

Nachhaltigkeit im zyklischen Tunnelbau

Eine LCA-basierte Untersuchung österreichischer Verkehrsinfrastrukturtunnel

Felix Noldin, BSc

Betreuer/in: assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser

Arbeitsbereich für Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Universität Innsbruck

ibt@uibk.ac.at | www.uibk.ac.at/ibt

KURZFASSUNG: Im Rahmen dieser Masterarbeit wird eine ökobilanzielle Untersuchung des zyklischen Tunnelbaus nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT) durchgeführt, um fehlende Umweltkennwerte für österreichische Verkehrsinfrastrukturtunnel zu ergänzen. Auf Basis der Analyse der Lebenszyklusphasen A1–A5 werden Umwelt-Benchmarkwerte für verschiedene Tunneltypen abgeleitet und wesentliche material- und prozessbezogene Optimierungspotenziale aufgezeigt. Die Ergebnisse schaffen eine Grundlage für eine vereinfachte Nachhaltigkeitsbewertung und eine lebenszyklusbasierte Entscheidungsunterstützung in frühen Projektphasen.

Vollständige Arbeit: www.uibk.ac.at/ibt/lehre/abgeschlossene-masterarbeiten/

SCHLAGWORTE: Tunnelbau, Zyklischer Tunnelbau, Neue Österreichische Tunnelbauweise, Ökobilanz, Nachhaltigkeit

1 EINLEITUNG

Das Nachhaltigkeitsergebnis von Verkehrsinfrastrukturprojekten wird maßgeblich in den frühen Projektphasen geprägt. Insbesondere trassierungs- und planungstechnische Entscheidungen hinsichtlich der Lage und Ausführung von Verkehrsstrassen oder Tunnelbauwerken beeinflussen den erforderlichen Materialeinsatz, die Bau- und Vortriebsprozesse sowie die Instandhaltungsaufwände über den gesamten Lebenszyklus. Da der Verkehrssektor für rund 30 % der nationalen Treibhausgasemissionen (THG) in Österreich verantwortlich ist und mehr als die Hälfte des jährlichen inländischen Materialverbrauchs von rund 143 Millionen Tonnen auf das Bauwesen entfällt, stellt der Tunnelbau mit einem geschätzten Anteil von etwa 4,2 % an den nationalen THG-Emissionen einen bedeutenden Ansatzpunkt zur Reduktion von Umweltwirkungen dar [1, 2].

Die frühzeitige Integration von Nachhaltigkeitsbewertungen wird in der Praxis jedoch durch die hohe Komplexität des Tunnelbaus, geotechnische Unsicherheiten sowie eine bislang begrenzte Verfügbarkeit anwendbarer und repräsentativer Datengrundlagen für österreichische Randbedingungen erschwert.

2 ZIELSETZUNG UND METHODIK

Die vorliegende Masterarbeit schließt diese Forschungslücke durch eine ökobilanzielle Analyse des zyklischen Tunnelbaus nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise (NÖT). Ziel ist die Entwicklung von Umwelt-Benchmarkwerten für österreichische Verkehrsinfrastrukturtunnel, um eine vereinfachte lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsbewertung in frühen Projektphasen zu ermöglichen.

Zur Durchführung einer repräsentativen Bewertung wurden gemittelte Parameter für Bauprozesse, Bau- und Hilfsstoffe sowie Logistikketten verwendet. Da in frühen Projektphasen häufig keine detaillierten geologischen Informationen vorliegen, wurden die geotechnischen Randbedingungen vereinfacht in die drei Kategorien „schwer lösbar“, „mittel lösbar“ und „leicht lösbar“ eingeteilt. Die Kategorisierung basiert auf der matrixbasierten Einteilung der Vortriebsklassen gemäß ÖNORM B 2203-1 und bildet unterschiedliche Anforderungen an Ausbruch, Stützmaßnahmen und Innenschale ab.

Untersucht wurden typische österreichische Verkehrsinfrastrukturtunnel mit folgenden Querschnitten:

- zweigleisige und eingleisige Eisenbahntunnel,
- zweispurige und einspurige Straßentunnel,
- begehbarer sowie mit Einsatzfahrzeugen befahrbare Querschläge.

Die Bewertung erfolgte gemäß ÖNORM EN 17472 und umfasst die Lebenszyklusmodule A1–A5. Betrachtet wurden sämtliche wesentlichen Tunnelbauaktivitäten Vortriebs bis zur Herstellung der Innenschale sowie die zugehörigen Transporte, Energie- und Entsorgungsprozesse.

Der permanente Materialeinsatz des späteren Bauwerks wird der Materialherstellungsphase A1–A3 zugeordnet, während die Transporte dieser Materialien zur Baustelle in der Transportphase A4 berücksichtigt werden [3]. Temporäre Materialien, Hilfsstoffe sowie prozessbedingte Energieverbräuche und dazugehörige Transporte werden der Errichtungsphase A5 zugeordnet. Zusätzlich werden innerhalb von A5 die baustellenseitige Energieversorgung durch Beleuchtung und Bewetterung, der Betrieb der eingesetzten Tunnelbaugeräte, deren Mobilisierung und Demobilisierung sowie die Deponierung des Ausbruchmaterials abgebildet (siehe Abb. 2-1).

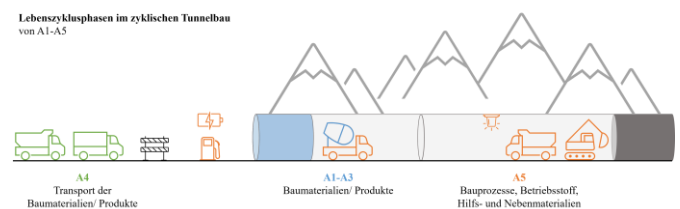


Abb. 2-1: Lebenszyklusphasen im zyklischen Tunnelbau

3 ERGEBNISSE

Die Ergebnisse zeigen, dass insbesondere die Materialherstellung (A1–A3) und die Errichtungsphase (A5) die maßgeblichen Beiträge zu den Umweltwirkungen des Tunnelbaus darstellen. Die Verteilung wird dabei wesentlich durch die geologischen Randbedingungen und den jeweiligen Tunnelquerschnitt beeinflusst. Im Mittel entfallen etwa 56 ÷ 73 % der ökologischen Auswirkungen auf die Materialherstellung, während

die Errichtungsphase 25 ÷ 42 % beiträgt. Die Transportphase (A4) weist mit etwa 1 ÷ 3 % hingegen nur einen untergeordneten Anteil auf.

Mit zunehmender geotechnischer Herausforderung steigen der erforderliche Ausbruchaufwand, der Umfang der Sicherungsmaßnahmen sowie die benötigten Betonkubaturen der Innenschale (vgl. Abb. 3-1). Als größter Einzelverursacher erweist sich die Innenschale, welche mit etwa 40 ÷ 52 % des gesamten Treibhauspotenzials (GWP-gesamt) über die betrachteten Lebenszyklusphasen den dominierenden Beitrag liefert. Maßgeblich hierfür sind insbesondere die großen Mengen an Konstruktionsbeton sowie der erforderliche Stahlanteil bei anspruchsvolleren geologischen Bedingungen.

GWP-gesamt [t CO ₂ -Äq.] pro Meter Tunnel je Geologie und Tunnelart				
Bahntunnel				
schwer lösbar		9,7		7,5
mittel lösbar		14,0		10,3
leicht lösbar		19,6		13,7
Mittelwert		14,4		10,5
Straßentunnel				
schwer lösbar		9,6		7,4
mittel lösbar		13,8		10,2
leicht lösbar		19,4		13,6
Mittelwert		14,3		10,4
Querschläge				
schwer lösbar		5,3		3,2
mittel lösbar		6,6		4,5
leicht lösbar		7,8		5,5
Mittelwert		6,6		4,4

Abb. 3-1: Ergebnisse GWP-gesamt je Geologie und Tunnelart

Zusätzlich stellt der Spritzbeton der Sicherungsmaßnahmen einen wesentlichen Einflussfaktor dar, insbesondere bei leicht lösbaren Geologien aufgrund des erhöhten Sicherheitsbedarfs. Die Analyse der Ausbruchprozesse zeigt zudem, dass die Umweltwirkungen je nach Vortriebsmethode durch unterschiedliche Faktoren geprägt werden: Während beim Sprengvortrieb insbesondere Dieselverbrauch und Sprengstoffe relevant sind, wird der Baggervortrieb stärker durch den Energiebedarf der eingesetzten Geräte beeinflusst.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass vor allem material- und prozessbezogene Optimierungen, wie optimierte Betonrezepturen sowie eine verbesserte Nutzung von Ausbruchmaterial, wesentliche Potenziale zur Verringerung der Umweltwirkungen bieten [4, 5]. Die ermittelten Benchmarkwerte für die untersuchten Tunneltypen ermöglichen eine vergleichende Bewertung unterschiedlicher Verkehrsinfrastrukturtunnel unter österreichischen Randbedingungen.

4 FAZIT

Die Ergebnisse der Masterarbeit verdeutlichen, dass eine frühzeitige ökobilanzielle Bewertung einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Planung von Verkehrsinfrastrukturtunnelbauwerken leisten kann. Die entwickelten Werte schaffen eine praxisnahe Grundlage, um Umweltwirkungen bereits in frühen Projektphasen abzuschätzen und unterschiedliche Planungsvarianten hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit zu vergleichen.

Durch die systematische Betrachtung verschiedener Tunneltypen und geotechnischer Randbedingungen konnte gezeigt werden, dass die ökologische Bewertung von Tunnelbauwerken stark von den projektspezifischen Rahmenbedingungen abhängt. Die ermittelten Kennwerte ermöglichen eine vereinfachte Einordnung zukünftiger Projekte und unterstützen eine

lebenszyklusorientierte Entscheidungsfindung im österreichischen Tunnelbau.

Gleichzeitig zeigt die Untersuchung, dass für eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung weitere Aspekte über die reine Bauwerksherstellung (A1–A5) hinaus berücksichtigt werden sollten. Die Ergebnisse bilden damit eine Grundlage für weiterführende Analysen und zukünftige Optimierungen im Bereich des nachhaltigen Tunnelbaus.

5 AUSBLICK

Zukünftige Untersuchungen sollten die Betrachtung auf weitere Lebenszyklusphasen wie Betrieb, Instandhaltung und Rückbau erweitern, um eine ganzheitliche Bewertung der Tunnelinfrastruktur zu ermöglichen. Zusätzlich sollte für eine vollständige ökologische Erfassung des Verkehrsinfrastrukturprojekts die Modellierung um den Straßen- bzw. Bahnoberbau sowie die technische Ausrüstung des Tunnels ergänzt werden. Dadurch kann der gesamte Lebenszyklus einer Verkehrsanlage abgebildet und die Wechselwirkungen zwischen Bauwerk, Betrieb und Nutzung umfassender bewertet werden. Darüber hinaus bieten Materialkreisläufe durch die Wiederverwendung von Ausbruchmaterial sowie die Material- und Prozessoptimierung (z. B. klinkerreduzierte Betonrezepturen) wesentliche Ansätze zur Reduktion der Umweltwirkungen.

Für eine praxisnahe Anwendung ist eine weitere Automatisierung der Ökobilanzierung und die Verknüpfung mit digitalen Modellen anzustreben. Die Kombination von Umweltwirkungen und Lebenszykluskosten (LCA und LCC) stellt dabei weiters einen wichtigen zukünftigen Ansatz dar, um nachhaltige Tunnelbauwerke im Einklang mit zukünftigen Anforderungen der europäischen Nachhaltigkeitsbewertung zu planen.

6 QUELLEN

- [1] M. Anderl, A. Bartel, A. Buchmayr, et al., "Klimaschutzbericht 2025", Umweltbundesamt, Wien, 2025.
- [2] *Kreislaufwirtschaft: Baubranche spielt Schlüsselrolle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news260429-kreislaufwirtschaft-baubranche> (Zugriff am: 4. Mai 2026)
- [3] L. Hausberger, S. Auderer, A. Häberlein, et al., "Nachhaltigkeitsbewertung des zyklischen Tunnelvortriebs: Analyse und Ergebnisse", *Geomechanics and Tunneling*, akzeptiert zur Veröffentlichung, in Druck (in press), 2026.
- [4] W. Aldrian, A. Bantle und J. Juhart, "CO₂-Reduktion im Tunnelbau aus materialtechnologischer Sicht", Jg. 15, Nr. 6, S. 799–810, 2022, doi: 10.1002/geot.202200036
- [5] K. Voit, J. Hron und K. Bergmeister, "Das Potenzial rezyklierter Gesteinskörnungen: Für einen nachhaltigen Betonbau", *The Journal of OIAV*, Jg. 2022, 167. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oiaav.at/wp-content/uploads/2022/12/018_voit_hron_bergmeister.pdf