.
- [74] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. *Richtlinie Schildvortrieb*. Forschungsber. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009. 87 S.
- [75] Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik. *Richtlinie Tübbingsysteme aus Beton*. Forschungsber. Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009. 111 S.
- [76] B. Panko. *World's Largest Carbon Capture Plant Opens in Iceland*. Smithsonian Magazine. Section: Smart News, Smart News Science. URL: <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/worlds-largest-carbon-capture-plant-opens-iceland-180978620/> (Zugriff am 18.09.2023).
- [77] J. Peeling, M. Wayman, I. Mocanu, P. Nitsche, J. Rands und J. Potter. *Energy efficient tunnel solutions*. In: *Transportation Research Procedia* 14 (2016). Publisher: Elsevier, S. 1472–1481.
- [78] D. N. Petraroia, M. A. Ahrens und P. Mark. *Materialeffiziente Tübbings mit Hybridbewehrung – Entwurf, Herstellung und Bauteilexperimente*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 118.2 (Feb. 2023), S. 98–109. ISSN: 0005-9900, 1437-1006. DOI: 10.1002/best.202200100. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/best.202200100> (Zugriff am 12.10.2023).
- [79] PORR. *Annual and Sustainability Report 2022*. Wien, 2022.
- [80] M. Püstow, T. Göhlert, J. Gielen, J. Tenner und E. Pawelczyk. *Klimaverträglich bauen mit einem Schattenpreis für CO₂-Emissionen*. Germany, 2023.
- [81] S. Resch, C. Sauer, W. Purrer, U. Eder, T. Krones, T. Longin, A. Makovec und R. Stempkowski. *Der Weg zum lebenszyklusorientierten Infrastrukturbau*. 2. Auflage. Wien: IG LEBENSZYKLUS BAU, 2017. URL: https://ig-lebenszyklus.at/wp-content/uploads/2021/05/LEITFADEN_Infrastrukturbau.pdf.

- [82] M. Roeb, S. Brendelberger, A. Rosenstiel, C. Agrafiotis, N. Monnerie, V. Budama und N. Jacobs. *Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende Teil 1: Technologien und Perspektiven für eine nachhaltige und ökonomische Wasserstoffversorgung*. DLR, Institut für Solarforschung, Sep. 2020. URL: <https://elib.dlr.de/137796/>.
- [83] J. Sauer. *Ökologische Betrachtungen zur Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken der Verkehrsinfrastruktur*. Dissertation. Technical University of Graz, 2016.
- [84] H.-H. Schmidt, R. F. Buchmaier und C. Vogt-Breyer. *Bauen im Grundwasser*. In: *Grundlagen der Geotechnik: Geotechnik nach Eurocode*. Hrsg. von H.-H. Schmidt, R. F. Buchmaier und C. Vogt-Breyer. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014, S. 635–683. ISBN: 978-3-8348-2141-6. DOI: 10.1007/978-3-8348-2141-6_22. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2141-6_22 (Zugriff am 28.08.2023).
- [85] Schöma. *Tunnellokomotiven*. URL: <https://www.schoema.de/de/lokomotiven/produkte/tunnellokomotiven/> (Zugriff am 10.11.2023).
- [86] L. Sierra, V. Yepes und E. Pellicer. *A review of multi-criteria assessment of the social sustainability of infrastructures*. In: *Journal of Cleaner Production* (2018), null. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.022. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/750d38734429753b34c7d0b2500221f518a8b910>.
- [87] STRABAG. *Annual Report 2022*. Wien, 2022.
- [88] STRABAG. *Kennzahlen zu den Energieverbräuchen*. E-mail. 11. Dez. 2023.
- [89] STUVA. *Empfehlung für Dichtungsrahmen in Tübbingauskleidungen*. In: ().
- [90] SWIETELSKY. *Nachhaltigkeits Bericht 2020/21*. Wien, 2021.
- [91] Testfuchs. *H2Genset - mobile Energieversorgung mit Wasserstoff*. H2 Genset. URL: <https://www.h2-genset.com/> (Zugriff am 18.09.2023).
- [92] *Twenty years of FRC Tunnel Segments Practice*. URL: <https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/1357/twenty-years-of-frc-tunnel-segments-practice> (Zugriff am 29.11.2023).
- [93] Umweltbundesamt. *Treibhausgase*. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/klima/treibhausgase> (Zugriff am 24.08.2023).
- [94] United Nations. *AGENDA 21*. In: *United Nations Conference on Environment & Development*. Rio de Janeiro, 1992, S. 352. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>.
- [95] United Nations. *SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS REPORT 2022*. OCLC: 1342622875. S.l.: UNITED NATIONS, 2022. ISBN: 978-92-1-101448-8.
- [96] United Nations. *The Paris Agreement*. In: (). URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
- [97] United Nations Environment Programme. *2022 Global Status Report for Buildings and Construction*. 2022, S. 101. URL: 978-92-807-3984-8.
- [98] S. Vaz, A. P. Rodrigues de Souza und B. E. Lobo Baeta. *Technologies for carbon dioxide capture: A review applied to energy sectors*. In: *Cleaner Engineering and Technology* 8 (1. Juni 2022), S. 100456. ISSN: 2666-7908. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100456. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822000611> (Zugriff am 13.09.2023).

- [99] Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie. *Innovation - VÖZ Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie*. URL: <https://www.zement.at/innovation> (Zugriff am 01.10.2023).
- [100] K. Voit und E. Kuschel. *Rock Material Recycling in Tunnel Engineering*. In: Applied Sciences null (2020), null. DOI: 10.3390/app10082722. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/524ddd2181eaceae845e86a55e45eda69aaff1>.
- [101] K. Voit, R. Murr, T. Cordes, O. Zeman und K. Bergmeister. *Tunnel spoil recycling for concrete production at the Brenner Base tunnel in Austria*. In: Structural Concrete 21 (2020), S. 2795–2809. DOI: 10.1002/suco.202000434. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/0911d529861703edbd39f9274da05117c5fd2ed8>.
- [102] K. Voit, O. Zeman, I. Janotka, R. Adamcova und K. Bergmeister. *High-durability concrete using eco-friendly slag-pozzolan cements and recycled aggregate*. In: Applied Sciences 10.22 (2020). Publisher: MDPI, S. 8307.
- [103] K. Waaghals, J. C. Pereira et al. *Global Catastrophic Risks 2022: a year of colliding consequences*. In: (2022).
- [104] G. Waldl und F. Papsch. *Roadmap zur CO₂-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050*. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 167.8 (Aug. 2022), S. 342–348. ISSN: 0005-8912, 1613-7531. DOI: 10.1007/s00501-022-01253-z. URL: <https://link.springer.com/10.1007/s00501-022-01253-z> (Zugriff am 13.09.2023).
- [105] *Webseite openLCA*. URL: <https://www.openlca.org/> (Zugriff am 21.01.2024).

Abbildungsverzeichnis

2.1	Nachhaltige Entwicklungsziele (SDGs) der Agenda 2030 (Quelle: Bundeskanzleramt [12])	18
2.2	Beeinflussbarkeit der Lebenszykluskosten (Quelle: Resch et al. [81, S. 8])	22
2.3	Beispiel eines Netzdiagramms zur Bewertung von Infrastruktur	23
2.4	Kernnetz-Korridore durch Österreich (Quelle: BMK [6, S. 6])	24
2.5	Ausbauübersicht der Tunnelkilometer in Österreich (Quelle: Brill [10] und BMK [4, S. 12])	25
2.6	Emissionen, der österreichischen Industriegütererzeugung (Quelle: modifiziert nach Diendorfer et al. [18, 14 ff.])	26
2.7	Übersicht Tunnelbauweisen	27
2.8	Unterschiede Tunnelausbau – NÖT und historische Bauweisen (Quelle: Adam [1, S. 76])	28
2.9	Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen (Quelle: modifiziert nach DAUB [15, S. 11])	31
2.10	Arbeitsbereiche einer SM mit Flüssigkeitsstützung (Quelle: ÖNORM B 2203-2 [65])	32
2.11	Übersicht der Lebenszyklusphasen und Module (Quelle: <i>ÖNORM EN 15978</i> [67])	34
2.12	Schritte zur Vermeidung, Verringerung und Kompensation von CO ₂ (Quelle: modifiziert nach Obernosterer et al. [60, S. 45])	35
2.13	Entwicklung der eingesetzten Zemente (Quelle: modifiziert nach Walndl und Papsch [104, S. 4])	37
a	Derzeitige Verteilung der Zemente	37
b	Zukünftige Verteilung der Zemente	37
2.14	Tübbingroboter der Firma Herrenknecht beim Schalen (Quelle: Englert [20]) . .	39
2.15	Energieverbrauch der Asfinag (Quelle: modifiziert nach ASFINAG [2])	40
2.16	Tübbinge als geothermische Elemente (Quelle: Barla et al. [3, S. 3])	41
2.17	Anzahl der Eisenbahntunnel im jeweiligen Zustand (Quelle: modifiziert nach Brill [10])	42
2.18	CO ₂ Bewertungsschritte des Taxonomie-konformen Unternehmensumsatz (Quelle: Friedrich und Wendland [27, S. 16])	46
2.19	Zuteilung der Maßnahmen nach Lebenszyklusphase bzw. - modul und den drei Säulen der Nachhaltigkeit	47
3.1	Gliederung der Tübbinge nach Ebenheit der Ringfuge und Geometrie (Quelle: DAUB [16, S. 8])	53
3.2	Vergleich Bewehrung eines Tübbings mit Stabstahl (links) und Faserbeton (rechts) (Quelle: DAUB [16, S. 31])	57
3.3	Übersicht der Fugen bei Tübbingsystem (Quelle: STUVA [89, S. 7])	58
3.4	Fugenformen bei Tübbingen (Quelle: modifiziert nach Hausmann [37, S. 34]) . . .	59
3.5	Dichtungssysteme bei Tübbingen (Quelle: modifiziert nach Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik [75, S. 48] und STUVA [89, S. 11])	60
3.6	Transportgeräte für Tübbinge	63
a	Tunnellokomotive (Quelle: Schöma [85])	63

b	MSV (Quelle: Herrenknecht [39])	63
3.7	Darstellung des Schildes mit Ringspalt und Schildschwanzdichtung (Quelle: modifiziert nach Hausmann [37, 24 ff.])	64
3.8	Vergleich der Bewehrungskonzepte konventionell und RET (Quelle: O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al. [59, 1 f.])	67
a	Konventionelle Bewehrung von Tübbing	67
b	Ressourceneffizientes Bewehrungskonzept der TU Wien	67
4.1	Darstellung der zusätzlichen Längsfugenbewehrung	76
a	Herkömmliche Variante	76
b	Variante 1 und 1.1	76
c	Variante 1a	76
d	Variante 2 und 2.1	76
e	Variante 2a	76
4.2	Darstellung der funktionalen Systemgrenzen im Tunnelquerschnitt	78
4.3	Darstellung der Systemgrenzen und der Prozesse	79
4.4	Sensitivitätsanalyse von Beton und Zement	85
a	Beton	85
b	Zement	85
4.5	Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Ringspaltrezepturen	87
4.6	Sensitivitätsanalyse von Bewehrungsstahl und Stahlarbeiten	88
a	Bewehrungsstahl	88
b	Legierter Stahl	88
c	Stahlbearbeitung	88
4.7	Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Energieträger	89
a	Strom	89
b	Diesel	89
c	Gas	89
4.8	Vergleich der Tunnelquerschnitte für die Wirkungskategorie Klimawandel – Mittelwert für Europa	90
4.9	Aufteilung der GWP-Emissionen nach Lebenszyklusmodulen	91
4.10	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Herkömmliche Variante	93
4.11	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 1	93
4.12	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 1.1	94
4.13	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 1a	94
4.14	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 2	95
4.15	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 2.1	95
4.16	Relative Aufteilung der CO ₂ -Äq. – Variante 2a	96
4.17	Vergleich der Tunnelquerschnitte für die Wirkungskategorie Ressourceneinsatz	97
4.18	Aufteilung des Energiebedarfs nach Energiequellen	97
4.19	Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für Österreich	99
4.20	Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für die Schweiz	100
4.21	Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte für Deutschland	101
4.22	Sensitivitätsprüfung der Tunnelquerschnitte – Vergleich	101
5.1	Tunnel 45 – Herkömmlicher Tunnelquerschnitt	105
a	Variante 1 bzw. Variante 1.1	105
b	Variante 1a	105

5.2	Tunnel 35 und Tunnel 35 l – eingesetzte Tunnelquerschnitte	105
a	Variante 2 bzw. Variante 2.1	105
b	Variante 2a	105
5.3	Tunnel 30 und Tunnel 30 l – eingesetzte Tunnelquerschnitte	105
5.4	Relatives und absolutes Einsparungspotential der Tunnelvarianten	106
6.1	Prozentuale Verteilung der Anteile in Bezug auf die CO ₂ -Äq.-Emissionen	115
A.1	Berechnungen für die Sachbilanz	134

Tabellenverzeichnis

2.1	Beispiele für Indikatoren und Parameter (Quelle: modifiziert nach <i>ÖNORM EN 15804</i> [68, 45 ff.]	21
2.2	Zusammensetzung der Zementsorten CEM II/B-M, CEM II/C-M und CEM VI (S-L) (Quelle: modifiziert nach Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie [99])	37
3.1	Einwirkungen auf Tübbinge (Quelle: modifiziert nach Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik [75, 12 ff.]	55
3.2	Vergleich der verschiedenen Tübbinge (Quelle: O. Univ. Prof. Dr.-Ing. Johann Kollegger et al. [59, S. 4])	66
4.1	Beschreibung der betrachteten Varianten	72
4.2	Kennzahlen zur zusätzlichen Längsbewehrung	75
4.3	Anteile der Prozesse und Materialien an den Gesamtemissionen aus CO ₂ für die betrachteten Varianten	80
4.4	Betonvolumina zur Berechnung der Ökobilanz	81
4.5	Energiebedarf der Mischanlage zur Berechnung der Ökobilanz	82
4.6	Energiebedarf der Wärmebehandlung zur Berechnung der Ökobilanz	82
4.7	Bewehrungsstahl zur Berechnung der Ökobilanz	83
4.8	Stahlbedarf zur Berechnung der Ökobilanz	83
4.9	Zementmenge zur Berechnung der Ökobilanz	83
4.10	Energiebedarf der TVA zur Berechnung der Ökobilanz	84
4.11	Verwendete Indikatoren und Parameter (Quelle: modifiziert nach <i>ÖNORM EN 15804</i> [68, 45 ff.]	84
4.12	Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Ringspaltrezepturen	86
4.13	Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen	89
4.14	Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Österreich	98
4.15	Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Schweiz	98
4.16	Geänderte Datensätze und dazugehörige Werte – Deutschland	99
4.17	Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen	102
5.1	Ausbruch – Einsparungspotentiale	104
5.2	Ergebnisse des Vergleichs – Tunnel 45, 35 und 30	107
5.3	Ergebnisse des Vergleichs – Tunnel 45, 35 l und 30 l	108
6.1	Vergleich der Querschnitte anhand der GWP-Emissionen	117
6.2	Ergebnisse des Vergleichs – unterschiedliche Tunnelvarianten	117
B.1	Angesetzte CO ₂ -Äq.-Werte	136

Anhang A

Berechnungen zur Sachbilanz

In Abb. A.1 sind die für die Ermittlung Eingangsdaten der Ökobilanz relevanten Berechnungsschritte abgebildet.

Eingabe								
Ergebniswert für Programm								
Die angeführten Ergebniswerte beziehen sich auf die funktionale Einheit 1m Tunnel!								
Querschnitt:								
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
	[m]	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
	[m]	10	9,8	9,8	9,8	9,7	9,7	9,7
Stärke Tübbing:	[m]	0,45	0,35	0,35	0,35	0,3	0,3	0,3
Stärke Ringspalt:	[m]	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185	0,185
Ausbruchquerschnitt:	[m²]	84,48	81,23	81,23	81,23	79,64	79,64	79,64
Beton:								
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Bewehrter Beton	[m³]	13,50	10,39	10,39	10,39	8,88	8,88	8,88
Zusatzbewehrung	[m³]		0,0803	0,0803		0,1003	0,1003	
Bewehrter Beton abzgl. Zusatzbewehrung	[m³]	13,50	10,31	10,31	10,39	8,78	8,78	8,88
Mischanlage:								
Verbrauch:	[kWh/m³]	30						
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Zu mischendes Betonvolumen	[m³]	13,50	10,31	10,31	10,39	8,78	8,78	8,88
Benötigte Energie	[kWh]	405,03	309,32	309,32	311,72	262,77	262,77	265,78
Wärmebehandlung:								
Verbrauch:	[kWh/m³]	25						
Ummrechnung kWh in MJ		1 kWh	=		3,6 MJ			
Energiedichte Gas		1 m³	=		40 MJ			
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Zu behandelndes Volumen	[m³]	13,50	10,39	10,39	10,39	8,88	8,88	8,88
Benötigte Gasmenge	[m³]	30,38	23,38	23,38	23,38	19,93	19,93	19,93
Bewehrung:								
Bewehrungsgrad herköm. Bewehrung	[kg/m³]	80						
Dichte Stahl	[kg/m³]	7850						
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Zu bewahrendes Volumen	[m³]	13,50	10,39	10,39	10,39	8,88	8,88	8,88
Benötigte Stahlmenge- herköm. Bewehr.	[kg]	1080,08	831,27	831,27	831,27	708,74	708,74	708,74
gewählter Durchmesser Zusatzbewehrung	[mm]		0,028	0,028		0,028	0,028	
Anzahl der Stäbe pro Fuge	[Stk]		24	24		30	30	
Zusätzliche Stahlfäche pro Fuge	[m²]		0,0127	0,0127		0,0159	0,0159	
Verankerungslänge	[m]		0,9	0,9		0,9	0,9	
Volumen Stahl pro Meter Tunnel	[m³]		0,0803	0,0803		0,1003	0,1003	
Stahlmenge	[kg]		630,17	630,17		787,71	787,71	
Ringspalt:								
Menge Zement	[kg/m³]	150						
Ringspaltstärke	[m]	0,185						
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Ringspaltvolumen	[m³]	5,92	5,80	5,80	5,80	5,75	5,75	5,75
Zementmenge	[kg]	887,92	870,48	870,48	870,48	861,77	861,77	861,77
Tunnelvortriebsanlage:								
Stromverbrauch	[kWh/m³]	150						
Dieselverbrauch	[l/m³]	1,5						
		Her. Var.	Var. 1	Var 1.1	Var. 1a	Var. 2	Var. 2.1	Var. 2a
Ausbruchquerschnitt	[m²]	84,48	81,23	81,23	81,23	79,64	79,64	79,64
Stromverbrauch	[kWh]	12668,89	12184,93	12184,93	12184,93	11946,48	11946,48	11946,48
Dieselverbrauch	[l]	126,69	121,85	121,85	121,85	119,46	119,46	119,46

Abb. A.1: Berechnungen für die Sachbilanz

Anhang B

Angesetzte Werte – Sensitivitätsanalyse

Tab. B.1: Angesetzte CO₂-Äq.-Werte

Europa	
Beton	365,83 kg CO ₂ -Äq./m ³
Bewehrungsstahl	2334,60 kg CO ₂ -Äq./t
Diesel	3,56 kg CO ₂ -Äq./l
Erdgas	0,9553 kg CO ₂ -Äq./m ³
Legierter Stahl	682 kg CO ₂ -Äq./t
Stahlbearbeitung	1659 kg CO ₂ -Äq./t
Strom	0,44 kg CO ₂ -Äq./kWh
Zement	0,862 kg CO ₂ -Äq./kg
Österreich	
Beton	329 kg CO ₂ -Äq./m ³
Bewehrungsstahl	555 kg CO ₂ -Äq./t
Diesel	3,56 kg CO ₂ -Äq./l
Erdgas	0,784 kg CO ₂ -Äq./m ³
Legierter Stahl	463 kg CO ₂ -Äq./t
Stahlbearbeitung	1659 kg CO ₂ -Äq./t
Strom	0,14 kg CO ₂ -Äq./kWh
Zement	0,862 kg CO ₂ -Äq./kg
Schweiz	
Beton	329 kg CO ₂ -Äq./m ³
Bewehrungsstahl	555 kg CO ₂ -Äq./t
Diesel	3,56 kg CO ₂ -Äq./l
Erdgas	0,645 kg CO ₂ -Äq./m ³
Legierter Stahl	537 kg CO ₂ -Äq./t
Stahlbearbeitung	1659 kg CO ₂ -Äq./t
Strom	0,012 kg CO ₂ -Äq./kWh
Zement	0,742 kg CO ₂ -Äq./kg
Deutschland	
Beton	329 kg CO ₂ -Äq./m ³
Bewehrungsstahl	555 kg CO ₂ -Äq./t
Diesel	3,56 kg CO ₂ -Äq./l
Erdgas	0,577 kg CO ₂ -Äq./m ³
Legierter Stahl	682 kg CO ₂ -Äq./t
Stahlbearbeitung	1659 kg CO ₂ -Äq./t
Strom	0,49 kg CO ₂ -Äq./kWh
Zement	0,862 kg CO ₂ -Äq./kg