

Ökobilanz von Eisenbahn-Hochleistungsinfrastrukturen

Analyse von Oberbauten im Tunnel und auf freier Strecke

Lukas Hausberger, BSc

Innsbruck, Juni 2022

Masterarbeit

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

Diplomingenieur

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

Über Antrag der Studierenden wurde der Ausschluss der Benützung der Masterarbeit gemäß § 86 Abs. 4 UG bis zum 1. Jänner 2020 genehmigt.

Beurteiler/in:

assoz. Prof. DI. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Betreuer/in:

assoz. Prof. DI. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser,
Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften
Arbeitsbereich Baumanagement, Baubetrieb und Tunnelbau

Danksagung

Aufgrund der projektspezifischen Themenstellung ist es unumgänglich mit Partnern zusammenzuarbeiten bzw. wäre eine Bearbeitung des Themas schlichtweg nicht möglich.

Im Zuge der Bearbeitung durfte ich dankenswerterweise auf die Expertise einiger Firmen, Institutionen bzw. Organisationen zurückgreifen, denen ich auf diesem Wege danken möchte.

Mein Dank geht an die Brenner Basistunnel SE betreut durch Dr. Dipl.-Ing. Tobias Cordes und an Herr Dipl.-Ing. Roland Fischer und Herr Dipl.-Ing. Dominik Lumetzberger von der ÖBB Infrastruktur AG. Die Herren hatten mich stets mit Ihrem Fachwissen tatkräftig unterstützt und es mir ermöglicht, an die entsprechend benötigten Plandarstellungen bzw. etwaigen eisenbahnspezifischen Informationen zu gelangen. Zudem möchte ich mich bei Dr. Dipl.-Ing. Tobias Cordes für die Ermöglichung der Bearbeitung dieses Themas am Brenner Korridor und im Zuge des Baues des Brenner Basistunnels bedanken.

Danken möchte ich auch den Oberbauherstellern, die mir für die Ökobilanzrechnung detaillierte Informationen über Ihre Produkte zur Verfügung gestellt haben. Zu nennen ist hier die MABA Fertigteilindustrie GmbH betreut von Dr. Dipl.-Ing. Gerhard Rinnhofer, die Leube Betonschwellen GmbH vertreten durch Mag. Heimo Berger und die Porr Bau GmbH – Slab Track Austria unterstützt von Dipl.-Ing. Johannes Fürst.

Ganz besonderer Dank gilt meinem Betreuer assoz. Prof. Dipl.-Ing. Dr. sc. ETHZ Florian Gschösser für die hilfreichen Anregungen und die fachlichen Beiträge. Außerdem möchte ich mich bei ihm für seine tolle und unkomplizierte Art bedanken, sowie sein bemerkenswertes Engagement in der Betreuung von Studierenden hervorheben.

Kurzfassung

Beinahe 25 % der Umweltverschmutzungen, gemessen am Indikator der globalen Treibhausemissionen, werden durch den Verkehr emittiert. Eine Veränderung im Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung scheint unumgänglich, sodass die 17 UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) bzw. die Ziele des Green Deals der EU-Kommission erreicht werden können. Die vorhandene Infrastruktur muss sich demnach auf lange Sicht zu einer nachhaltigen Verkehrsinfrastruktur wandeln. Die modernen Schienenverkehrssysteme und die entstehenden Transeuropäischen Verkehrsnetze (TEN-V) am Brenner Korridor bzw. europaweit leisten einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung einer zukunftssicheren und nachhaltig gebauten Umwelt. Jedoch stellen solche Vorhaben große Anforderungen an die Ingenieure*innen, den Bau, die verwendeten Materialien und die Instandhaltung. Deshalb sind fortlaufende Verbesserungen und Optimierungen von Konstruktionen, Materialien, Bau- und Instandhaltungsprozessen essentiell, um langfristig nachhaltig zu verkehren.

Diese Masterarbeit analysiert mittels einer Ökobilanzierung verschiedenste Oberbauten der Eisenbahn (Schotteroberbauten und eine Feste Fahrbahn) am Beispiel einer Hochleistungsinfrastruktur im Tunnel und auf der freien Strecke. Die Studie untersucht jegliche relevante Lebenszyklusphasen von der Herstellung (A1-A3) bis zur Entsorgung der Oberbaukomponenten in der Phase (C1-C4). Dabei finden etwaige Instandhaltungsprozesse und damit verbundene Modernisierungen in zwei verschiedenen Betrachtungszeiträumen (80 und 200 Jahre) ebenfalls Berücksichtigung. Zudem wurde zur besseren Abbildung von unterschiedlichen Streckenverhältnissen eine Variation von minimalen und maximalen Liegedauern durchgeführt.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass vor allem in der Nutzungsphase aus ökologischer Sicht Optimierungspotentiale vorhanden sind, da häufigere Modernisierungszyklen und damit verbundene Neuherstellungen von Oberbauelementen einen wesentlichen Anteil der gesamten Umweltwirkungen einnehmen. Die Umweltbelastungen könnten dahingehend reduziert werden, indem die Produkte, hin auf eine längere Liegedauer, optimiert werden und dadurch größere Instandhaltungsintervalle entstehen. Das Mehr an Umweltauswirkungen in der Herstellungsphase durch die Veränderungen der Konstruktionen wird längerfristig in der Nutzungsphase (B2-B5) kompensiert und würde gesamthaft Einsparungen mit sich bringen.

Abstract

Almost 25 % of the global environmental pollution, measured by the indicator of greenhouse gas emissions, is contributed by transport. A change in mobility behavior of the population seems inevitable that the 17 UN sustainable development goals (SDGs) or the goals of the EU commission's green deal can be achieved. Accordingly, the existing infrastructure must transform into a sustainable transport infrastructure in the long term. The modern railway transport systems and the emerging Trans-European Transport Network (TEN-T) at the Brenner-Corridor and across whole Europe, respectively, make a significant contribution to achieving a future-proof and sustainable built environment. However, such projects place great requirements on engineers, the construction, the materials used and the maintenance. Therefore, continuous improvements and optimizations of designs, materials, construction and maintenance processes are essential to achieve long term sustainability.

This master thesis analyzes different railway superstructures (ballasted track and slab track) with the method of lifecycle assessment (LCA) using a high-performance infrastructure in the tunnel and on the open track. The study investigates all relevant life cycle stages from production (A1-A3) to the disposal (C1-C4) (cradle to grave). Any maintenance processes and associated modernizations are in two different periods of observation (80 and 200 years) also taken into account. In addition, a variation of minimum and maximum lifetimes of the superstructure elements was carried out to reflect different track conditions.

The results showed that there are mostly environmental reduction potentials, particularly in the stage of use, since more frequent modernization cycles and the associated remanufacturing of superstructure elements account for a significant proportion of the total environmental impact. This environmental footprint could be reduced by optimizing the products for a longer lifetime which would result in longer maintenance intervals. The additional environmental effect in the manufacturing stage due to the changes in the structures will be compensated in the longer term in the modules B2-B5 and would result in overall savings.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Danksagung | 1 |
| Kurzfassung | 3 |
| Abstract | 5 |
| Inhaltsverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | XI |
| Tabellenverzeichnis | XVII |
| Abkürzungsverzeichnis | XIX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Anlass & Ziel dieser Untersuchung | 1 |
| 1.2 Bedeutung der Bahninfrastruktur für das Transportwesen..... | 3 |
| 1.3 Der Fahrweg – Oberbauten allgemein..... | 6 |
| 1.3.1 Der Schotteroberbau (SchO) | 8 |
| 1.3.2 Die Feste Fahrbahn (FF)..... | 11 |
| 1.3.3 Hinweis Oberbauten | 14 |
| 1.4 Exkurs: Entwicklung der Nachhaltigkeit..... | 15 |
| 1.5 Nachhaltigkeit – Bedeutung für das Bauwesen..... | 17 |
| 1.6 Nachhaltigkeitsbewertung nach CEN/TC 350 | 20 |
| 2 Die Ökobilanz | 25 |
| 2.1 Allgemein | 25 |
| 2.2 Phasen einer Ökobilanz (LCA)..... | 25 |
| 2.2.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens | 26 |
| 2.2.1.1 Funktionelle Einheit..... | 27 |
| 2.2.1.2 Produktsystem und Systemgrenzen | 27 |
| 2.2.2 Sachbilanz (LCI) | 28 |
| 2.2.3 Wirkungsabschätzung (LCIA)..... | 29 |
| 2.2.4 Auswertung | 30 |
| 3 Untersuchte Oberbauten | 33 |
| 3.1 Schotteroberbauten | 33 |
| 3.1.1 Analyse 1: Betonschwelle K1 | 33 |
| 3.1.2 Analyse 2: Betonschwelle L2..... | 34 |
| 3.1.3 Analyse 3: Betonschwelle L17 | 35 |
| 3.2 Feste Fahrbahn..... | 36 |
| 3.2.1 Analyse 4: Slab Track Austria ÖBB-Porr | 36 |
| 3.3 Weitere Komponenten..... | 36 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3.1 | Schienen..... | 36 |
| 3.3.2 | Schienenbefestigungen | 37 |
| 3.3.2.1 | System Vossloh W14 | 37 |
| 3.3.2.2 | System Vossloh W300-1..... | 38 |
| 3.3.3 | Schwellenbesohlung | 39 |
| 4 | Ökobilanz an ausgewählten Oberbauten am BBT | 41 |
| 4.1 | Zieldefinition..... | 41 |
| 4.2 | Funktionelle Einheit..... | 41 |
| 4.3 | Systemgrenzen | 41 |
| 4.3.1 | Technische Systemgrenze..... | 41 |
| 4.3.2 | Geographische Systemgrenze | 42 |
| 4.3.3 | Zeitliche Systemgrenze..... | 43 |
| 4.4 | Sachbilanz | 43 |
| 4.4.1 | Allgemeines | 43 |
| 4.4.2 | Herstellung der einzelnen Komponenten des Oberbaus | 43 |
| 4.4.2.1 | Schiene..... | 44 |
| 4.4.2.2 | Schienenbefestigung und Zwischenlage | 44 |
| 4.4.2.3 | Besohlung..... | 46 |
| 4.4.2.4 | Schwelle K1 | 46 |
| 4.4.2.5 | Schwelle L2..... | 47 |
| 4.4.2.6 | Schwelle L17..... | 48 |
| 4.4.2.7 | Gleisschotter..... | 48 |
| 4.4.2.8 | FF STA ÖBB-PORR..... | 50 |
| 4.4.2.9 | Vergussbeton..... | 51 |
| 4.4.2.10 | Lastverteilerplatte (LVT) | 52 |
| 4.4.3 | Transport (A4) | 53 |
| 4.4.4 | Errichtung, Instandhaltung, Erneuerung (A5, B1-B7)..... | 55 |
| 4.4.5 | Entsorgung (C1-C4)..... | 58 |
| 4.5 | Wirkungsabschätzung | 60 |
| 4.5.1 | Klimawandel – gesamt (GWP - gesamt) | 61 |
| 4.5.2 | Versauerung (AP) | 62 |
| 4.5.3 | Nicht erneuerbarer kumulierter Energiebedarf (NRCED)..... | 63 |
| 4.6 | Auswertung | 64 |
| 4.6.1 | Analyse 1: Betonschwelle K1 | 65 |
| 4.6.1.1 | Betrachtungszeitraum 80 Jahre | 65 |
| 4.6.1.2 | Betrachtungszeitraum 200 Jahre | 73 |
| 4.6.2 | Analyse 2: Betonschwelle L2 | 77 |
| 4.6.2.1 | Betrachtungszeitraum 80 Jahre | 78 |
| 4.6.2.2 | Betrachtungszeitraum 200 Jahre | 85 |
| 4.6.3 | Analyse 3: Betonschwelle L17 | 88 |
| 4.6.3.1 | Betrachtungszeitraum 80 Jahre | 89 |
| 4.6.3.2 | Betrachtungszeitraum 200 Jahre | 95 |
| 4.6.4 | Analyse 4a: Feste Fahrbahn – Slab Track Austria ÖBB-Porr | 99 |
| 4.6.4.1 | Betrachtungszeitraum 80 Jahre | 99 |
| 4.6.4.2 | Betrachtungszeitraum 200 Jahre | 107 |
| 4.6.5 | Analyse 4b: Feste Fahrbahn – Slab Track Austria ÖBB-Porr | 111 |
| 4.6.5.1 | Betrachtungszeitraum 80 Jahre | 112 |
| 4.6.5.2 | Betrachtungszeitraum 200 Jahre | 119 |
| 4.6.6 | Änderung des GWP bei Veränderung des Analysezeitraums..... | 124 |
| 4.6.7 | GWP – Gegenüberstellung der Analysen | 126 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.6.7.1 | Oberbauten gesamt | 126 |
| 4.6.7.2 | Oberbauten ohne Schienen | 129 |
| 4.6.8 | Ergebnisverifikation | 131 |
| 5 | Fazit | 133 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 137 |
| 7 | Anhang..... | 143 |
| | Verpflichtungs- und Einverständniserklärung..... | 145 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1-1: durchschnittliche Emissionen je Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland in 2018 [13] | 4 |
| Abbildung 1-2: Hohe Emissionen beim PKW, Daten für den Personenverkehr in Österreich in 2019 [14] | 4 |
| Abbildung 1-3: Terminologie des Bahnkörpers [16] | 7 |
| Abbildung 1-4: Der Schotteroberbau mit Betonschwellen bei der Herstellung [18] | 9 |
| Abbildung 1-5: Streuung der Spannungen in Schienenfußmitte proportional zur Geschwindigkeit [15] | 10 |
| Abbildung 1-6: Ein Schnellumbauzug (SUZ) bei der Gleisneulage [20]..... | 10 |
| Abbildung 1-7: Gleistragplatte System ÖBB-Porr [23] | 12 |
| Abbildung 1-8: Systemskizze FF-System ÖBB-Porr [23] | 12 |
| Abbildung 1-9: Vergleich des Lastabtrages von SchO (links) mit der FF (rechts) und der Schienenfußmittenspannung in Abhängigkeit mit der Geschwindigkeit [15] | 13 |
| Abbildung 1-10: Sustainable Development Goals SDGs [4] | 16 |
| Abbildung 1-11: 3 Säulen der Nachhaltigkeit [25] | 16 |
| Abbildung 1-12: Lebenszyklusphasen eines Bauwerks [27]..... | 17 |
| Abbildung 1-13: Übersicht von Kriterien für nachhaltiges Planen und Bauen [26] | 18 |
| Abbildung 1-14: Kosteneinsparung durch BIM [26] | 19 |
| Abbildung 1-15: Arbeitsprogramm der CEN/TC 350 [37] | 21 |
| Abbildung 1-16: Konzeption der Nachhaltigkeitsbewertung [37] | 22 |
| Abbildung 1-17: Ablaufdiagramm des Bewertungsprozesses der umweltbezogenen Qualität [27] | 23 |
| Abbildung 2-1: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040 [38]..... | 26 |
| Abbildung 2-2: Beispiel eines Produktsystems für eine Ökobilanz [38] | 28 |
| Abbildung 2-3: Beispiel für einen Satz von Prozessmodulen innerhalb eines Produktsystems [38] | 28 |
| Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Systemfließbildes eines Prozessmoduls [2] . | 29 |
| Abbildung 2-5: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung der Wirkungsabschätzung [2] | 30 |
| Abbildung 2-6: Die Auswertungsphase und die Beziehung zu den anderen Phasen der Ökobilanz [39]..... | 31 |
| Abbildung 3-1: Betonschwelle K1 [41]..... | 33 |
| Abbildung 3-2: Betonschwelle L2 [40] | 34 |
| Abbildung 3-3: Schienenprofil 60E1 [47] | 37 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 3-4: Explosionsdarstellung der Schienenbefestigung W14 [48]..... | 38 |
| Abbildung 3-5: Explosionsdarstellung der Schienenbefestigung W300 [49]..... | 39 |
| Abbildung 3-6: schematische Darstellung einer Schwellenbesohlung [50] | 40 |
| Abbildung 4-1: Systemgrenze im Tunnel, rot umrahmt [51]..... | 42 |
| Abbildung 4-2: Regelquerschnitt nach ÖBB-Regelwerk 01.05. für eine 1-gleisige Strecke [61] | 49 |
| Abbildung 4-3: Regelquerschnitt Gleisschotter mit Schwellenlänge = 2,6m, eigene Abbildung | 49 |
| Abbildung 4-4: Regelquerschnitt Gleisschotter mit Schwellenlänge = 2,4m, eigene Abbildung | 50 |
| Abbildung 4-5: FF STA ÖBB-PORR im Querschnitt mit Darstellung des Vergussbetons [46] | 51 |
| Abbildung 4-6: FF-Konstruktion auf einem Erdbauwerk mit Lastverteilerplatte [46]..... | 52 |
| Abbildung 4-7: Entsorgungsszenarien aus der Masterarbeit Klammbauer, 2017 [40]..... | 58 |
| Abbildung 4-8: Analyse 1-GWP, 80 Jahre_min | 65 |
| Abbildung 4-9: Analyse 1-AP, 80 Jahre_min | 65 |
| Abbildung 4-10: Analyse 1-NRCED, 80 Jahre_min | 66 |
| Abbildung 4-11: Analyse 1-GWP, 80 Jahre_max | 66 |
| Abbildung 4-12: Analyse 1-AP, 80 Jahre_max | 67 |
| Abbildung 4-13: Analyse 1-NRCED, 80 Jahre_max..... | 67 |
| Abbildung 4-14: Analyse 1, Herstellungsphase A1-A3..... | 68 |
| Abbildung 4-15: Analyse 1, Errichtungsphase A4-A5 | 69 |
| Abbildung 4-16: Analyse 1, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 80 Jahre | 71 |
| Abbildung 4-17: Analyse 1, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 80 Jahre..... | 72 |
| Abbildung 4-18: Analyse 1, Entsorgungsphase C1-C4 | 73 |
| Abbildung 4-19: Analyse 1-GWP, 200 Jahre_min | 74 |
| Abbildung 4-20: Analyse 1-AP, 200 Jahre_min..... | 74 |
| Abbildung 4-21: Analyse 1-NRCED, 200 Jahre_min | 74 |
| Abbildung 4-22: Analyse 1-GWP, 200 Jahre_max | 75 |
| Abbildung 4-23: Analyse 1-AP, 200 Jahre_max | 75 |
| Abbildung 4-24: Analyse 1-NRCED, 200 Jahre_max..... | 75 |
| Abbildung 4-25: Analyse 1, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 200 Jahre | 76 |
| Abbildung 4-26: Analyse 1, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 200 Jahre..... | 77 |
| Abbildung 4-27: Analyse 2-GWP, 80 Jahre_min | 78 |
| Abbildung 4-28: Analyse 2-AP, 80 Jahre_min..... | 78 |
| Abbildung 4-29: Analyse 2-NRCED, 80 Jahre_min | 79 |
| Abbildung 4-30: Analyse 2-GWP, 80 Jahre_max | 79 |
| Abbildung 4-31: Analyse 2-AP, 80 Jahre_max | 79 |
| Abbildung 4-32: Analyse 2-NRCED, 80 Jahre_max..... | 80 |
| Abbildung 4-33: Analyse 2, Herstellungsphase A1-A3..... | 80 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-34: Analyse 2, Errichtungsphase A4-A5..... | 81 |
| Abbildung 4-35: Analyse 2, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 80 Jahre..... | 82 |
| Abbildung 4-36: Analyse 2, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 80 Jahre | 83 |
| Abbildung 4-37: Analyse 2, Entsorgungsphase C1-C4..... | 84 |
| Abbildung 4-38: Analyse 2-GWP, 200 Jahre_min..... | 85 |
| Abbildung 4-39: Analyse 2-AP, 200 Jahre_min | 85 |
| Abbildung 4-40: Analyse 2-NRCED, 200 Jahre_min..... | 85 |
| Abbildung 4-41: Analyse 2-GWP, 200 Jahre_max..... | 86 |
| Abbildung 4-42: Analyse 2-AP, 200 Jahre_max..... | 86 |
| Abbildung 4-43: Analyse 2-NRCED, 200 Jahre_max | 86 |
| Abbildung 4-44: Analyse 2, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 200 Jahre..... | 87 |
| Abbildung 4-45: Analyse 2, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 200 Jahre | 88 |
| Abbildung 4-46: Analyse 3-GWP, 80 Jahre_min..... | 89 |
| Abbildung 4-47: Analyse 3-AP, 80 Jahre_min | 89 |
| Abbildung 4-48: Analyse 3-NRCEP, 80 Jahre_min..... | 90 |
| Abbildung 4-49: Analyse 3-GWP, 80 Jahre_max..... | 90 |
| Abbildung 4-50: Analyse 3-AP, 80 Jahre_max..... | 90 |
| Abbildung 4-51: Analyse 3-NRCEP, 80 Jahre_max..... | 91 |
| Abbildung 4-52: Analyse 3, Herstellungsphase A1-A3 | 91 |
| Abbildung 4-53: Analyse 3, Errichtungsphase A4-A5..... | 92 |
| Abbildung 4-54: Analyse 3, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 80 Jahre..... | 93 |
| Abbildung 4-55: Analyse 3, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 80 Jahre | 94 |
| Abbildung 4-56: Analyse 3, Entsorgungsphase C1-C4..... | 95 |
| Abbildung 4-57: Analyse 3-GWP, 200 Jahre_min..... | 96 |
| Abbildung 4-58: Analyse 3-AP, 200 Jahre_min | 96 |
| Abbildung 4-59: Analyse 3-NRCED, 200 Jahre_min..... | 96 |
| Abbildung 4-60: Analyse 3-GWP, 200 Jahre_max..... | 97 |
| Abbildung 4-61: Analyse 3-AP, 200 Jahre_max..... | 97 |
| Abbildung 4-62: Analyse 3-NRCED, 200 Jahre_max | 97 |
| Abbildung 4-63: Analyse 3, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 200 Jahre..... | 98 |
| Abbildung 4-64: Analyse 3, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 200 Jahre | 99 |
| Abbildung 4-65: Analyse 4a-GWP, 80 Jahre_min..... | 100 |
| Abbildung 4-66: Analyse 4a-AP, 80 Jahre_min..... | 100 |
| Abbildung 4-67: Analyse 4a-NRCED, 80 Jahre_min | 101 |
| Abbildung 4-68: Analyse 4a-GWP, 80 Jahre_max | 101 |
| Abbildung 4-69: Analyse 4a-AP, 80 Jahre_max..... | 102 |
| Abbildung 4-70: Analyse 4a-NRCED, 80 Jahre_max..... | 102 |
| Abbildung 4-71: Analyse 4a, Herstellungsphase A1-A3 | 103 |
| Abbildung 4-72: Analyse 4a, Errichtungsphase A4-A5..... | 104 |
| Abbildung 4-73: Analyse 4a, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 80 Jahre | 105 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-74: Analyse 4a, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 80 Jahre | 106 |
| Abbildung 4-75: Analyse 4a, Entsorgungsphase C1-C4 | 107 |
| Abbildung 4-76: Analyse 4a-GWP, 200 Jahre_min | 108 |
| Abbildung 4-77: Analyse 4a-AP, 200 Jahre_min | 108 |
| Abbildung 4-78: Analyse 4a-NRCED, 200 Jahre_min..... | 108 |
| Abbildung 4-79: Analyse 4a-GWP, 200 Jahre_max..... | 109 |
| Abbildung 4-80: Analyse 4a-AP, 200 Jahre_max | 109 |
| Abbildung 4-81: Analyse 4a-NRCED, 200 Jahre_max | 109 |
| Abbildung 4-82: Analyse 4a, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 200 Jahre..... | 110 |
| Abbildung 4-83: Analyse 4a, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 200 Jahre | 111 |
| Abbildung 4-84: Analyse 4b-GWP, 80 Jahre_min | 112 |
| Abbildung 4-85: Analyse 4b-AP, 80 Jahre_min..... | 113 |
| Abbildung 4-86: Analyse 4b-NRCED, 80 Jahre_min | 113 |
| Abbildung 4-87: Analyse 4b-GWP, 80 Jahre_max | 113 |
| Abbildung 4-88: Analyse 4b-AP, 80 Jahre_max | 114 |
| Abbildung 4-89: Analyse 4b-NRCED, 80 Jahre_max..... | 114 |
| Abbildung 4-90: Analyse 4b, Herstellungsphase A1-A3..... | 115 |
| Abbildung 4-91: Analyse 4b, Errichtungsphase A4-A5 | 116 |
| Abbildung 4-92: Analyse 4b, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 80 Jahre | 117 |
| Abbildung 4-93: Analyse 4b, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 80 Jahre..... | 118 |
| Abbildung 4-94: Analyse 4b, Entsorgungsphase C1-C4 | 119 |
| Abbildung 4-95: Analyse 4b-GWP, 200 Jahre_min | 119 |
| Abbildung 4-96: Analyse 4b-AP, 200 Jahre_min | 120 |
| Abbildung 4-97: Analyse 4b-NRCED, 200 Jahre_min | 120 |
| Abbildung 4-98: Analyse 4b-GWP, 200 Jahre_max | 120 |
| Abbildung 4-99: Analyse 4b-AP, 200 Jahre_max | 121 |
| Abbildung 4-100: Analyse 4b-NRCED, 200 Jahre_max..... | 121 |
| Abbildung 4-101: Analyse 4b, Nutzungsphase B1-B7, minimale Liegedauer 200 Jahre | 122 |
| Abbildung 4-102: Analyse 4b, Nutzungsphase B1-B7, maximale Liegedauer 200 Jahre..... | 123 |
| Abbildung 4-103: GWP-Änderung bei Veränderung des Betrachtungszeitraums, min..... | 124 |
| Abbildung 4-104: GWP-Änderung bei Veränderung des Betrachtungszeitraums, max | 125 |
| Abbildung 4-105: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, min 80J. . | 127 |
| Abbildung 4-106: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, max 80J.. | 127 |
| Abbildung 4-107: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, min 200J. | 128 |
| Abbildung 4-108: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, max 200J. | 128 |
| Abbildung 4-109: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, min 80J. | 129 |
| Abbildung 4-110: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, max 80J. | 130 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4-111: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, min 200J..... | 130 |
| Abbildung 4-112: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, max 200J..... | 131 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 3-1: Technische Daten Schwelle K1 [41]..... | 34 |
| Tabelle 3-2: Technische Daten Betonschwelle L2 [42–44] | 35 |
| Tabelle 3-3: Technische Daten Betonschwelle L17 [44] | 35 |
| Tabelle 3-4: Technische Daten FF STA ÖBB-PORR [46] | 36 |
| Tabelle 4-1: Masse Stahlteile W14 [53–55] | 44 |
| Tabelle 4-2: Sachbilanz W14 | 45 |
| Tabelle 4-3: Sachbilanz W300-1 [46, 57] | 45 |
| Tabelle 4-4: Sachbilanz Schwellenbesohlung [44, 58] | 46 |
| Tabelle 4-5: Sachbilanz Schwelle K1 [58] | 47 |
| Tabelle 4-6: Sachbilanz Schwelle L2 [44] | 48 |
| Tabelle 4-7: Sachbilanz Schwelle L17 [44] | 48 |
| Tabelle 4-8: Sachbilanz Gleisschotter [61, 62] | 50 |
| Tabelle 4-9: Sachbilanz FF STA ÖBB-PORR [46] | 51 |
| Tabelle 4-10: Sachbilanz Vergussbeton FF [46] | 52 |
| Tabelle 4-11: Sachbilanz Lastverteilerplatte FF [63] | 52 |
| Tabelle 4-12: Transporte für Analyse 1, Schwelle K1 | 53 |
| Tabelle 4-13: Transporte für Analyse 2, Schwelle L2..... | 53 |
| Tabelle 4-14: Transporte für Analyse 3, Schwelle L17..... | 54 |
| Tabelle 4-15: Transporte für Analyse 4a, FF STA ÖBB-PORR im Tunnel | 54 |
| Tabelle 4-16: Transporte Analyse 4b, FF STA ÖBB-PORR auf der freien Strecke..... | 54 |
| Tabelle 4-17: Angenommene Arbeitsschritte in Abhängigkeit der Liegedauer der Oberbaukomponenten [19, 52] | 56 |
| Tabelle 4-18: Maschinendaten für die Herstellung, Instandhaltung und den Abbruch [19, 40, 65–70]..... | 56 |
| Tabelle 4-19: Häufigkeit der Maschineneinsätze in Abhängigkeit verschiedener Dauern der Analyse | 57 |
| Tabelle 4-20: Modellierung der Entsorgung des Oberbaus | 59 |
| Tabelle 4-21: Auswahl der Indikatoren für die Umweltwirkungen dieser Studie [59] | 61 |
| Tabelle 4-22: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren GWP ₁₀₀ nach IPCC 2013, entnommen aus SimaPro | 62 |
| Tabelle 4-23: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren AP nach Seppälä, entnommen aus SimaPro | 63 |
| Tabelle 4-24: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren NRCED, entnommen aus SimaPro | 64 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|--|
| AE | kumulierten Überschreitungsansatz, eng.: accumulated exceedance |
| AP | Acidification Potential, Versauerungspotential |
| Äq. | Äquivalent |
| b | Breite |
| BBT | Brenner Basistunnel |
| BIM | Building Information Modeling |
| bspw. | beispielsweise |
| CED | Kumulierter Energiebedarf, eng.: cumulative energy demand |
| CEN | Comité Européen de Normalisation, Europäische Komitee für Normung |
| CEN TC/350 | Technisches Komitee der CEN für die Entwicklung der standardisierten Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| DACH | Raum Deutschland, Österreich und Schweiz |
| DB | Deutsche Bahn |
| DB AG | Deutsche Bahn Aktiengesellschaft |
| DGS | dynamischer Gleisstabilisator |
| d.h. | das heißt |
| EN | Europäische Norm |
| eng. | Englisch |
| EPD | Umweltproduktdeklaration |
| eq | Äquivalent |
| etc. | et cetera |
| EU | Europäische Union |
| F | Kraft |
| fE | funktionelle Einheit |
| FF | Feste Fahrbahn |
| ggf. | gegebenenfalls |
| GVZ | Güterverkehrszentrum |
| GWP | Global Warming Potential, Klimawandel |
| h | Höhe |
| H ⁺ | Wasserstoff-Proton |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| ISO | Internationale Organisation für Normung |
| KLV | Kombinierter Ladungsverkehr |

| | |
|-------------------|--|
| kg | Kilogramm |
| kN | Kilonewton |
| km | Kilometer |
| km/h | Kilometer pro Stunde |
| l | Länge |
| LCA | Life Cycle Assessment, Ökobilanz |
| LCC | Life Cycle Costing, Lebenszykluskostenrechnung |
| LCI | Life Cycle Inventory, Sachbilanz |
| LCIA | Life Cycle Impact Assessment, Wirkungsabschätzung |
| LKW | Lastkraftwagen |
| m | Meter |
| m ² | Quadratmeter |
| m ³ | Kubikmeter |
| mm | Millimeter |
| max | maximal |
| MDZ | mechanisierter Durcharbeitungszug |
| min | minimal |
| MJ | Megajoule |
| NRCED | nicht erneuerbarer kumulierter Energiebedarf, eng.: non renewable cumulative energy demand |
| N/mm ² | Newton pro Quadratmillimeter |
| ÖBB | Österreichische Bundesbahnen |
| ÖN | Österreichische Norm |
| ÖNORM | Österreichische Norm |
| ÖPNV | Öffentlicher Personennahverkehr |
| SchO | Schotteroberbau |
| SDG | Sustainable Development Goal, Ziele für nachhaltige Entwicklung |
| SkI | Spannklemme |
| SLCA | Societal Life Cycle Assessment, produktbezogene Sozialbilanz |
| Ss | Schwellenschraube |
| STA | Slab Track Austria |
| SUZ | Schnellumbauzug |
| t | Tonnen |
| TEN | transeuropäisches Netz (hier: für den Verkehr) |
| TGV | Train à Grande Vitesse |
| tkm | Tonnenkilometer |
| UN | United Nations, Vereinte Nationen |
| usw. | und so weiter |
| uvm. | und viele mehr |
| vgl. | vergleiche |

| | |
|------------|--------------------------|
| v_{\max} | Maximale Geschwindigkeit |
| Wfp | Winkelführungsplatte |
| z.B. | zum Beispiel |
| Zw | Zwischenlage |
| Zwp | Zwischenlageplatte |
| Ø | Durchmesser |

1 Einleitung

1.1 Anlass & Ziel dieser Untersuchung

Bei der Herstellung von Produkten, bei der Inanspruchnahme von Dienstleistungen bzw. bei alltäglichen Dingen, die wir in unserem gesellschaftlichen Leben tun, entstehen unerwünschte Begleiterscheinungen, welche unsere natürliche Umwelt beeinflussen bzw. durch Emissionen und Ressourcenverbrauch belasten und angreifen. Beim Kauf/ bei der Nutzung eines Produkts bzw. einer Dienstleistung spiegelt sich die Belastung der Umwelt in geringem Maße bis gar nicht im bezahlten Preis wider. Das Produkt „Umwelt“ findet durch die kostenlose Inanspruchnahme unwesentlich Beachtung, wodurch Ressourcen oftmals in verschwenderischer Art eingesetzt werden. [1, S. 3]

Aus diesem Grund ist das „Thema“ Nachhaltigkeit derzeit in aller Munde und findet Anklang in Medienberichterstattungen, welche über die Thematik der Erderwärmung und der Umweltbelastungen berichten. Ein nachhaltigeres Denken und eine erweiterte Sichtweise der Politik bzw. der Gesellschaft scheint in absehbarer Zeit unumgänglich zu sein. [1, S. VII]

Deshalb assoziieren wir das Wort Nachhaltigkeit heutzutage auch oftmals mit Entwicklungspolitik, da die Verantwortung für künftige Generationen in den Händen der heutigen Weltbevölkerung liegt [2, S. 383-384].

Allgemein kann die Nachhaltigkeit in drei Dimensionen, welche die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte beinhaltet, differenziert werden. Das „Werkzeug“ der Ökobilanz bzw. Ökobilanzierung stellt hierbei eine international genormte Methode dar, um Produkte, Produktsysteme etc. in Hinblick auf Umwelteffekte über den Lebenszyklus in der Kreislaufwirtschaft zu betrachten. [2, 384, 387]

Die Ökobilanz kann dadurch ein Mittel sein bzw. liefert Informationen, welche bei einer Entscheidungsfindung einfließen und die Meinungsbildung unterstützen können. Um die Nachhaltigkeit, bspw. eines Produkts, ganzheitlich zu betrachten, dürfen die monetären bzw. sozialen Aspekte jedoch nicht außer Acht gelassen werden. [1, S. 2]

Beobachtet man die Umweltbelastungen am Indikator der globalen Treibhausemissionen, so stellt man fest, dass beinahe ein Viertel der Umweltverschmutzungen durch den Verkehr emittiert werden. Eine Veränderung im Mobilitätsverhalten in der Bevölkerung scheint unumgänglich, sodass die 17 UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) bzw. die Ziele des Green Deals der EU-Kommission erreicht werden können. D.h. es muss sich die vorhandene Infrastruktur auf lange Sicht zu einer nachhaltigen Verkehrsinfrastruktur wandeln. Hierbei stellen die modernen Schienenverkehrssysteme eine wesentliche Schlüsselrolle dar. Die Bahn als emissionsarmes Massentransportmittel, sowohl im Personenverkehr als auch im

Güterverkehr, punktet vor allem bei der Leistungskapazität (Infrastruktur, materielle Ressourcen etc.), sowie bei der Leistungsqualität (Schnelligkeit, Pünktlichkeit, Zuverlässigkeit usw.). [3, 4]

Gerade der Entschluss der Europäischen Union transeuropäische Netze (TEN) aufzubauen, eine gemeinsame Verkehrspolitik zu verfolgen und eine gut vernetzte Infrastruktur herzustellen, bestärkt die umweltfreundliche Eisenbahn und die Interoperabilität zwischen Straße und Schiene. Am Beispiel Brenner Basistunnel, welcher im skandinavisch-mediterranen Korridor des TEN-Kernetzes liegt, sind die Vorzüge von Eisenbahn-Hochleistungsinfrastrukturen zu erkennen. So sollen in absehbarer Zeit Reisezüge mit Geschwindigkeiten von über 200 km/h die Alpen in etwa 25 Minuten durchqueren und Güterzüge über geringe Steigungen von Italien nach Österreich gelangen. Die Verlagerung von der Straße auf die Schiene liegt auf der Hand, wodurch Umweltentlastungen durch geringeren LKW-Verkehr erreicht werden können. [5–7]

Jedoch stellen solche Vorhaben große Anforderungen an die Ingenieure*innen, den Bau, die verwendeten Materialien und an die Instandhaltung. Deshalb sind fortweilende Verbesserungen und Optimierungen von Konstruktionen, Materialien, Bau- und Sanierungsprozessen, dem Instandhaltungsmanagement bzw. der Netzentwicklung notwendig, um langfristig nachhaltig zu verkehren und einen Beitrag zu einer zukunftssicheren und nachhaltig gebauten Umwelt zu leisten. Die Bahn wird durch das transeuropäische Netz und die bestärkte Interoperabilität von Straße - Schiene in absehbarer Zukunft die Hauptrolle in der nachhaltigen europäischen Verkehrsinfrastruktur einnehmen. [3]

Aus diesem Grund verfolgt diese Masterarbeit das Ziel, verschiedene gängige sowie neuartige Oberbauformen (Schotteroberbauten mit Betonschwelle, Feste Fahrbahn) der Eisenbahn im Tunnel und auf der freien Strecke am Beispiel einer entstehenden Hochleistungsinfrastruktur am Brenner-Korridor bzw. anhand des Brenner-Basistunnels auf ökologische Potentiale mittels einer Ökobilanz zu untersuchen. Die Ergebnisse der Ökobilanz sollen anhand ausgewählter Umweltindikatoren präsentiert werden und für eine spätere Betrachtung, die sich nur auf ökologische Aspekte beschränkt und ökonomische, soziale sowie betriebliche Gesichtspunkte außer Acht lässt, zur Verfügung stehen.

Des Weiteren soll die ökologische Untersuchung den externen Partnern einen Überblick über die ökologischen Ergebnisse der jeweiligen Oberbauform geben, eventuelle Bereiche für Optimierungen aufzeigen bzw. eine Hilfestellung bei der weiteren Planung am Brenner-Korridor dienen.

Neben der ganzheitlichen Betrachtung, wird besonders Bezug auf die Auswirkungen von Liegedauern mit verschiedenen Analysezeiträume genommen. Des Weiteren werden ökologische Potentiale einzelner Oberbaukomponenten aufgezeigt und diskutiert.

Nachfolgend wird einleitend auf die Bahninfrastruktur, den Oberbau, die Entwicklung der Nachhaltigkeit und die Nachhaltigkeit im Bauwesen Bezug genommen, um sich mit der Materie

tiefer auseinander setzen zu können. Im darauffolgenden Kapitel wird eine kurze Einführung in die Ökobilanzierung gegeben, bevor die untersuchten Oberbauten detailliert vorgestellt werden und im Kapitel 4 die eigentliche Analyse am Beispiel des Brenner Basistunnel durchgeführt wird.

1.2 Bedeutung der Bahninfrastruktur für das Transportwesen

Seit jeher ist der Fortschritt bzw. die Weiterentwicklung von Volkswirtschaften und Kulturen vom räumlichen Austausch von Personen und Gütern durch den Verkehr angewiesen. Gerade die Eisenbahn, die durch die Entwicklung der Dampfmaschine im 19. Jahrhundert einen Aufschwung erlangte, brachte einen erheblichen Fortschritt im Bereich der Industrialisierung mit sich bzw. legte einen Grundstein der industriellen Revolution. Bereits um das Jahr 1770 wurden erste kilometerlange Strecken mit Eisenschienen gebaut. In den 1830-Jahren brach dann ein förmlicher Eisenbahnhype aus, und es wurden vermehrt regionale Strecken und Netze gebaut. Vor allem stellten die infrastrukturellen Voraussetzungen einen großen Vorteil für den Güterverkehr, die Schwerindustrie und deren Entwicklung dar. Ende des 19. Jahrhunderts wurden dann erste Akzente für internationale länderübergreifende Eisenbahnstrecken gesetzt und bspw. die Transsibirische Eisenbahn eröffnet. [8–10]

Gerade in der jetzigen Zeit stehen wir an einem ähnlichen Punkt, wie wir Ende des 19. Jahrhunderts waren. Durch den Beschluss der Europäischen Union transeuropäische Netze (TEN) zu bauen, um alle Regionen der EU zu verbinden und die Wettbewerbsfähigkeit, das Wachstum, die Entwicklung des Binnenmarktes und den Wohlstand voranzutreiben, erfährt die Eisenbahn erneut einen Aufschwung. [6, 7, 9]

Die Eisenbahn, die im künftigen TEN komplett elektrifiziert verkehrt, nimmt hierbei eine Hauptrolle ein. Im Gegensatz zum Straßenverkehr kann die Bahn Personen und Güter mit minimalem Energieaufwand über weite Strecken befördern. Der Energieverbrauch von Schienenverkehr zum Verkehr auf der Straße kann in einem Verhältnis von 1:3 bis 1:5 bezogen auf Tonnenkilometer (tkm) angegeben werden. Hinzu kommt, dass ein Güterzug mit einer Fahrt deutlich mehr Ware von A nach B transportieren kann, als es ein einzelner LKW befördern kann. Dadurch werden vor allem neben dem Vorteil des Massengüterverkehrsmittels aus ökologischer Sicht Emissionen eingespart (vgl. Abbildung 1-1 & Abbildung 1-2). [11, 12]

| Vergleich der durchschnittlichen Emissionen einzelner Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland – Bezugsjahr 2018 | | | | |
|---|-------|------------------|------------------------|--------------|
| | | Lkw ² | Güterbahn ³ | Binnenschiff |
| Treibhausgase ¹ | g/tkm | 112 | 18 | 31 |
| Kohlenmonoxid | g/tkm | 0,099 | 0,012 | 0,088 |
| Flüchtige Kohlenwasserstoffe ⁴ | g/tkm | 0,037 | 0,002 | 0,031 |
| Stickoxide | g/tkm | 0,269 | 0,030 | 0,427 |
| Partikel ⁵ | g/tkm | 0,006 | 0,001 | 0,010 |

g/tkm = Gramm pro Tonnenkilometer, inkl. der Emissionen aus der Bereitstellung und Umwandlung der Energieträger in Strom, Benzin, Diesel und Kerosin
¹ CO₂, CH₄ und N₂O angegeben in CO₂-Äquivalenten
² Lkw = Lkw ab 3,5t, Sattelzüge, Lastzüge
³ Die in der Tabelle ausgewiesenen Emissionsfaktoren für die Bahn basieren auf Angaben zum durchschnittlichen Strom-Mix in Deutschland. Emissionsfaktoren, die auf unternehmens- oder sektorbezogenen Strombezügen basieren (siehe z. B. den „Umweltmobilcheck“ der Deutschen Bahn AG), weichen daher von den in der Tabelle dargestellten Werten ab.
⁴ ohne Methan
⁵ ohne Abrieb von Reifen, Straßenbelag, Bremsen, Oberleitungen

Quelle: TREMOD 6.03
Umweltbundesamt, 01/2020

Abbildung 1-1: durchschnittliche Emissionen je Verkehrsmittel im Güterverkehr in Deutschland in 2018 [13]

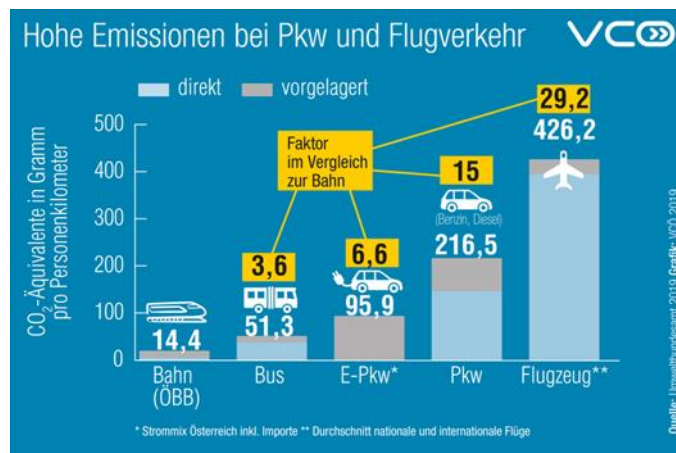


Abbildung 1-2: Hohe Emissionen beim PKW, Daten für den Personenverkehr in Österreich in 2019 [14]

Die Vorteile des Güterverkehrs mit der Eisenbahn liegen somit auf der Hand. Die Bahn, als günstiges Massengüterverkehrsmittel, hat gegenüber dem LKW-Verkehr auch deutliche Leistungsvorteile im Transport von großen Gütermengen in festen Relationen über große Distanzen. Jedoch haben sich die traditionellen Märkte (Montangüter) der Bahn durch den europäischen Binnenmarkt, den freien Warenverkehr, die Globalisierung der Absatz- und Beschaffungsmärkte, die Internationalisierung von Produkten, Marketing und Vertrieb, sowie die heutigen betrieblichen Arbeitsteilungen (just in time) gewandelt. Das dynamische anwachsende Verkehrsvolumen und der steigende Wettbewerbsdruck durch die ansteigenden Angebote an Transportleistungen, billigen Preisen oder die zunehmenden Ansprüche an das Transportniveau bedürfen der Konzentration auf zusätzliche Bahn-Strategien bzw. erweiterte Geschäftsfelder. Neben den grundsätzlichen Systemstärken der Bahn, wie dem Bilden von direkten Zügen, dem Ganzzugverkehr bzw. dem Transport von Sendungen größeren Umfangs oder mit Gefahrgütern, sind folgende zusätzliche Strategien zu nennen: [11]

- Minimierung der Aufwände für Sammeln und Verteilen
- Noch bessere europabezogene Güterzüge im Langstreckenverkehr
- Leistungsverbesserungen der Bahninfrastruktur
- Minimierung der Leerwagenläufe
- Gründung internationaler Eisenbahnunternehmen
- Vereinheitlichung der europäischen Tarifstrukturen
- uvm.

Die Bildung von Güterverkehrszentren (GVZ) in den letzten Jahren machte den allgemeinen Gütertransport effizienter und brachte eine funktionsgerechte und umweltverträgliche Anbindung an die jeweiligen Verkehrsinfrastrukturen. Das Engagement der Eisenbahn im GVZ ist denkbar. Für die Bahn bedarf es Einrichtungen für den Kombinierten Ladungsverkehr (KLV), ein Frachtzentrum, Stammgleise, Gleisanschlüsse etc. [11]

Die Interoperabilität von Straße auf die umweltfreundliche Schiene erreichte somit einen weiteren Aufschwung. Der Gedankengang ist klar. Die Güter in optimierten und modularen Behältnissen (Container, Wechselkasten), nach dem Grundsatz des Kombinierten Ladungsverkehr, über weite Strecken mit der Bahn zu transportieren und die Flächenbedienung für das Sammeln und Verteilen erfolgt mittels dem LKW. D.h. durch den KLV entsteht eine intermodale Verkehrskette, welche:

- die Güterverkehrskapazitäten der Eisenbahn optimal einsetzt,
- eine Energieeinsparung und somit eine Schonung von Ressourcen,
- eine Entlastung von Fernverkehrsstraßen,
- eine Entlastung der Umwelt mit sich bringt und
- für eine erhöhte Verkehrssicherheit sorgt und einen verbesserten Verkehrsfluss auf den entlasteten Straßen ermöglicht. [11]

Aber nicht nur im Güterverkehr birgt eine Eisenbahn-Hochleistungsinfrastruktur wesentliche Vorteile. Auch im Personenverkehr sind die Vorzüge des leistungsfähigen Verkehrsmittels zu erkennen.

Im verdichteten Raum bzw. in Großstädten bildet die S-Bahn mit ihrer großen Leistungsfähigkeit den Eckpfeiler des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV). Sie bedient hierbei die Ballungszentren und verknüpft auf ihren Linien verschiedenste ÖPNV-Verkehrsnetze und bietet Umsteigemöglichkeiten zu anderen Verkehrsmitteln wie etwa der U-Bahn oder den Bus. [15]

Im Vergleich zu einem Straßenbahnsystem kann die S-Bahn etwa die 8-fache Personenanzahl pro Stunde befördern. Die Details einer Hochleistungs-S-Bahn werden aber erst bei noch genauerer Betrachtung sichtbar. [15]

Diese S-Bahnen verfügen einerseits über spezielle Triebwagen mit vielen, großen und schnellöffnenden Türen für einen schnellen Fahrgastwechsel, andererseits bedarf es einer entsprechend für den Betrieb ausgelegte Infrastruktur. An den Stationen sind die Bahnsteige für die 40.000 Menschen pro Stunde, die bei einem 2 Minuten Takt mit der S-Bahn max. transportiert werden können, auszulegen und somit kurze, schnelle und sichere Wege bzw. Umsteigemöglichkeiten zu garantieren. Aber auch der Fahrweg muss einer so dichten Zugfolge gerecht werden, um stets einen leistungsfähigen und möglichst störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Aus diesem Grund muss der Fahrweg Anforderungen eines wartungsarmen Gleises erfüllen. [15]

Beim Pendant zur S-Bahn dem Fernverkehr werden die Vorteile einer funktionierenden Hochleistungsinfrastruktur noch deutlicher. In den letzten 50 Jahren kam es durch die Ölkrise, dem aufkommenden Umweltgedanken mit den Zielen der Verbesserung der Lebensqualität, zum Sparen von Raum und Energie und den bestehenden Verkehrs- und Umweltproblemen zum Ausbau des Schienenverkehrs. Gerade im Hochgeschwindigkeitsverkehr erlebt die Eisenbahn heute eine Renaissance und bringt für die täglich vom Wohnort zum Arbeitsplatz in Ballungszentren pendelnden Menschen einige Vorzüge mit sich. [15]

Betrachtet man das Beispiel Frankreich. Frankreich ist gekennzeichnet durch eine monozentrische Struktur mit der Ansiedlung und Konzentration aller bedeutsamen Dienststellen und Verwaltungen in Paris. Alle Hauptverkehrsströme verlaufen ausgehend von der Stadt in radialer Form in alle Teile des Landes, so auch das Netz des TGVs¹ (Train à Grande Vitesse). [15]

Werktags sind vor allem starke Verkehrsströme nach Paris festzustellen und am Wochenende in die Urlaubsregionen. Es sind aber auch tägliche Pendler im Reisezug unterwegs. Genau diese täglichen Pendler genießen den Vorteil der funktionierenden Hochleistungsinfrastruktur. Sie wohnen bspw. 150 km vom Pariser Zentrum entfernt, im Grünen/ im ländlichen Bereich, steigen am Morgen in den TGV ein und sind nach einer halben Stunde Fahrt am Arbeitsplatz. Nach getaner Arbeit können sie nach abermaliger halbstündiger Rückfahrt den Abend im Grünen genießen. Diese Möglichkeit der Verbesserung der Lebensqualität bzw. die Chance solche Distanzen in kurzer Zeit sicher und umweltfreundlich zurückzulegen ist bemerkenswert. [15]

1.3 Der Fahrweg – Oberbauten allgemein

Der Oberbau der Eisenbahn bildet den Fahrweg für die schienengebundenen Fahrzeuge. Dabei nimmt der Oberbau samt seinen Komponenten die entstehenden vertikalen und horizontalen

¹ Der TGV ist ein französischer Hochgeschwindigkeitsreisezug, der mit einer Regelgeschwindigkeit bis zu 320 km/h verkehrt. 2007 stellte der TGV auf einer Rekordfahrt einen neuen Geschwindigkeitsweltrekord für Rad-Schiene-Fahrzeuge im normalen Schotterbett mit 574 km/h auf. [15].

Kräfte der überrollenden Züge und Waggons auf und hält die Drehgestelle bzw. Radsätze in der vorgegebenen Bahn. [15, 16]

Der Oberbau beinhaltet alle Komponenten des Gleises (Gleis- und Weichengestänge, Schienen, Schwellen, Schienenbefestigungen, Unterlagsplatten und Zwischenlagen), die Bettung des Gleisrostes (bspw. Gleisschotter) und die Planumsschutzschichten (z.B.: Brechsandsplitt, Kiessand usw.). Die Abgrenzung zum Unterbau bildet die Planumsschutzschicht bzw. die Frostschutzschicht (siehe Abbildung 1-3). [16]

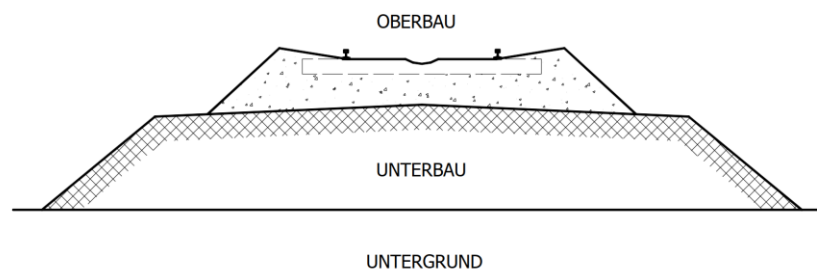


Abbildung 1-3: Terminologie des Bahnkörpers [16]

Im Speziellen werden folgende Anforderungen an den Fahrweg gestellt: [16]

- Sicherheit mit geringer Schadenswahrscheinlichkeit;
- Störungsfreies und verfügbares System;
- Wirtschaftlich mit geringem Instandhaltungsaufwand;
- Dauerhaft, d.h. möglichst lange Liegedauer;
- Fahrkomfort;
- Geringe Lärm- und Erschütterungsbelastung;

Die zuvor genannten auftretenden Kräfte können noch weiter differenziert werden. Das rollende Rad ruft folgende Belastungen des Oberbaus hervor: [16]

- vertikale Kräfte aus der dynamischen Radlast
- horizontale Kräfte
 - aus der Seitenbeschleunigung des Radsatzes
 - aus Störbewegungen aufgrund der abgedehnten Radsatzmassen
 - aus Trägheitskräften des Radsatzes und deren Querbeschleunigung
- in Längsrichtung durch Anfahren und Bremsen
- dynamische Belastungen aus dem Rad-Schiene-Kontakt bzw. aus der Achsüberrollung
- Beanspruchungen zufolge Temperatur beim durchgehend geschweißten Gleis

All diese Kräfte beanspruchen die Elemente des Oberbaus und führen zu Verschleiß, Fahrflächenveränderungen, Veränderungen der Gleislage und Änderungen der Bettungsbedingungen. Diese Effekte werden je nach gefahrener Streckengeschwindigkeit und

Streckenbelastung verstärkt und erfordern deshalb je nach Streckenrang höhere Forderungen an die Oberbaukonstruktion. Dementsprechend gibt jedes Eisenbahnunternehmen, wie bspw. die ÖBB oder die DB, hierzu eigene Richtlinien für den Oberbau heraus, welche die geforderten Konstruktionselemente vorgeben bzw. beschreiben. [16]

Generell kann zwischen zwei Oberbauformen unterschieden werden. Der klassische Schotteroberbau und die relativ neue Feste Fahrbahn. Nachfolgend werden die zwei Systeme näher beleuchtet und die Bestandteile, die Funktionsweise bzw. die Besonderheiten erläutert.

1.3.1 Der Schotteroberbau (SchO)

Der Schotteroberbau (kurz SchO) ist wohl das bekannteste und klassische Oberbausystem, welches über die Jahre der Entwicklung der Eisenbahn entstanden und gewachsen ist. [15]

Als sich die Eisenbahn vor rund 150 Jahren zu entwickeln begann, wurden die Schienen auf Schwellen aus Holz montiert. Ein System, das sich lange Zeit mehrfach bewährt hat und auch heute noch Anwendung findet. Durch das Kreosot-Verbot, welches zur Holzimprägnierung verwendet wurde und der Beschränkung von Benzo(a)pyren verschlechterte sich die maximale Liegedauer von Holzschwellen etwas. D.h. die Dauerhaftigkeit der Bahnschwellen wurde reduziert. [16, 17]

Neben der Holzschwelle kam allmählich die Beton- bzw. Spannbetonschwelle auf, welche sich mittlerweile auf höher rangigen Strecken gegenüber der Holzschwelle durchgesetzt hat. Die Spannbetonschwelle überzeugt durch die lange Liegezeit, dem hohen Eigengewicht, dem hohen Querverschiebewiderstand, der Beständigkeit gegen witterungsbedingte, tierische und pflanzliche Einflüsse etc. Aufgrund der wesentlichen Vorteile, die die Spannbetonschwelle mit sich bringt, finden Holzschwellen bei der Neulage von Strecken mit hohem Rang bzw. Hochleistungsinfrastrukturen kaum mehr Anwendung. Auch die Stahlschwelle wurde durch die Betonschwelle fast gänzlich abgelöst. [16, 17]

Der heutige SchO besteht aus folgenden Elementen (vgl. Abbildung 1-4): [16]

- Schienen
- Schwellen mit Besohlung
- Schienenbefestigung
- Elastische Zwischenlage zwischen der Schiene und der Schwelle
- Gleisschotter



Abbildung 1-4: Der Schotteroberbau mit Betonschwellen bei der Herstellung [18]

Der SchO besteht aus einem Gleisrost, welcher schwimmend im Schotterbett gelagert ist. D.h., es gibt keine feste Verankerung der Schwellen mit dem Gleisschotter. Die Fahrbahn des SchO wird mittels den an den Schwellen befestigten Schienen in ihrer Form und Spurweite gehalten. Ebenfalls dient die Schiene als Träger für den Lastabtrag, welcher durch das rollende Rad entsteht. Durch die Überrollung und die federnde Wirkung der Schwellen bzw. Nachgiebigkeit des Schotterbetts wird eine Trägerwirkung der Schienen aktiviert und die auftretenden Lasten auf mehrere Schwellen verteilt. Der weitere Kraftverlauf verläuft durch das Schotterbett in den Untergrund. [15]

Der Gleisrost verfügt durch seine Konstruktion und Verlegeart im Schotterbett einen ausreichenden Querverschiebewiderstand, welcher für die Lagesicherheit entscheidend ist. Durch die mehrfachen Überrollungen und Einwirkungen in statischer bzw. dynamischer Form kommt es beim SchO im Gleisschotter zu Kornumlagerungen und Veränderungen an den einzelnen Gesteinskörnern, was zu Abweichungen in Hinblick auf die Soll-Gleislage führt. Diese Abweichungen führen zu ungewollten Beschleunigungen des Radsatzes und beanspruchen den Gleisrost durch zusätzliche vertikale und horizontale Kräfte. Diese Effekte werden mit zunehmender Geschwindigkeit sowie zunehmender Masse des Zuges verstärkt. Je mehr die Abweichungen von der Gleissolllage abweichen, desto stärker werden die einzelnen Elemente des SchO beansprucht. Die Fahrgeschwindigkeit, die Zugmasse und der Zustand bzw. die Ausführung des Fahrweges sind demnach entscheidend für den Aufwand der Erhaltungsmaßnahmen. Hinzu kommt, dass es bei der vorherrschenden nachgiebigen Lagerung immer wieder zu hohlliegenden Schwellen kommt, was zu unterschiedlichen Einsenkungen der Schiene und in weiterer Folge zu unterschiedlichen Spannungen in der Schienenfußmitte führt. Wie bereits bei o.a. Lageabweichungen nimmt die statistische Streuung auch bei den Spannungen proportional mit der gefahrenen Geschwindigkeit zu (vgl. Abbildung 1-5). [15]

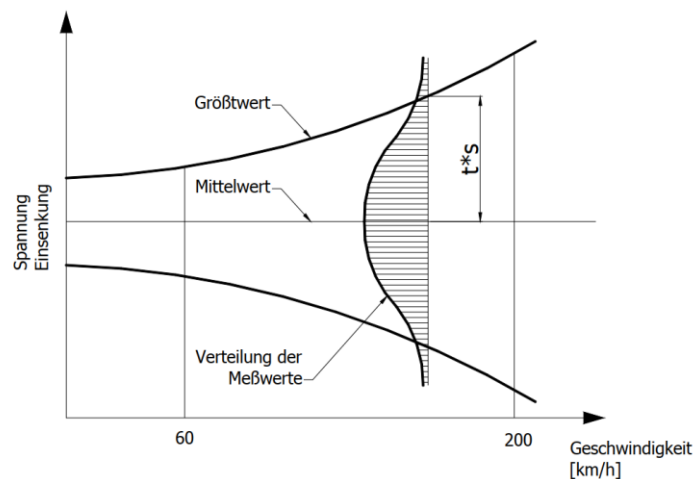


Abbildung 1-5: Streuung der Spannungen in Schienenfußmitte proportional zur Geschwindigkeit [15]

So komplex der schwimmende Gleisrost auf den Verkehr reagiert, so „einfach“ kann der SchO in der Gleislage nach Höhe und Richtung im Zuge von Erhaltungsmaßnahmen (Durcharbeitungen) korrigiert werden. Solche Durcharbeitungen werden heutzutage in maschineller Form mittels mechanisierten Durcharbeitungszügen (MDZ) und dynamischen Gleisstabilisatoren (DGS) durchgeführt. Der Austausch von einzelnen Schwellen oder anderen Komponenten lässt sich ebenfalls relativ simpel und mit mäßigem Aufwand durchführen. Selbst die Gleisneulage erfolgt mittlerweile mechanisiert mittels Schnellumbauzügen (SUZ) (siehe Abbildung 1-6) und ermöglicht eine weitgehendste Automatisierung und Optimierung der jeweiligen Arbeitsschritte und der nachlaufenden Logistik. [15, 19]



Abbildung 1-6: Ein Schnellumbauzug (SUZ) bei der Gleisneulage [20]

Aufgrund oben genannter Gründe in Hinblick auf die „einfache“ Herstellung, Instandhaltung und Verstärkung der einzelnen Bestandteile ist der SchO das „Standardsystem“ der heutigen Eisenbahn. Der SchO findet vorwiegend auf der freien Strecke oder in kurzen Tunneln Anwendung. [15, 16]

Jedoch nimmt die Streuung der Beanspruchungen mit der Geschwindigkeit, wie bereits in Abbildung 1-5 angeführt, erheblich zu. Deshalb wird heutzutage oftmals bei Hochgeschwindigkeitsstrecken ($v \geq 200$ km/h) und vor allem bei Tunneln mit Längen ≥ 500 m auf eine schwimmende Gründung verzichtet und es kommt die nachfolgend beschriebene Feste Fahrbahn zur Anwendung. [15, 21]

1.3.2 Die Feste Fahrbahn (FF)

Wirft man einen Blick in die Historie der Eisenbahn, so ist zu erkennen, dass sich die Radlasten vom 19. Jahrhundert von etwa 2 Tonnen bis heute um etwa das 10-fache auf 22,5 Tonnen erhöht haben. Selbes ist bei den Geschwindigkeiten zu vermerken. Die Höchstgeschwindigkeiten heutiger Reisezüge liegen im Bereich von 300 km/h. Im Vergleich zu 1835 waren dies gerade einmal 25 km/h. [22]

Durch die wachsenden Belastungen und ansteigenden Geschwindigkeiten erhöhten sich, wie bereits beim SchO beschrieben, die Anforderungen an den Oberbau. Im Speziellen waren Anpassungen bei der Stand- und Lagesicherheit der Auflagerung notwendig. Gerade das Aufkommen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs in Japan, Frankreich und Deutschland ($v \geq 300$ km/h) haben die Leistungsgrenzen bzw. Schwachstellen des klassischen SchO mit den großen Streuungen der Spannungen, den hohlliegenden Schwellen bzw. einen zunehmenden Erhaltungsaufwand bei höherer Geschwindigkeit aufgezeigt. [15, 16, 22]

Bei diesen hohen Geschwindigkeiten mussten neue Lösungen für einen stabilen und dauerhaften Fahrweg, welcher ein elastisches Fahrverhalten garantiert und somit einen hohen Fahrkomfort ermöglicht, gefunden werden. Gerade die schwächste Komponente des SchO, der Gleisschotter, sollte durch Beton ersetzt werden und somit ein gleichmäßiges und wartungsarmes System ergeben. Ein schotterloser Oberbau entstand. Heutzutage spricht man von der Festen Fahrbahn (FF) oder auch von Slab Track (eng.). [15, 22]

Die FF kann in drei verschiedene Konstruktionsarten differenziert werden. Diese lauten wie folgt: [15]

- Verankerter oder verklebter Betonschwellen-Gleisrost auf Betontragplatte
- Schwelle mit Bitumenverguss
- Fertigteilplatten auf Betontragplatte

Aufgrund der Zulassung im österreichischen Streckennetz werden die einzelnen Komponenten der FF am Beispiel der österreichischen Fertigteilplatte System „ÖBB-Porr“, auch als „Slab Track Austria“ bezeichnet, vorgestellt.

Das System „ÖBB-Porr“ ist ein Fertigteilplattensystem, bei dem die Gleistragplatte mit jeweils 8 Schienenstützpunkten versehen ist. Die Gleistragplatte liegt auf einer schwach bewehrten Vergussbetonschicht auf und ist nach dem Erhärten des Betons mit dieser formschlüssig verbunden (vgl. Abbildung 1-8). Dieser Vergussbeton wird nach dem Einbringen der Bewehrung und dem Einrichten und Nivellieren des Fertigteillements durch die vorgefertigten Öffnungen eingepresst. [15, 23]

Die Schienenbefestigung wird durch die vorgefertigten Stützpunkte, elastische Zwischenlagen und dem entsprechenden Kleisen bewerkstelligt. Zudem verfügt die Bauart ÖBB-Porr über eine zusätzliche elastische Trennschicht an der Fertigteilplattenunterseite und im Bereich der Öffnungen (siehe Abbildung 1-7, rote Farbe), um nachträgliche Lage- und Höhenänderungen einfach und praktikabel ausgleichen zu können. [15, 23]

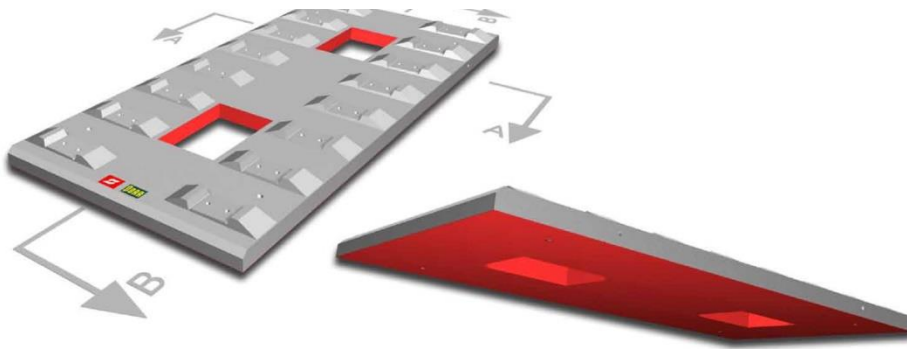


Abbildung 1-7: Gleistragplatte System ÖBB-Porr [23]

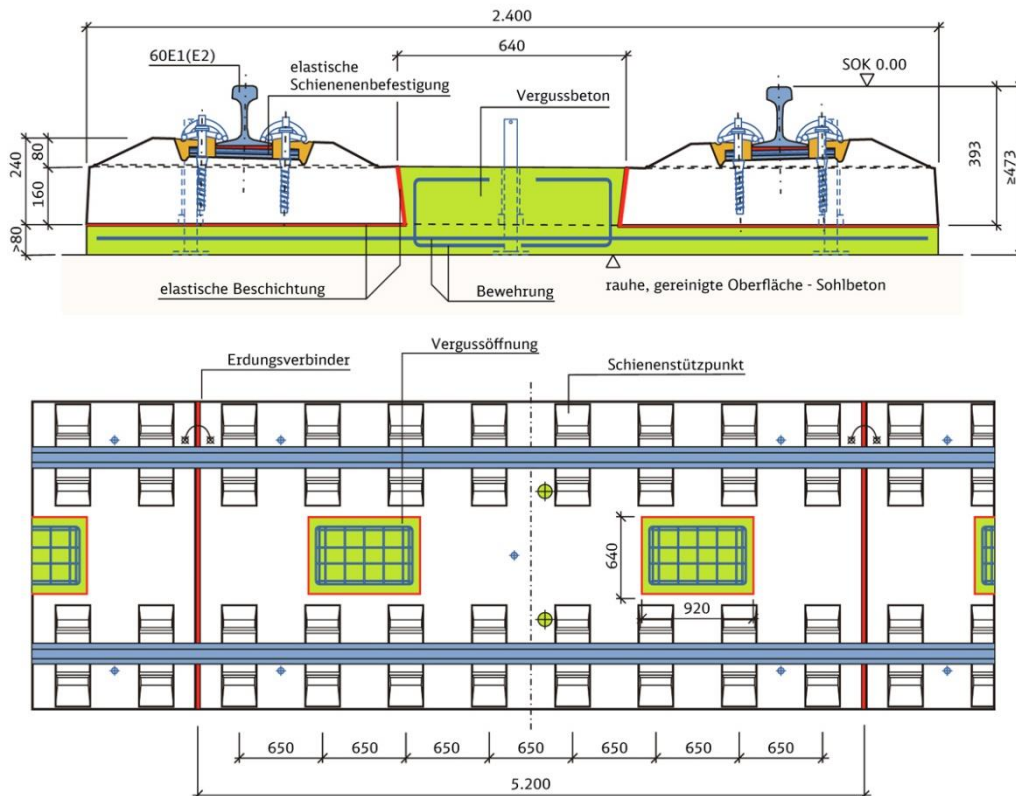


Abbildung 1-8: Systemskizze FF-System ÖBB-Porr [23]

Der Lastabtrag bei der FF ist in ihrer Art mit dem SchO ident, jedoch gleichmäßiger und homogener. Beim Überrollen eines Radsatzes wird durch das Einsinken der Schiene, was durch die elastische Zwischenlage ermöglicht wird, die Trägerwirkung in der Schiene aktiviert. Dadurch werden die Achslasten gleichmäßig auf die Stützpunkte verteilt und über die Fertigteilplatte, die elastische Trennschicht und den darunterliegenden Vergussbeton in den Unterbau bzw. in den Unterbau abgeleitet. Der große Vorteil der FF gegenüber dem SchO ist die gleichmäßige und flächige Lastableitung und die langlebige, dauerhafte exakte Gleislage. Aufgrund dieser vorteilhaften Eigenschaften treten kaum Abweichungen in Bezug auf die Soll-Lage auf, wodurch sich wiederum kaum negative Effekte in Hinblick auf die Schienen und den Fahrweg ergeben und der vorgegebene Fahrweg langfristig ohne bzw. mit geringem Erhaltungsaufwand in Betrieb verbleiben kann. [15, 16]

Bei Gegenüberstellung der FF mit dem SchO, wie in Abbildung 1-9, wird der o.a. flächige Lastabtrag deutlich. Ebenso wirkt sich dieser auf die Streuung der Schienenfußmittenspannungen und somit mit der Alterung und Langlebigkeit der Schienen bei sehr hohen Geschwindigkeiten aus (vgl. Abbildung 1-9). [15]

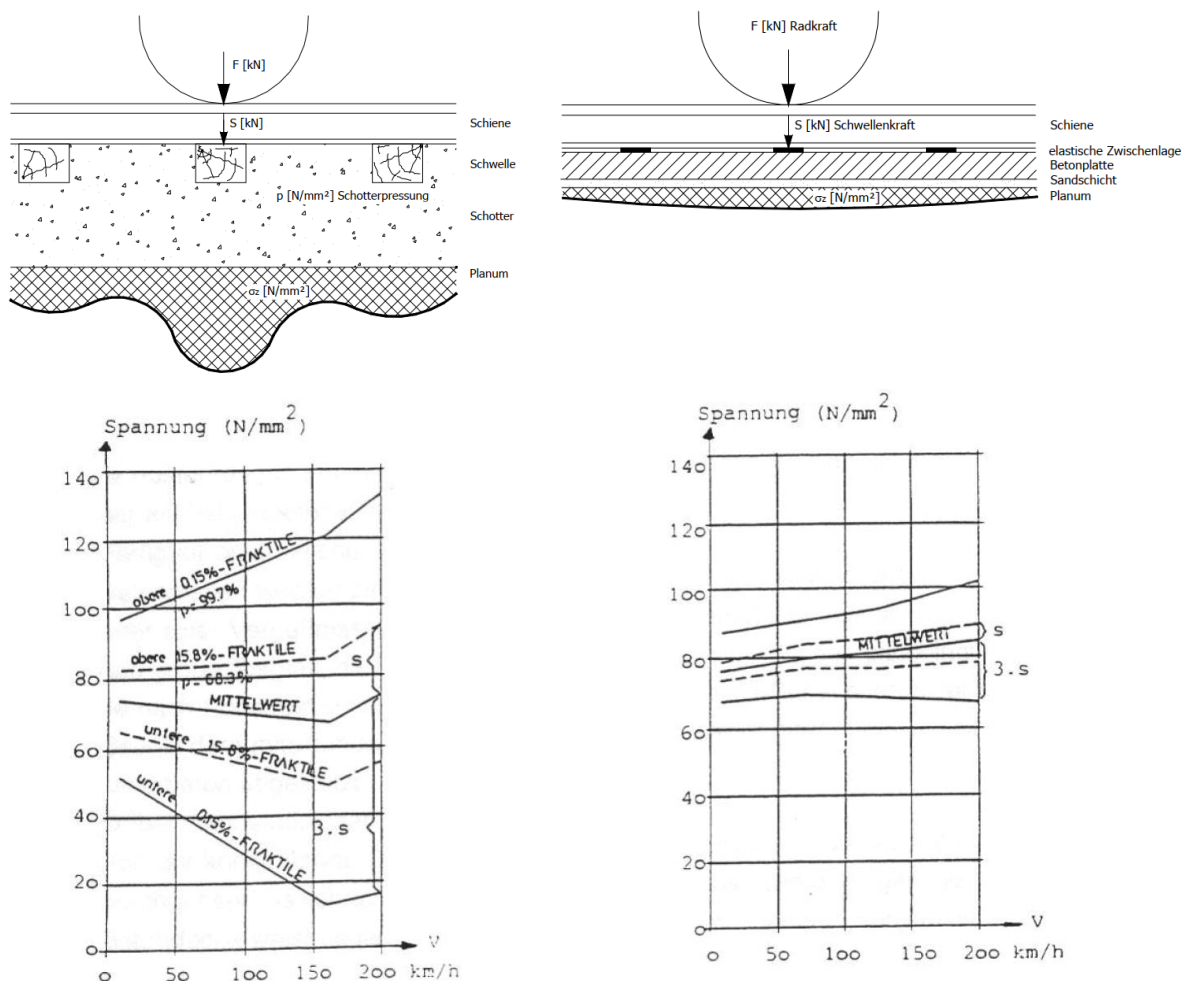


Abbildung 1-9: Vergleich des Lastabtrages von SchO (links) mit der FF (rechts) und der Schienenfußmittenspannung in Abhängigkeit mit der Geschwindigkeit [15]

Ausgehend von den nun genannten Ausführungen scheint die FF für den Laien das Ideal der Oberbauten zu sein. Dieser Schein trügt! Den vielen Vorteilen der langlebigen Spurführung und der optimalen Lastabtragung stehen, aus Sicht von Bahnunternehmen, auch Nachteile von hohen Herstellungskosten, sowie aufwändiger Herstellung gegenüber. Aus diesem Grund findet die FF vorwiegend in Tunneln und auf artreinen Hochgeschwindigkeitsstrecken Anwendung. Im Tunnel (Länge ≥ 500 m) sind vor allem Vorzüge in Hinblick auf den geringeren Tunnelquerschnitt, welcher aus der niedrigeren Konstruktionshöhe resultiert, zu vermerken. Auf den restlichen Strecken mit Mischbetrieb oder mäßigen Geschwindigkeiten wird aus betrieblicher und monetärer Sicht der SchO bevorzugt. [15, 16]

1.3.3 Hinweis Oberbauten

In obigen Abschnitten wurden die zwei grundlegenden Oberbausysteme ausgehend von der Historie über die Bestandteile, den Lastabtrag und ihr übliches Anwendungsgebiet erläutert. Bezüglich des gebräuchlichen Anwendungsgebiets ist festzuhalten, dass diese aus betrieblicher und eisenbahntechnischer Sicht absolut sinnvoll sind und deswegen derart verwendet werden. Die nachfolgenden Ausführungen und ökobilanziellen Bewertungen der Oberbausysteme werden sich jedoch nur auf die ökologische Betrachtung beschränken. Deshalb ist es schwierig bzw. kaum möglich Vergleiche zwischen FF und SchO zu führen.

1.4 Exkurs: Entwicklung der Nachhaltigkeit

Welche Bedeutung hat der nebelhafte Begriff der Nachhaltigkeit überhaupt? Erste Verwendungen des Begriffs der Nachhaltigkeit im deutschen Sprachraum können auf die Forstwirtschaft zurückgeführt werden. Der Pionier auf diesem Gebiet war Hannß Carl von Carlowitz, seiner Zeit Amtshauptmann zu Wolken- und Lauterstein, welcher im Jahr 1713 das Buch „Sylvicultura Oeconomica“ veröffentlichte. [2, S. 383, 24, S. 5-14]

Als Amtshauptmann war Carlowitz für die Bergwerke und Forste im besagten Gebiet zuständig. Durch seine einschlägigen Erfahrungen im Bereich der Forstwirtschaft, stellte Hannß Carl von Carlowitz fest, dass die deutschen Wälder sich in einem desaströsen Zustand befanden. Um diesem entgegenzuwirken, entstand der Grundsatz, dass auf lange Sicht nur so viel Holz geschlagen werden darf, wie nachwächst. Carlowitz erkannte bereits damals Zusammenhänge der Kreislaufwirtschaft, Ressourcenschonung, rationellen Einteilung, aber generell der Sparsamkeit und Effektivität. Die Problematik der Kahlschläge wurde von Carlowitz identifiziert und durch regelmäßige Durch- und Aufforstungsprogramme weitgehendst gelöst. Den lateinischen Begriff der „Oeconomia“, den er im Titel seines Buches verwendet, widerspiegelt die Erkenntnisse von Carlowitz und die bereits erkannten Zusammenhänge in Hinblick auf die heute bekannten Umweltfaktoren, sowie die ökonomische und soziale Sichtweise. [2, S. 383, 24, S. 5-14]

Heute ist der Begriff Nachhaltigkeit bzw. der englische Begriff sustainability geläufig und wird oftmals mit globaler Entwicklungspolitik in Zusammenhang gebracht. Der „Brundtland-Bericht“ gibt folgende Definition für den Terminus der Nachhaltigkeit: [2, S. 383-384]

„Eine nachhaltige Entwicklung entspricht den Bedürfnissen der heutigen Generation, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.“
[2, S. 384]

Diese Verantwortung bzw. dieses Ziel fand auch Zustimmung auf politischer Ebene und wurde 1992 durch die Vereinten Nationen (UN) als Leitgedanke aufgenommen und zehn Jahre später in Rio bestätigt, wo 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung, sogenannte Sustainable Development Goals (kurz SDGs) definiert wurden (siehe Abbildung 1-10). [2, S. 384, 4]

Die vereinbarten Bestrebungen sind somit für alle UN-Mitgliedsstaaten gültig und sollen bis zum Jahr 2030 entsprechend umgesetzt werden. [4]



Abbildung 1-10: Sustainable Development Goals SDGs [4]

Generell kann heute die Nachhaltigkeit in drei Dimensionen, welche die ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekte beinhaltet (vgl. Abbildung 1-11), differenziert werden. Diese Interpretationsweise, welches als angenommenes Standardmodell aufgenommen wurde, bedeutet, dass bei der Analyse der Nachhaltigkeit ökologische, ökonomische sowie soziale Aspekte berücksichtigt und quantifiziert werden müssen. Jedoch ist festzuhalten, dass die Metapher der 3 Säulen nicht unproblematisch ist, da nicht alle Säulen dieselbe Gewichtung besitzen. Zudem ist es möglich alle Säulen separat und unabhängig zu entwickeln bzw. zu betrachten. [25, S. 384-385]



Abbildung 1-11: 3 Säulen der Nachhaltigkeit [25]

Dennoch hat sich durch den breiten Zuspruch das Dreisäulenmodell etabliert und findet auch in der Ökobilanzierung bzw. bei der lebenszyklusbasierten Nachhaltigkeitsanalyse Anwendung. Demnach wird die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment – kurz LCA) um die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing – kurz LCC) und die produktbezogene Sozialbilanz (societal LCA – kurz SLCA) erweitert. [25, S. 385-386]

1.5 Nachhaltigkeit – Bedeutung für das Bauwesen

Auch in der Baubranche ist der Nachhaltigkeitsgedanke angekommen. Der Ruf nach einer nachhaltigen Entwicklung aus ökologischer, ökonomischer und sozialer Sicht wird immer lauter. Gerade die Energieeffizienz ist seit einigen Jahren das ökologische Kriterium bei Hochbauten im Neubau und im Bestand und fokussiert sich hierbei meist auf den baulichen Wärmeschutz, auf die wärme- und lufttechnische Anlagen, die Warmwasserbereitstellung und Nutzung von erneuerbaren Energien. [26, S. 279-286]

Jedoch rückte die letzten Jahre die gesamthafte Betrachtungsweise samt dem Lebenszyklus (siehe Abbildung 1-12) nach dem Grundsatz „cradle to grave“ mehr in den Vordergrund. Die reinen ökologischen Aspekte wurden durch die ökonomischen und sozialen Blickwinkel erweitert. Für das Bauwesen bedeutet dies, dass sich gerade die Ansprüche der Nutzer*innen wie bspw. die Standortwahl, hohe Lebensqualität, Verwendung von nachhaltigen Baumaterialien, Klimaneutralität, innovative Technologien etc. gewandelt und einen anderen Stellenwert bekommen haben. Die zukünftige Bauwirtschaft muss nun einerseits den Anforderungen der Nutzer*innen (siehe Abbildung 1-13) gerecht werden und befriedigen, aber auch aus Verantwortung zur Umwelt sich den neuen Aufgaben annehmen. [26, S. 279-286]

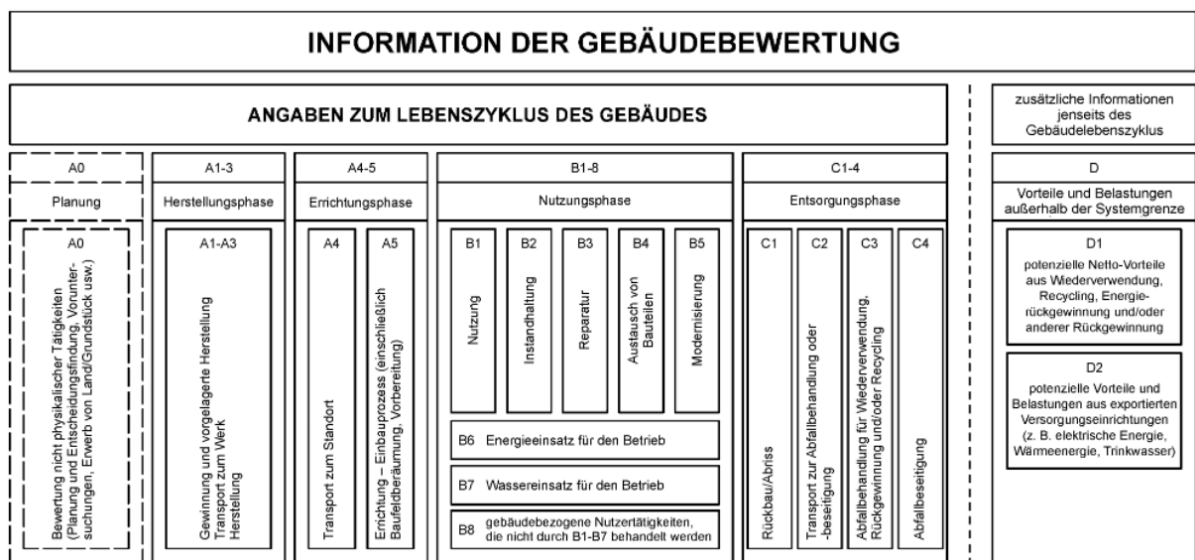


Abbildung 1-12: Lebenszyklusphasen eines Bauwerks [27]

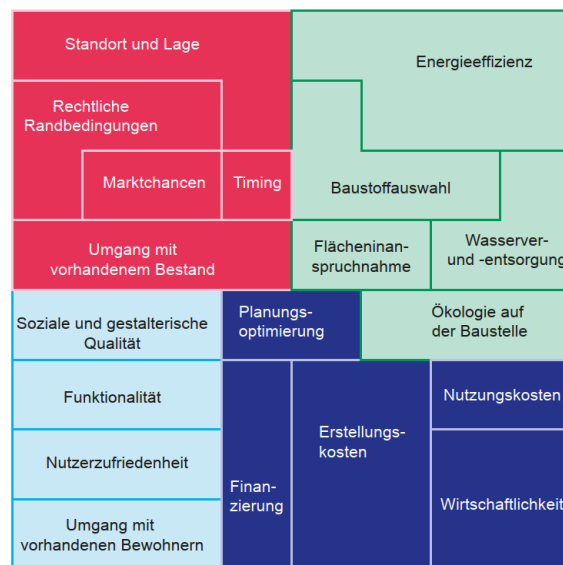


Abbildung 1-13: Übersicht von Kriterien für nachhaltiges Planen und Bauen [26]

Vor allem hat nachhaltiges Bauen viele Vorteile. Es treten zwar durch die Verwendung von nachhaltigen Baustoffen oftmals höhere Baukosten auf, jedoch amortisieren sich diese Aufwendungen über den Lebenszyklus meist recht schnell und man wird mit geringen Betriebskosten bzw. niedrigen laufenden Kosten belohnt. Außerdem steigern „Green-Buildings“ die Wohn- und Arbeitsqualität und vitalisieren das Stadtbild und schützen die Natur. [26, S. 279-286, 28]

Doch wie funktioniert nachhaltiges Bauen? Nachhaltig Bauen bedeutet, dass das gesamte Bauwerk begutachtet, jedes Detail/ jedes Bauprodukt analysiert und über den gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffbeschaffung über die Errichtungs- und Nutzungsphase bis zur Entsorgung und Beseitigung des Objekts betrachtet wird und dadurch in jeder Lebenszyklusphase Ressourcen und Energiemengen optimal eingesetzt, reduziert und eingespart werden können. [28, 29]

Gerade Building Information Modelling (BIM)² dient hier als wichtiges und zukünftiges Hilfsmittel bei der Integration des gesamten Lebenszyklus von Bauwerken im digitalen Gebäudemodell und soll somit das Bauwerk von der Projektidee bis zum Abbruch „begleiten“. Dadurch lassen sich einerseits langfristig Kosten einsparen (vgl. Abbildung 1-14), aber vor allem alle Prozesse (bspw. Planungs-, Bau- und Instandhaltungsprozesse) einfach managen, abbilden, koordinieren bzw. verbessern. [26, S. 279-288, 28, 29]

² Unter BIM wird die Gebäudedatenmodellierung mittels entsprechender Software, welche auf eine optimierte Planung und Ausführung abzielt, verstanden. Hierbei wird ein intelligentes digitales Gebäudemodell erstellt, welches für alle Projektbeteiligten (Architektur, Statik, Bauherren, Haustechniker, Facility Manager uvm.) zur Verfügung steht und mit allen wesentlichen Daten und Informationen bestückt wird. Somit kann gemeinsam an einem digitalen Bauwerksmodell gearbeitet werden, was ein intelligentes, effizientes und kostensparendes Arbeiten ermöglicht. [30, 31]

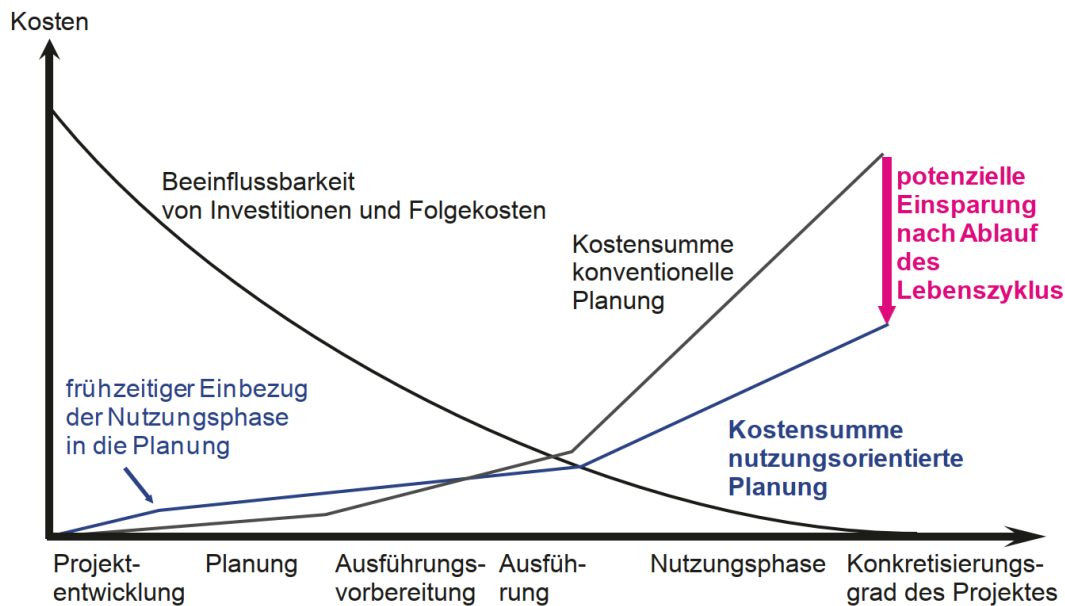


Abbildung 1-14: Kosteneinsparung durch BIM [26]

Nachhaltiges Bauen bedeutet jedoch nicht nur alles auf „Öko“ zu trimmen, sondern die „Green Buildings“ „smart“ zu gestalten. Die „smarten“ und intelligenten Gebäude/ Bauwerke beinhalten zunehmend Systeme und Innovationen für die Gebäudeautomation, welche die Haustechnik optimal ansteuern und somit Ressourcen schonen, das Klima für die Nutzer*innen verbessern und somit den Komfort, die Sicherheit, aber auch die Unterhaltung und Kommunikation maximieren und unterstützen. Die Lebensqualität wird somit wesentlich gesteigert. [26, S. 279-288, 28, 29]

Ein nachhaltiges Gebäude muss demnach den ökologischen, ökonomischen, soziokulturellen und nutzerspezifischen Anforderungen genügen. Ob ein Bauwerk diesen Anforderungen genügt, kann nicht pauschal quantifiziert werden, da jedes Gebäude für sich individuell ist und einem entsprechenden Maßnahmenbündel bedarf. Um die Nachhaltigkeit von Gebäuden nach gewissen Standards zu bestimmen, wurden in den letzten 20 Jahren viele verschiedenste Bewertungssysteme, Nachhaltigkeitszertifizierungen und Green Buildings Labels entwickelt. [26]

Als Vorreiter kann das englische System BREEAM, welches im Jahre 1990 eingeführt wurde, genannt werden. Mit BREEAM wurden bereits über 500.000 Objekte bewertet und es diente für weitere Labels aus anderen Ländern als Anhaltspunkt bzw. „Vorlage“. Mittlerweile haben sich weltweit etwa zehn Bewertungssysteme etabliert und finden national bzw. international Anwendung. Zu nennen sind bspw.: HQE (Frankreich), Green Star (Australien, Neuseeland, Südafrika), CASBEE (Japan), LEED (USA), DGNB (Deutschland), ÖGNB (Österreich) uvm. [26, S. 23-28]

Aber nicht nur auf dem Gebäudesektor spielt die Nachhaltigkeit eine wesentliche Rolle, auch im Infrastrukturbereich findet die ökologische, ökonomische und soziale Bewertung

Anwendung und wird angesichts der Erwartungen in Hinblick auf Klimaanpassung, Energiewende, Mobilitätswende, Dekarbonisierung etc. in Zukunft noch eine bedeutendere Rolle spielen. Die Nachfrage nach einer nachhaltigen Infrastruktur ist höher als je zuvor. Die nachhaltige Infrastruktur von heute spannt thematisch den Bogen von den traditionellen Berührungspunkten wie Transport und Ressourcenverbrauch zu den Fragestellungen der Umweltqualität und menschlichen Gesundheit. Dadurch werden die Infrastrukturbetreiber, Ingenieur*innen, Bauunternehmen usw. vor mehrere Herausforderungen gestellt. [32–34]

Im Gegensatz zum Hochbau erlangten Nachhaltigkeitsanalysen bzw. Bewertungssysteme/Labels im Infrastrukturbereich erst viel später eine gewisse Bedeutung und Anwendung. Als erstes Produkt am Markt kann das englische Infrastrukturbewertungssystem CEEQUAL aus dem Jahr 2003 genannt werden. Wobei zu erwähnen ist, dass sich dieses System mehr oder minder nur auf die ökologische Sphäre beschränkt hat. Über die Jahre kamen in den USA, Deutschland und Australien noch ein paar wenige weitere Bewertungssysteme hinzu, jedoch sind diese in ihrer Anzahl weitaus nicht so zahlreich wie die Pendants aus dem Hochbau. Aus diesem Grund wird die Nachhaltigkeitsbewertung des Infrastrukturbaus stets in Forschungen bzw. Forschungsprojekten behandelt, in die einschlägigen Normen des europäischen Komitees für Normung (Comité Européen de Normalisation – kurz CEN) integriert, neue Bewertungstools entwickelt und die bestehenden Bewertungssysteme optimiert. Dadurch soll langfristig eine nachhaltige Infrastruktur gewährleistet werden. [34]

Nachfolgend werden die aktuellen und einschlägigen Normen des europäischen Komitees CEN/TC 350 etwas näher beschrieben.

1.6 Nachhaltigkeitsbewertung nach CEN/TC 350

Das europäische Komitee für Normung (CEN) ist eine private non-profit Organisation und eine der drei großen Normungsorganisationen in Europa. Insgesamt arbeiten rund 60.000 Experten in verschiedensten Normungsgruppen an europäischen Normen für alle technischen Bereiche für etwa 490 Millionen Menschen aus 34 Mitgliedsstaaten. Ziel der CEN ist es, die europäische Wirtschaft zu fördern, das Wohlbefinden der Bürger zu gewährleisten und den Umweltschutz voranzutreiben. [35]

Das CEN/TC 350 stellt hierbei einen technischen Ausschuss für die Entwicklung der standardisierten Methoden zur Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte von neuen und bestehenden Bauten und die im Rahmen der UN-Ziele für die nachhaltige Entwicklung und der Kreislaufwirtschaft festgelegten Vereinbarungen dar. Die Hauptaufgaben liegen vor allem bei der: [36]

- Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauarbeiten,
- Bewertung der ökologischen, ökonomischen und sozialen Leistungsfähigkeit von Gebäuden und Infrastrukturbauten,
- sowie der Bereitstellung von Umweltinformationen für Bauprodukte. [36]

Das Arbeitsprogramm der CEN/TC 350 stellt hierzu folgende Normen (siehe Abbildung 1-15) für die Bewertung der Nachhaltigkeit zur Verfügung.

| Ebene des Rahmen-dokuments | Bewertung der Nachhaltigkeit | | | Technische Eigenschaften | Funktionalität |
|--------------------------------------|---|--|---|---|---|
| | | prEN 15643 (Überarbeitungen von EN 15643-1...5) Nachhaltigkeit von Bauwerken — Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken | | | Planung der Lebensdauer – Grundlagen ISO 15686-1 |
| Bauwerks-ebene | prEN 15978-1 (EN 15978 rev) Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden | prEN 15978-2 (EN 16309 rev) Bewertung der sozialen Qualität von Gebäuden | prEN 15978-3 (EN 16627 rev) Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden | EN ISO 52000 Energieeffizienz von Gebäuden | |
| | prEN 17680 Bewertung des Potentials zur nachhaltigen Sanierung von Gebäuden | | | | |
| | prEN 17472 Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken | | | | |
| Produkt-ebene | EN 15804 + A2 Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte | | | Verfahren zur Voraussage der Lebensdauer ISO 15686-2 Rückmeldung aus der Praxis ISO 15686-7 Referenznutzungsdauer und Bestimmung der Nutzungsdauer ISO 15686-8 | |
| | prEN 15942 rev Kommunikationsformate zwischen Unternehmen | | | | |
| | prEN 15941 rev Datenqualität | | | | |
| | prEN 17672 Kommunikationsformate von Unternehmen an Verbraucher | | | | |
| | prEN ISO 22057 Datenvorlagen für die Verwendung von EPDs für Bauprodukte in BIM | | | | |
| | CEN/TR 16790 Leitfaden für EN 15804 | | | | |
| CEN/TR 17005 Zusätzliche Indikatoren | | | | | |

Abbildung 1-15: Arbeitsprogramm der CEN/TC 350 [37]

Die Rahmenbedingungsnorm »ÖNORM EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken« (in Abbildung 1-15 gelb hinterlegt) gibt einen guten Überblick über die Inhalte und den Umfang einer Nachhaltigkeitsbewertung nach CEN/TC 350 und beschreibt die Funktionsweise einer solchen Quantifizierung. Nachfolgend wird diese in aller Kürze präsentiert und die generellen Arbeitsschritte zusammenfassend erläutert. [37]

Wie bereits zuvor des Öfteren erwähnt, stützt sich auch die Nachhaltigkeitsbewertung der CEN auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit und bewertet diese anhand von quantitativen Indikatoren, Szenarien und eines funktionellen Äquivalents. Wobei die Ergebnisse Werte zu diesen unterschiedlichen Arten von Indikatoren zu den entsprechenden Szenarien und Phasen des Lebenszyklus (siehe Abbildung 1-12) liefern und so eine transparente Vergleichbarkeit von Bewertungsergebnissen ermöglichen. [37]

In einem ersten Schritt wird bei der Nachhaltigkeitsbewertung der generelle Zweck der Bewertung festgelegt. Zudem wird ein funktionales Äquivalent, welches die technischen und funktionellen Eigenschaften des Bauwerks darstellt, definiert. D.h., das Bauwerk wird in einem Beschreibungsmodell im Lastenheft festgelegt. Anhand des funktionalen Äquivalents lassen sich spätere Vergleiche von Bewertungsergebnissen durchführen. Die Abbildung 1-16 stellt die

erforderlichen Eigenschaften bzw. Informationen dar, welche für das funktionale Äquivalent und die spätere Kommunikation ausschlaggebend sind. [37]

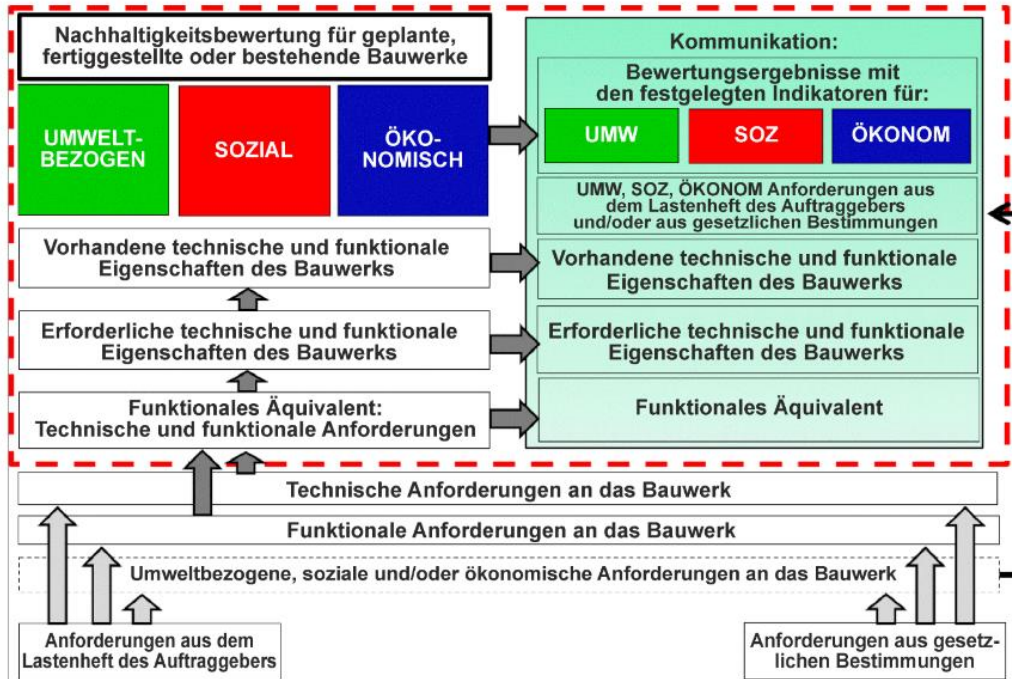


Abbildung 1-16: Konzeption der Nachhaltigkeitsbewertung [37]

Die weitere Vorgehensweise der Bewertung stützt sich auf die Festlegung von Szenarien in den Lebenszyklusphasen für das Bauwerk und der Zuordnung dieser. D.h., das Bauwerk und die Lebenszyklusphasen werden quantifiziert und Mengen und Daten zugeordnet. Mit der Auswahl bspw. der Umweltdaten etc. können in einem nächsten Schritt bspw. die Umweltindikatoren berechnet werden, welche abschließend in einem Bericht kommuniziert werden und ggf. für eine Überprüfung zur Verfügung stehen. [37]

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Nachhaltigkeitsbewertung für alle drei Säulen diesem Schema folgt und einen ähnlichen Ablauf aufweist. Die Abbildung 1-17 zeigt den Ablauf der Bewertung nochmals in bildlicher Form am Beispiel der umweltbezogenen Qualität.

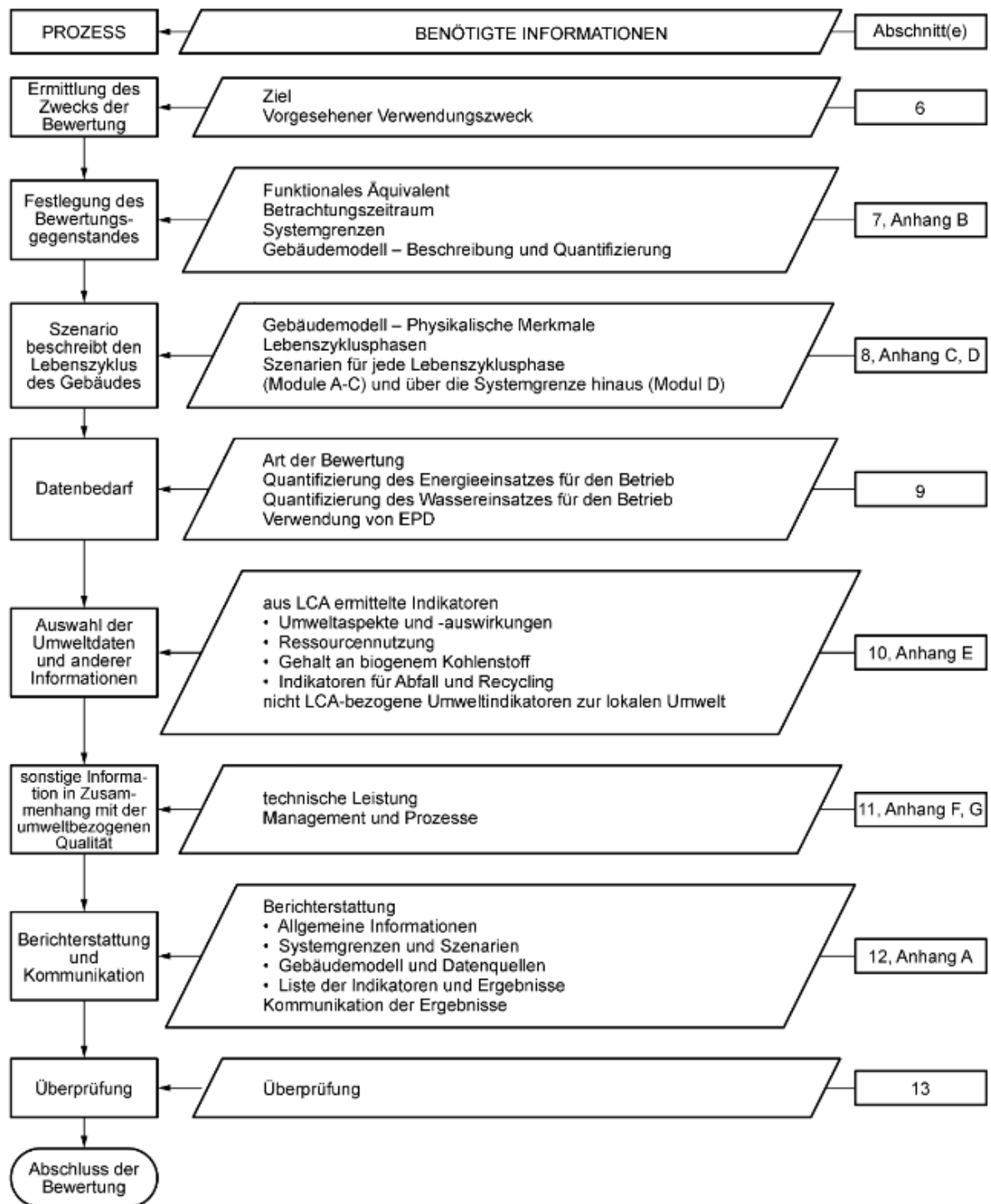


Abbildung 1-17: Ablaufdiagramm des Bewertungsprozesses der umweltbezogenen Qualität [27]

2 Die Ökobilanz

2.1 Allgemein

Das Werkzeug der Ökobilanz bzw. das Life Cycle Assessment (LCA) stellt eine international genormte Methode dar, um Produkte und Produktsysteme in Hinblick auf Umwelteffekte über den Lebenszyklus zu betrachten. Durch das anwachsende Bewusstsein in Bezug auf die Bedeutung des Umweltschutzes nahm die Entwicklung der Methoden in den letzten Jahren und Jahrzehnten zu. Die nun entwickelte Methodik der Ökobilanzierung bietet ein transparentes, prüfbares und verständliches System, um Umweltwirkungen zu beschreiben und zu bewerten. Um der Ökobilanz ein einheitliches Erscheinungsbild bzw. einen standardisierten Aufbau zu geben, hat die Internationale Organisation für Normung, kurz ISO, die Grundsätze, Rahmenbedingungen und Vorgehensweise in Form von zwei anerkannten und mittlerweile berühmten Normen in ihr Normenprogramm aufgenommen. [1, 2, 38]

Die ISO 14040 beschreibt hierbei die allgemeinen Grundsätze und Rahmenbedingungen, sowie den grundsätzlichen Aufbau der Ökobilanz. Die ISO 14044 gibt weitere Auskünfte und Festlegungen über Anforderungen und Anleitungen zur Ökobilanz. [1, 38]

Allgemein kann die Ökobilanz verschiedenste Anwendungsmöglichkeiten besitzen. Beispielsweise kann die Ökobilanz Optimierungspotentiale zur Verbesserung von Umweltwirkungen von Produkten in verschiedensten Lebenszyklusphasen darlegen, Informationen für Entscheidungsträger in Industrie, Regierungs- oder Nichtregierungsorganisationen liefern, bei der Auswahl von relevanten Umweltindikatoren unterstützen und bei der Umweltkennzeichnung von Produkten Ergebnisse liefern. [38]

Wie bereits unter »1.6 Nachhaltigkeitsbewertung nach CEN/TC 350« ausgeführt, stellt die Ökobilanz in der Modellierung alle Umweltwirkungen im gesamten Lebenszyklus eines Produkts bzw. Produktsystems dar. Sprich, alle Umweltauswirkungen, Energieflüsse, Herstellungsprozesse etc. können einer Lebenszyklusphase zugeordnet werden und werden von der Wiege bis zur Bahre (eng. cradle to grave) erfasst und beurteilt. [1, 38]

2.2 Phasen einer Ökobilanz (LCA)

Die ISO 14040 definiert den Aufbau einer Ökobilanz anhand von vier wesentlichen Phasen (vgl. Abbildung 2-1), welche in Korrelation untereinander stehen [38].

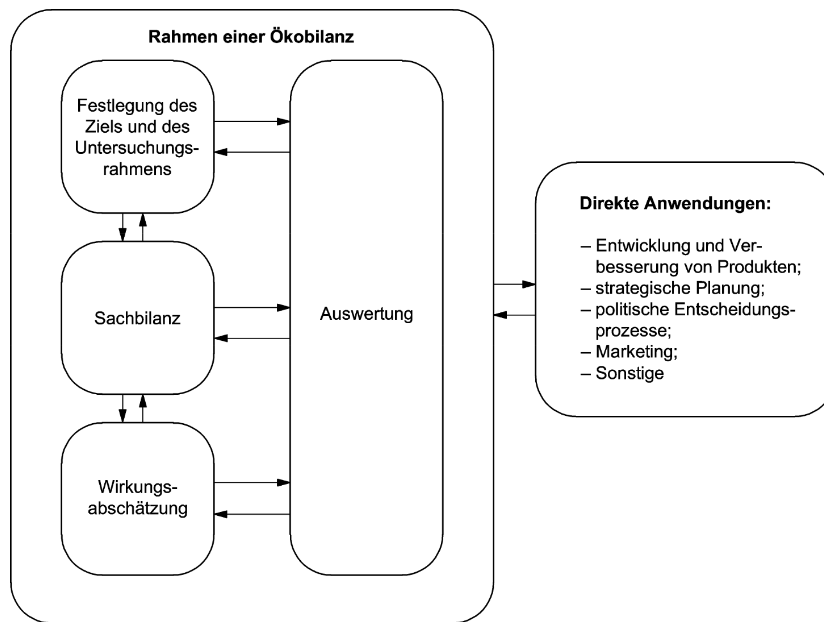


Abbildung 2-1: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040 [38]

Im Weiteren werden die vier Phasen und wesentliche Begriffe näher beschrieben bzw. definiert.

2.2.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Zieldefinition legt den Untersuchungsgegenstand in der ersten Phase fest und beschreibt diesen. Wobei unter dem Ziel die gewollte Anwendung, Gründe für die Durchführung der Studie oder bspw. die angesprochene Zielgruppe verstanden wird. Zudem wird bei der Zielfeststellung definiert, ob die gewonnenen Ergebnisse für eine Verwendung für eine Veröffentlichung bspw. für spätere Vergleiche eingesetzt werden dürfen oder können. [1, 38]

Der Untersuchungsrahmen enthält Punkte wie:

- das zu befundende Produktsystem
- die Funktion(en) des Produktsystems
- die funktionelle Einheit (fE)
- die Systemgrenze
- etwaige Allokationsverfahren
- Angaben zu den ausgewählten Wirkungskategorien
- die Methodik für die Wirkungsabschätzung
- Anforderungen an die Daten
- getroffene Annahmen
- usw. [38]

Die Beschreibung des Ziels und des Untersuchungsrahmens ist essenziell um die Breite, Tiefe und die entsprechenden Komponenten der ökobilanziellen Bewertung und Betrachtung widerspruchsfrei, transparent und hinreichend darzustellen [1, 38].

2.2.1.1 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit (fE) ist Teil der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen und legt die Quantifizierung der angegebenen Funktion des Produktes bzw. Produktsystems fest. D.h., es wird ein Bezug hergestellt, auf den sich die Inputs und Outputs stützen. Die funktionelle Einheit stellt somit die Bezugsgröße (bspw. 100 m Gleis) aller Energieflüsse, Emissionen und Ergebnisse dar. Zudem ist diese funktionelle Einheit für etwaige spätere Ergebnisvergleiche entscheidend. Die funktionelle Einheit ist somit Bezugs- und Vergleichsgröße und das Kernstück einer Produktökobilanz, wie sie hier vorliegt. [1, 38]

In Hinblick auf spätere Vergleiche scheint es auch als sinnvoll, die Qualität des Produkts in die funktionelle Einheit aufzunehmen [1].

2.2.1.2 Produktsystem und Systemgrenzen

Die Modellierung einer Ökobilanz wird mittels Produktsystemen, welche die wichtigsten Funktionen des betrachteten Produkts über den gesamten Lebenszyklus abbilden, realisiert. D.h., die wesentlichen Spezifikationen und Eigenschaften eines Produktsystems werden durch seine Funktionen determiniert und können nicht unter alleiniger Betrachtung des Endproduktes verifiziert werden. Somit wird das Produktsystem bspw. im vorliegenden Fall durch alle Funktionen, die für die Sicherstellung des Fahrweges der Eisenbahn beitragen, festgelegt. [1, 2, 38]

Um Inputs und Outputs eines Produktsystems leichter identifizieren zu können, erfolgt eine Unterteilung in Prozessmodule (kleinste Einheit der Bilanzierung), welche durch ihre Produktflüsse miteinander verknüpft sind. Die Festlegung, welche Prozessmodule untersucht werden, wird über die Systemgrenze abgesteckt und ist entscheidend für den Detaillierungsgrad der Modellierung der Ökobilanz und die Erreichung des Studienziels. Im Idealfall ist die Tiefe des Detaillierungsgrad so gewählt, dass die betrachteten Flüsse als Elementarflüsse³ modelliert werden. [2, 38]

Die Systemgrenze selbst sollte so gewählt sein, dass mehrere Lebenswegabschnitte, Prozessmodule und Flüsse berücksichtigt werden. Des Weiteren sollte die Systemgrenze eine Abgrenzung in Hinblick auf den geographischen, zeitlichen und technischen Geltungsbereich bieten. [1, 2, 38]

Unter gewissen Voraussetzungen können im Produktsystem Lebenswegabschnitte weggelassen werden, wenn bspw. eine erste Abschätzung ergibt, dass der Beitrag (Masse, Energie und Umweltrelevanz) am Gesamtsystem sehr gering ist. Dennoch ist zu beachten, dass beim Vergleich von Studien keine Asymmetrie der Systeme bzw. der Ergebnisse aufkommt, wenn Abschnitte weggelassen werden. [2, S. 28]

³ Ein Elementarfluss beschreibt einen Stoff oder eine Energie, die dem Produktsystem/ Prozess zugeführt wird bzw. diesen verlässt und ohne Behandlung vom Menschen der Umwelt entnommen bzw. dieser Stoff abgegeben wird. [38]

Im Allgemeinen wird das Produktsystem anhand der Prozessmodule als Systemfließbild (oft auch als „Produktbaum“ bezeichnet) beschrieben bzw. abgebildet [2, S. 28]. Die ÖNORM EN ISO 14040 gibt hierbei zwei Beispiele:

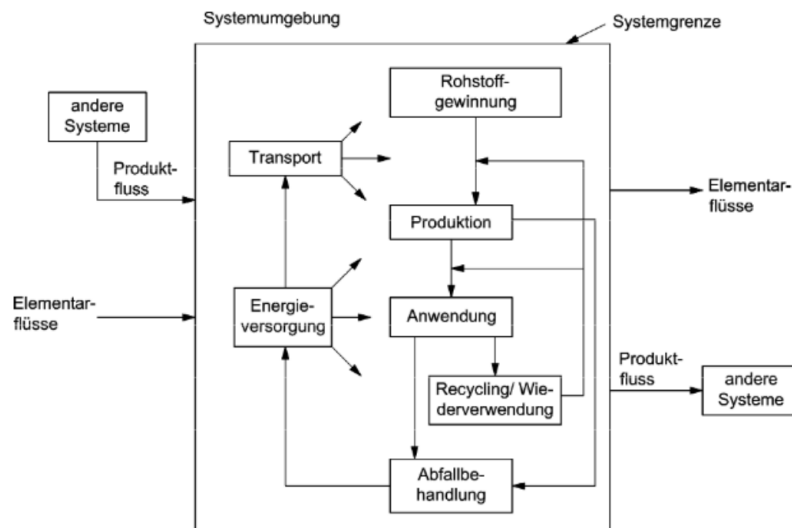


Abbildung 2-2: Beispiel eines Produktsystems für eine Ökobilanz [38]

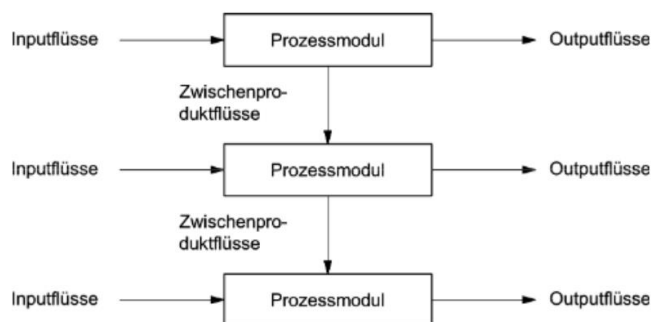


Abbildung 2-3: Beispiel für einen Satz von Prozessmodulen innerhalb eines Produktsystems [38]

2.2.2 Sachbilanz (LCI)

Die Sachbilanz (eng.: Life Cycle Inventory, kurz: LCI) wird oftmals auch als zweite Phase der Ökobilanzierung bezeichnet und umfasst die Arbeitsschritte der Datenerhebung und Berechnung der Input- und Outputflüsse. Bei den Berechnungsverfahren werden die ausschlaggebenden Daten auf die einzelnen zuvor definierten Prozessmodule und auf den Referenzfluss der funktionellen Einheit quantifiziert. Um diese Inputs und Outputs einfach abbilden zu können, wird wie bereits beim Produktsystem, und aufbauend auf diesem, ein Systemfließbild je Prozessmodul erstellt. Dieses Systemfließbild (vgl. Beispiel in Abbildung 2-4) besteht abermals aus Kästchen, in denen die verstrickten Prozesse aufgeführt und entsprechend der funktionellen Abhängigkeiten verknüpft sind. [1, 2, 38]

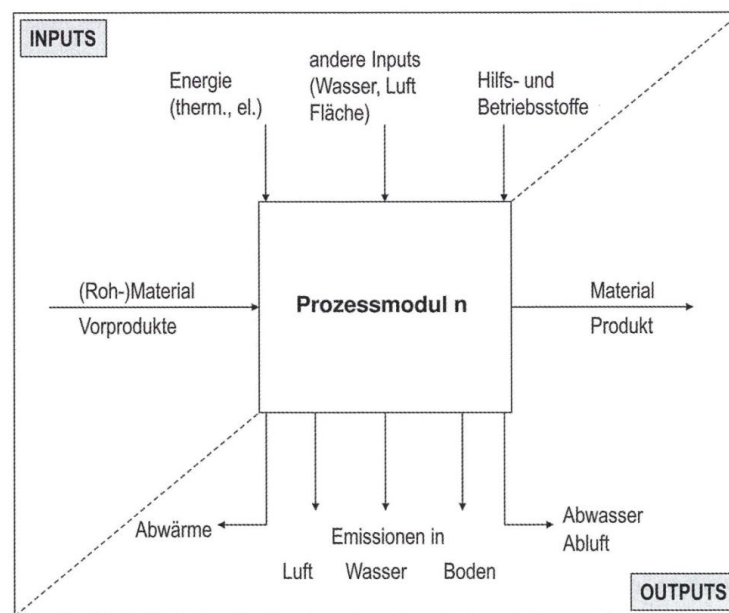


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Systemfließbildes eines Prozessmoduls [2]

Entscheidend für die Ergebnisse der Prozessmoduldaten sind die erhobenen Daten und die Detaillierung dieser. Die Daten können bspw. als Primärdaten aus Erhebungen von Firmen etc., aus generischen Daten⁴ aus veröffentlichten Quellen bzw. Datenbanken oder aus Abschätzungen stammen. Aufgrund der Tatsache, dass die Ergebnisse der Ökobilanz gänzlich von der Herkunft und der Datenqualität abhängig sind, ist eine entsprechende Datenvalidierung bzw. Datenprüfung erforderlich, bevor es zur Berechnung kommt. [2, 38, 39]

Tritt der Fall ein, dass ein Prozess nicht bloß ein Produkt, sondern mehrere Produkte oder Zwischenprodukte erzeugt, wird es notwendig Allokationsverfahren anzuwenden. Es ist dann von sogenannten Mehrprodukt- oder Koppelprozessen die Rede. Unter Allokation wird die anteilmäßige Zuweisung/ Zuordnung der Flüsse und Emissionen der Koppelprodukte verstanden. In der Realität bringen Betriebsabläufe selten einen einzigen Output hervor und bedürfen deshalb einer Allokation. [1, 2, 38, 39]

2.2.3 Wirkungsabschätzung (LCIA)

Ausgehend der berechneten Ergebnisse aus der Sachbilanz erfolgt in der dritten Ökobilanz-Phase die sogenannte Wirkungsabschätzung (eng.: Life Cycle Impact Assessment, kurz: LCIA). Die Wirkungsabschätzung beurteilt anhand dieser meist unübersichtlichen Sachbilanzergebnisse Umweltaspekte und potentielle Umweltwirkungen und bringt die Ergebnisse für die Leser*in in eine gut handzuhabende Art und Weise. D.h., es werden die Sachbilanzdaten mit den Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren vernetzt. [2, 38]

Im ersten Schritt der Wirkungsabschätzung erfolgt die Auswahl der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle. Unter Einhaltung der bereits definierten

⁴ Unter generischen Daten werden Daten verstanden, welche nicht spezifisch erhoben bzw. ermittelt wurden. Es handelt sich hierbei vielmehr um Mittelwerte oder repräsentative Einzelwerte. [2, S. 133]

funktionellen Einheit werden die entsprechenden Wirkungskategorien und deren zugehörigen Indikatoren ausgewählt. Wirkungskategorien können bspw. die: Humantoxizität, Ökotoxizität, Eutrophierung, Ozonbildung, Ressourcenbeanspruchung, Treibhauseffekt, Versauerung etc. sein. [2, 39]

Im nächsten Schritt werden die Sachbilanzergebnisse klassifiziert und den Wirkungskategorien zugeordnet (siehe Abbildung 2-5). Die nachfolgende Charakterisierung stellt das Kernstück der Wirkungsabschätzung dar. Es werden hierbei die Indikatorwerte berechnet, wobei die Berechnung einerseits die Umwandlung der Sachbilanzergebnisse in gemeinsame Einheiten (z.B.: kg CO₂-Äquivalente, vgl. Abbildung 2-5) und andererseits die Zusammenfassung der umgewandelten Ergebnisse innerhalb der gleichen Wirkungskategorie beinhaltet. Bei dieser Überführung werden sogenannte Charakterisierungsfaktoren verwendet. Das Endergebnis der Charakterisierung ist ein numerischer Indikatorwert. [2]

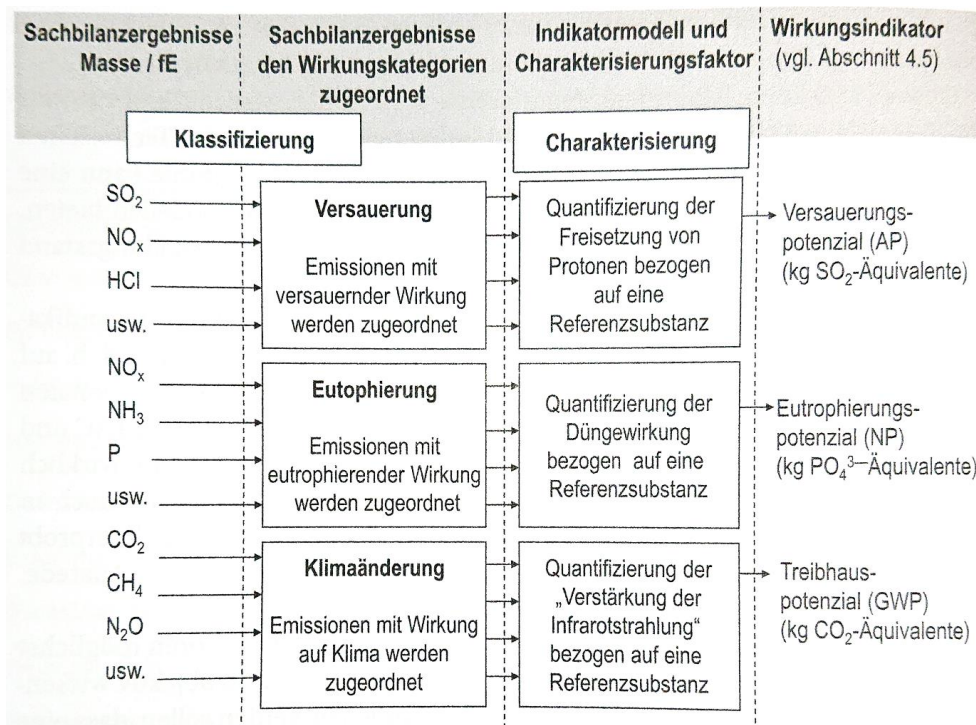


Abbildung 2-5: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung der Wirkungsabschätzung [2]

2.2.4 Auswertung

Die Auswertung bildet die abschließende vierte Phase einer Ökobilanzierung und dient der Ergebnispräsentation ausgehend der Resultate der Sachbilanz bzw. der Wirkungsabschätzung, woraus entsprechende Schlussfolgerungen gezogen und mögliche Empfehlungen formuliert werden können [2].

In diesem Abschnitt der Ökobilanz soll nochmals die Zielsetzung der Untersuchung, sowie die signifikanten Erkenntnisse und Randbedingungen kritisch reflektiert, transparent, lesbar und nachvollziehbar ausgearbeitet werden. Zudem soll die Interpretation eine Beurteilung der Stabilität der Wirkungsbilanz und deren Ergebnisse anhand von Sensitivitätsanalysen zulassen

bzw. eine Einschätzung dazu enthalten, um die Unsicherheit der Ergebnisse beurteilen zu können. [1, 2, 39]

Die Abbildung 2-6 zeigt nochmals die Bestandteile der Auswertungsphase in Abhängigkeit der anderen Phasen der Ökobilanz bildlich.

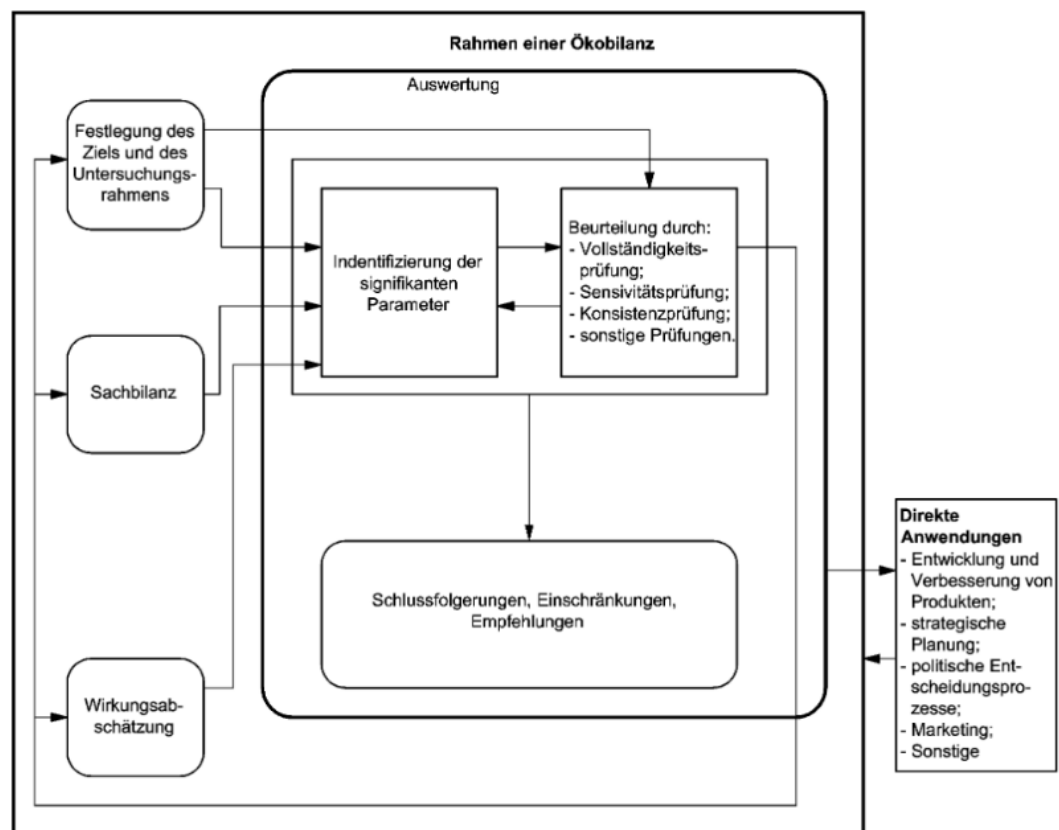


Abbildung 2-6: Die Auswertungsphase und die Beziehung zu den anderen Phasen der Ökobilanz [39]

3 Untersuchte Oberbauten

Im Folgenden werden die untersuchten Oberbauten beschrieben und die jeweiligen Merkmale erläutert. Es werden in der nachfolgenden Ökobilanz am Brenner Basistunnel drei verschiedene besohlte Betonschwellen und ein Feste Fahrbahn-Plattensystem analysiert. Die Schienenbefestigungen bzw. weitere Komponenten werden ebenso beschrieben.

3.1 Schotteroberbauten

3.1.1 Analyse 1: Betonschwelle K1

Die Schwelle K1 ist eine besohlte Monoblock-Spannbetonschwelle, welche im Netz der ÖBB häufig zur Anwendung kommt. Laut dem ÖBB-Regelwerk 07.02.01 sind bei Neulage von Strecken mit höherem Rang die Schwellen K1 bzw. die nachfolgend beschriebene L2 zu verwenden. [21, 40]



Abbildung 3-1: Betonschwelle K1 [41]

Die Betonschwelle K1 weist eine Länge von 2,6 m und eine Gesamtmasse von 282 kg auf und ist für Schienenfußbreiten von 150 mm und 125 mm geeignet. Die Schwelle weist Vorteile wie geringe Schotterbelastung und einen erhöhten Querverschiebewiderstand durch die starke Taillierung auf.

Auf höherrangigen Strecken ist die Monoblockschwelle üblicherweise mit der Schienenbefestigung Vossloh W14 und einer elastischen Schwellenbesohlung, welche den Schotter schonen und die Erschütterungen reduzieren soll, ausgestattet. Diese Komponenten werden unter »3.3 Weitere Komponenten« näher beschrieben.

Die wichtigsten Eckdaten der Schwelle werden hier nochmals in tabellarischer Form zusammengefasst:

| Technische Daten – Betonschwelle K1 | |
|--|-------------------------------|
| Beton | C50/60 |
| Länge | 2,60 m |
| Breite | 0,30 m |
| Höhe unter Schienenaufleger | 0,214 m |
| Gewicht | 282 kg |
| Spurweite | 1437 mm |
| Achslast | 250 kN |
| Schienen | 60E1 |
| Bewehrung | 8 profilierte Drähte Ø 7,5 mm |
| Schienenbefestigung | Vossloh W14 |

Tabelle 3-1: Technische Daten Schwelle K1 [41]

3.1.2 Analyse 2: Betonschwelle L2

Neben der Schwelle K1 findet die Monoblockschwelle L2 ebenso häufig Anwendung im Netz der ÖBB [21].

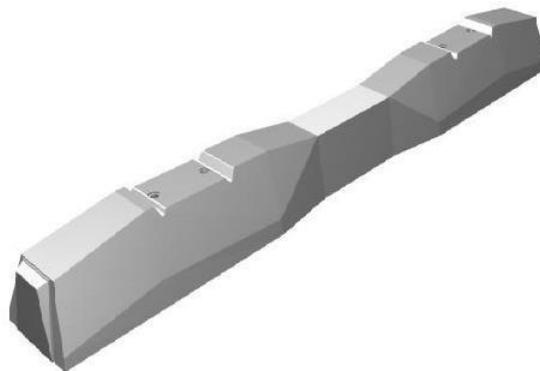


Abbildung 3-2: Betonschwelle L2 [40]

Die Spannbetonschwelle L2 weist ebenfalls Abmessungen von 2,6 x 0,3 m auf und besticht genauso durch hohe Gleislagequalität und die hohe Lebensdauer. Ausgestattet wird die Schwelle ebenfalls mit der Schienenbefestigung W14 und einer elastischen Schwellenbesohlung, bspw. von der Fa. Getzner oder Müller. [21, 42]

| Technische Daten – Betonschwelle L2 | |
|--|--------------------------------|
| Beton | C60/75 |
| Länge | 2,60 m |
| Breite | 0,30 m |
| Höhe unter Schienenaufleger | 0,215 m |
| Gewicht (ohne Befestigung) | 320 kg |
| Spurweite | 1437 mm |
| Achslast | 250 kN |
| Schienen | 60E1 |
| Bewehrung | 14 profilierte Drähte Ø 6,0 mm |
| Schienenbefestigung | Vossloh W14 |

Tabelle 3-2: Technische Daten Betonschwelle L2 [42–44]

3.1.3 Analyse 3: Betonschwelle L17

Die Monoblockschwelle L17 ist ein neuartiges Produkt. Die Schwelle L17 wurde in ihrer Geometrie derart optimiert, dass diese bei gleicher Tragfähigkeit mit einer kürzeren Schwellenlänge auskommt. Die Betonschwelle L17 kommt somit mit einer Länge von 2,4 m und einer Breite von 0,3 m aus. Durch diese Längenreduktion soll ein geringerer Schotterbettquerschnitt ermöglicht werden und somit Gleisschotter eingespart werden. [45]

| Technische Daten – Betonschwelle L17 | |
|---|-------------|
| Beton | C60/75 |
| Länge | 2,40 m |
| Breite | 0,30 m |
| Gewicht | ca. 320 kg |
| Achslast | 250 kN |
| Schienen | 60E1 |
| Schienenbefestigung | Vossloh W14 |

Tabelle 3-3: Technische Daten Betonschwelle L17 [44]

3.2 Feste Fahrbahn

3.2.1 Analyse 4: Slab Track Austria ÖBB-Porr

Die Feste Fahrbahn ÖBB-Porr ist ein Fertigteilplattensystem, welches in Zusammenarbeit der ÖBB und der Porr entwickelt wurde. Einige Erläuterungen wurden bereits erwähnt, dennoch wird das System hier nochmals kurz beschrieben.

Die elastische gelagerte Gleistragplatte ÖBB-Porr ist 5,16 m lang und 2,40 m breit und wird präzise im Fertigteilwerk hergestellt. Die Platte ist schlaff bewehrt und weist 16 Schienenstützpunkte auf, wo nach Erhärten des Betons die Schienenbefestigungen montiert werden. Zum Einsatz kommt hier das Schienenbefestigungssystem Vossloh 300-1 in Verbindung mit der Schiene 60E1. [46]

Die Fertigteilplatte weist zwei Öffnungen für das Einbringen des Vergussbetons auf und wird dadurch mit dem Unterbau formschlüssig verbunden. Um eine nachträgliche Trennung der Gleistragplatte vom Vergussbeton zu ermöglichen, ist die Plattenunterseite mit einer elastischen Beschichtung versehen (siehe Abbildung 1-7).

Die wesentlichen technischen Daten nochmals tabellarisch zusammengefasst:

| Technische Daten – Feste Fahrbahn Slab Track Austria ÖBB-Porr | |
|--|----------------|
| Beton | C30/37 |
| Länge | 5,16 m |
| Breite | 2,40 m |
| Höhe unter Schienenaufleger | 0,16 m |
| Gewicht (ohne Befestigung) | 5000 kg |
| Spurweite | 1437 mm |
| Achslast | 250 kN |
| Schienen | 60E1 |
| Bewehrungsgrad | ca. 6 % |
| Schienenbefestigung | Vossloh W300-1 |

Tabelle 3-4: Technische Daten FF STA ÖBB-PORR [46]

Im Weiteren wird die Untersuchung der FF auf freier Strecke mit „Analyse 4a“ und jene im Tunnel mit „Analyse 4b“ bezeichnet.

3.3 Weitere Komponenten

3.3.1 Schienen

Wie bereits des Öfteren erwähnt, wird das Schienenprofil 60E1 mit der Stahlgüte R 260 für die betrachtete Gerade verwendet. Für die spätere Ökobilanz wird angenommen, dass alle

Schienenenerzeugnisse vom Hersteller voestalpine aus Leoben stammen und in einer Regellänge von 120 m zum Einbauort transportiert werden. Die Schiene, wie sie in Abbildung 3-3 dargestellt ist, weist eine Masse von 60,21 kg/m und eine Schienenfußbreite von 150 mm auf. [21, 47]

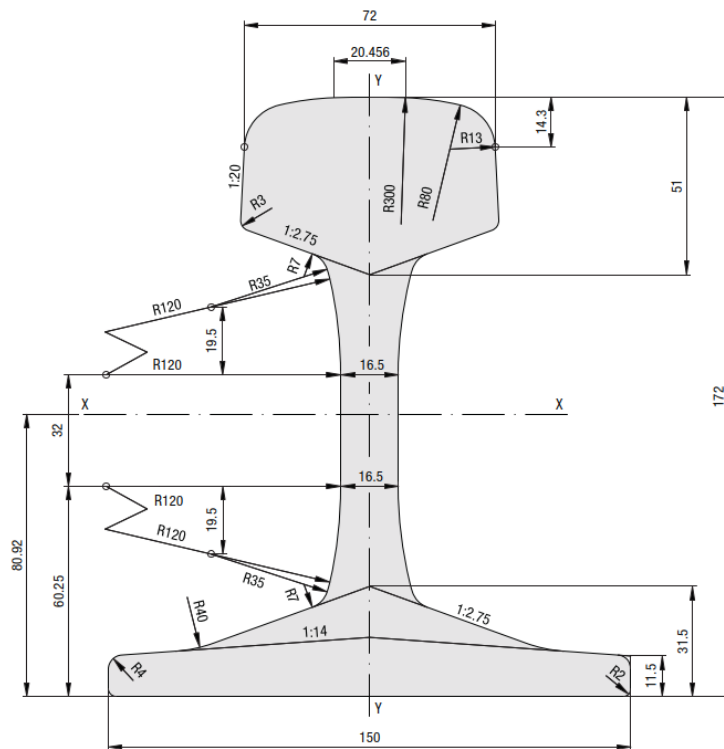


Abbildung 3-3: Schienenprofil 60E1 [47]

3.3.2 Schienenbefestigungen

Die Schienenbefestigung stellt das Bindeglied zwischen den lastverteilenden Komponenten der Schiene und der Schwelle dar [16].

Die Schienenbefestigung hat einerseits die Aufgabe die Schienenführung bzw. die Spur exakt zu halten und andererseits die auftretenden Kräfte von der Schiene an die Schwelle bzw. an die Fahrbahnplatte zu übertragen. Die Forderung an ein dauerhaftes und elastisches Verbindungsmittel ist groß. Demnach werden heutzutage nur mehr elastische Schienenbefestigungssysteme, wie sie nachfolgend zusammenfassend beschrieben sind, verwendet. [16, 40]

3.3.2.1 System Vossloh W14

Das Schienenbefestigungssystem W14 ist im Schotteroberbau mit Betonschwellen eine moderne Lösung, um die Schienen festzuhalten. Beim sogenannten W-Oberbau bieten die Schwellenschultern (siehe Abbildung 3-4) Halt für die Befestigung und die gerechte Spurführung. [48]

Generell besteht das System aus den Komponenten der Spannklemme Skl 14, den Schwellenschrauben, einer elastischen Zwischenlage und den Winkelführungsplatten [48].

Durch den Einsatz der Spannklemme Skl 14 wird ermöglicht, dass elastische Zwischenlagen zwischen dem Schienenfuß und der Betonschwelle eingesetzt werden können. Dadurch wird der Fahrkomfort und die Lebensdauer der einzelnen Gleiskomponenten wesentlich verbessert. [16, 48]

Durch den modularen Aufbau der Schienenbefestigung ist es möglich, die Einzelteile bereits im Schwellenwerk vorzumontieren und im Wartungsfall einfach auszutauschen [48].

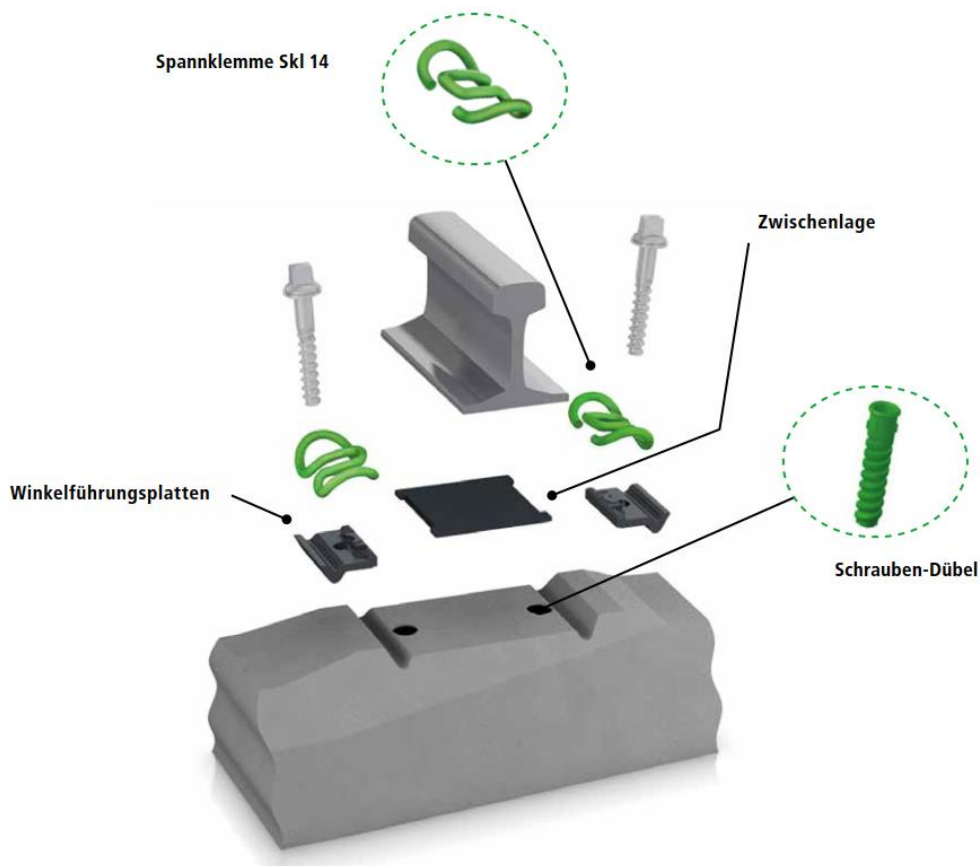


Abbildung 3-4: Explosionsdarstellung der Schienenbefestigung W14 [48]

3.3.2.2 System Vossloh W300-1

Die Schienenbefestigung W300-1 ist das Pendant zum System W14 und findet hauptsächlich im Bereich der Festen Fahrbahnen im Hochgeschwindigkeitsverkehr Anwendung [49].

Das System W300-1 ist ähnlich aufgebaut wie die Befestigung bei Betonschwellen. Der Halt ist wiederum durch die betonierten Schienenstützpunkte (Betonschultern) gegeben. Ausgehend von der Betonkonstruktion folgt eine elastische Zwischenplatte (Abbildung 3-5), welche Vibrationen und die Schallausbreitung eindämmt und eine optimale Schieneneinsenkung ermöglicht. Darüber liegt eine Stahlplatte, die die Kräfte gleichmäßig auf die elastische Zwischenplatte verteilt. Die Winkelführungsplatten links und rechts davon stützen sich auf den Betonschultern ab und halten die Schiene in der Spur. Danach folgt wie beim System W14 eine

elastische Zwischenlage zwischen der Lastverteilerplatte und dem Schienenfuß. Fixiert wird das System wiederum über Schwellenschrauben und eine für Feste Fahrbahnen adaptierte Spannklemme Skl 15. [49]

Es ist somit wiederum ein modularer Aufbau gegeben, welcher eine einfache Vormontage und Instandsetzung ermöglicht [49].

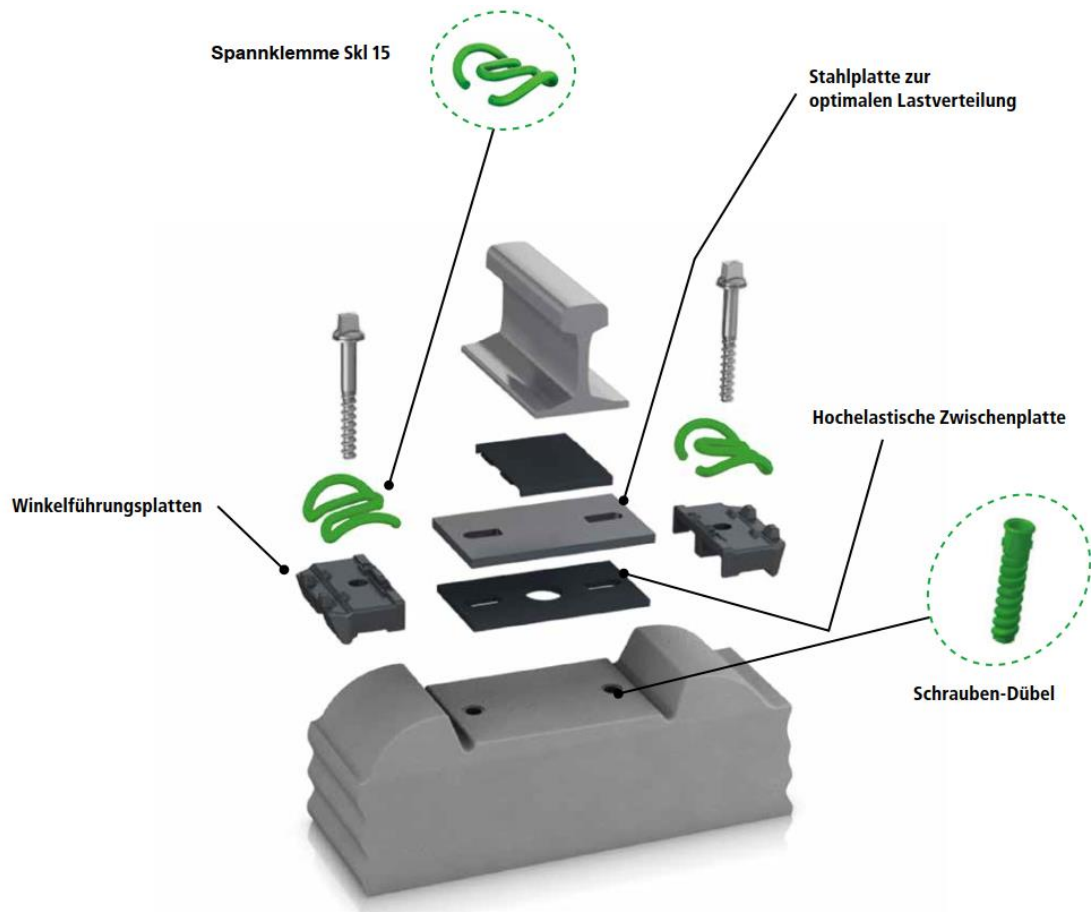


Abbildung 3-5: Explosionsdarstellung der Schienenbefestigung W300 [49]

3.3.3 Schwellenbesohlung

Die Schwelle überträgt die anfallenden Radlasten auf den Gleisschotter bzw. die einzelnen Schotterkörner. Da die Kontaktfläche der Schwellen für die wirkenden Kräfte relativ gering ist, treten sehr hohe Punktbelastungen auf, was zur Zerstörung bzw. Zermahlung der Schotterkörner führt. Durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen, welche an den Unterseiten der Betonschwellen angebracht sind (siehe Abbildung 3-6), kann die Kontaktfläche um den Faktor 10 vergrößert werden, was zur Folge hat, dass die Schotterkontaktpressung bis zu 85 % reduziert wird. Somit kann die Lebensdauer der einzelnen Komponenten verlängert werden. Zudem verringerte sich der Instandhaltungsaufwand durch Stopfen um etwa 65 % und der Querverschiebewiderstand vergrößert sich ebenfalls. [40, 50]

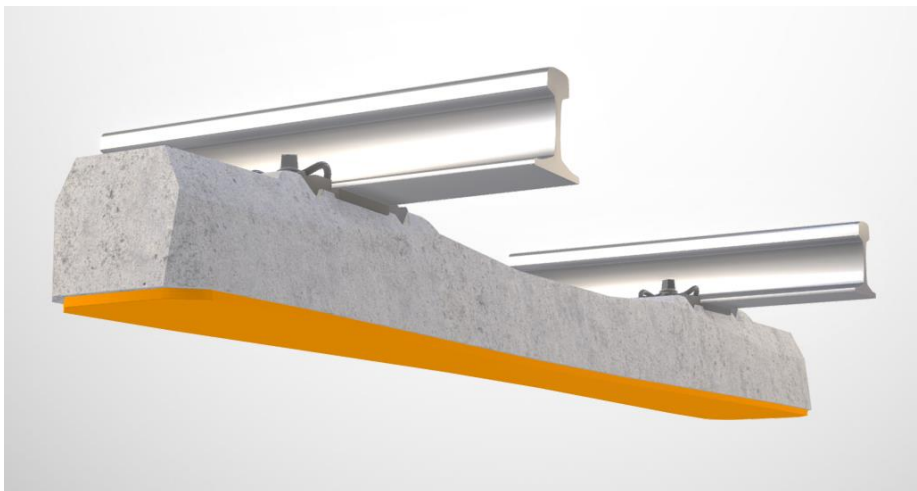


Abbildung 3-6: schematische Darstellung einer Schwellenbesohlung [50]

4 Ökobilanz an ausgewählten Oberbauten am BBT

4.1 Zieldefinition

Ziel dieser Masterarbeit/ Studie ist es, vier verschiedene, gängige sowie neuartige Oberbauformen der Eisenbahn im Tunnel und auf der freien Strecke am Beispiel der entstehenden Hochleistungsinfrastruktur am Brenner-Korridor bzw. am Beispiel des Brenner Basistunnels aus ökologischer Sicht über den gesamten Lebenszyklus zu analysieren.

Hierbei werden, wie bereits unter »3 Untersuchte Oberbauten« ausgeführt, drei Schotteroberbauten mit drei unterschiedlichen besohnten Betonschwellen und ein in Österreich zugelassenes Feste Fahrbahnplattensystem untersucht.

4.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit wird für die vorliegende Untersuchung so festgelegt, dass die Bezugsgröße für die ökobilanzielle Betrachtung als die Bereitstellung von 1 km Gleis bzw. Oberbau für die Eisenbahn für einen Zeitraum von 80 und 200 Jahren definiert wird. D.h., es werden zu beiden Zeiträumen Daten präsentiert.

Zusätzlich werden nach den Richtlinien der ÖBB, den örtlichen Gegebenheiten und weiteren Gesichtspunkten Standards konkretisiert, welche wie folgt lauten: [21, 40]

- ingleisige Strecke
- der betrachtete Abschnitt liegt in der Geraden
- Streckenrang S+ bzw. S
 - $v_{\max} \geq 160$ km/h
 - Streckenbelastung > 50.000 Tonnen pro Tag
- Schienenprofil: 60E1
- Schienenstahlgüte: R 260
- Der Unterbau befindet sich in gutem Zustand.

4.3 Systemgrenzen

4.3.1 Technische Systemgrenze

Die technische Systemgrenze dieser Ausarbeitung wird mit dem Unterbauplanum (siehe Abbildung 1-3) festgelegt. Das Unterbauplanum stellt die Abgrenzung von Ober- zu Unterbau

dar. In der Realität hat der Zustand des Unterbaus eine wesentliche Auswirkung auf den Zustand des Oberbaus. Vereinfachend wird im Zuge dieser Ökobilanz, wie bereits bei der funktionellen Einheit festgelegt, angenommen, dass sich der Unterbauzustand über den Betrachtungszeitraum nicht verändert und stets in einem guten Zustand befindet. Eine Verschlechterung des Oberbauzustands durch den Unterbau wird somit vernachlässigt. [40]

Für die Betrachtungen im Tunnel, also für die Betrachtung des Feste Fahrbahnsystems, wird als Systemgrenze die Sohlplatte definiert (siehe Abbildung 4-1, rot umrahmt).

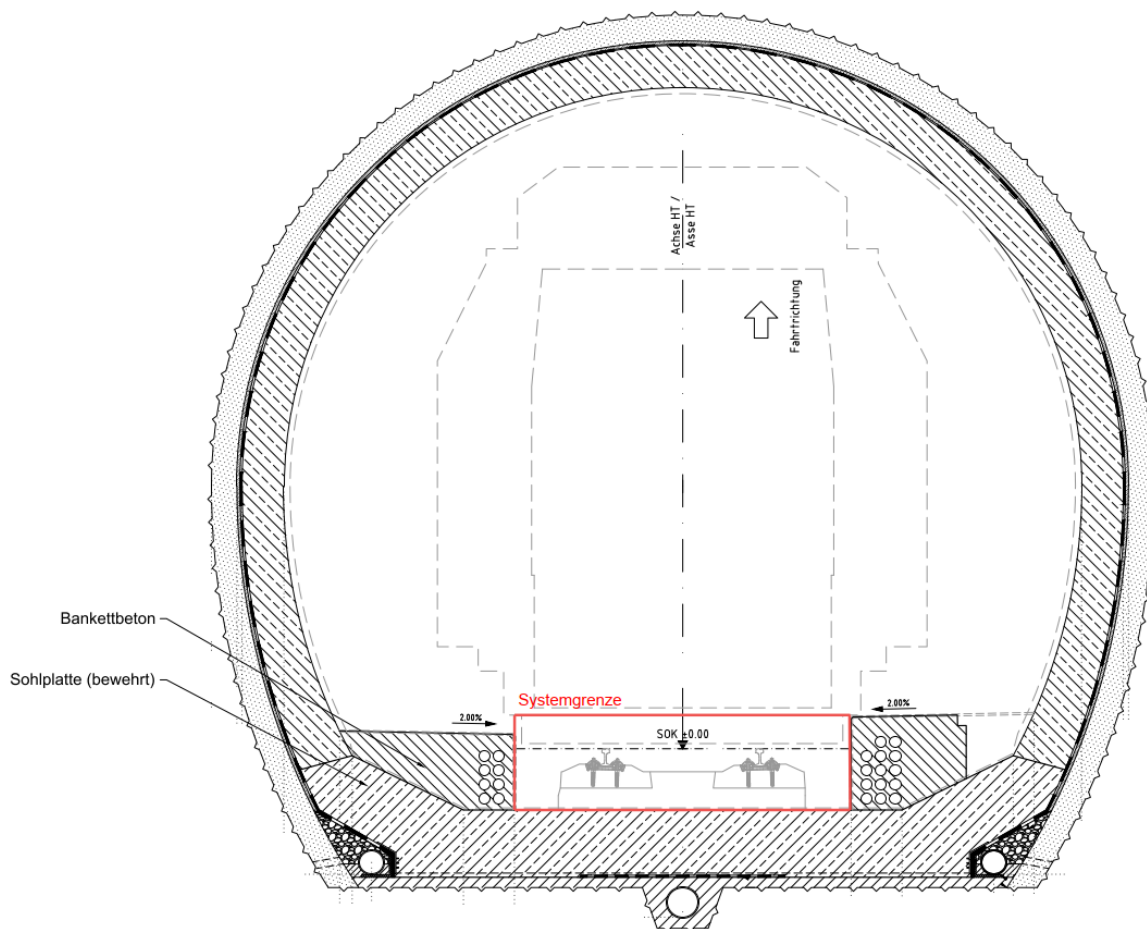


Abbildung 4-1: Systemgrenze im Tunnel, rot umrahmt [51]

Als technologischer Geltungsbereich wird für die vorliegende Untersuchung die aktuell im Einsatz befindliche Technologie definiert. Zudem wird vorausgesetzt, dass jegliche Maschinen, Produktionsstätten und deren Infrastruktur wie bspw. LKWs, Loks, Stopfmaschinen, Hüttenwerk, Betonmischwerke uvm., bereits vorhanden sind. Eine entsprechende Berücksichtigung dieser Strukturen entfällt somit in dieser Ökobilanz. [40]

4.3.2 Geographische Systemgrenze

Für die geographische Systemgrenze wird das österreichische Staatsgebiet gewählt, da die wesentlichen Primärdaten aus diesem geografischen Gebiet stammen [40]. Die Untersuchung

selbst erfolgt deshalb an einem fiktiven Gleiskörper im Netz der ÖBB am entstehenden Brennerkorridor bzw. am österreichischen Teil des Brennerbasistunnels.

Zu erwähnen ist, dass gewisse Produkte außerhalb von Österreich hergestellt werden. Diese werden größtenteils mittels generischen Daten, welche dem EU- bzw. DACH-Raum entsprechen, modelliert. Sollten gewisse Datensätze nicht vorhanden sein, so werden diese ebenfalls mittels dieser generischen Daten berücksichtigt. [40]

4.3.3 Zeitliche Systemgrenze

Da es schwierig ist, die zeitliche Systemgrenze bei langlebigen Produkten klar abzustecken, wird nach Empfehlung von Klöpffer et al. (2009) die geschätzte Lebensdauer der Festen Fahrbahn mit 80-100 Jahren angegeben [2, 52].

4.4 Sachbilanz

4.4.1 Allgemeines

Die folgende Sachbilanz der einzelnen Oberbaukomponenten und Prozesse stützt sich in weiten Teilen auf spezifischen Daten verschiedenster Institutionen und Unternehmen. Waren keine spezifischen Daten vorhanden bzw. konnten diese im Zuge der Bearbeitung nicht erhoben werden, wurde auf generische Daten aus Datenbanken, wie der „ecoinvent 3.8“-Datenbank, zurückgegriffen. Die Auswahl der Daten wurde jedoch stets so getroffen, dass die reale Situation in Österreich bestmöglich nachmodelliert wurde.

Die Modellierung der Sachbilanz und deren Berechnung wird softwaregestützt mit der Software SimaPro 9.3.0.3 durchgeführt. SimaPro ermöglicht es dem Nutzer/ der Nutzerin sämtliche Prozesse wie bspw. der Abbau von Rohstoffen zu berücksichtigen und allenfalls verschiedenen Prozessen anteilig zuzurechnen (Allokation). [40]

In den weiteren Kapiteln werden die Daten der Oberbauten (Aufwände, Emissionen etc.), sowie die Prozesse der Lebenszyklusphasen für die nachfolgende Wirkungsabschätzung entsprechend aufbereitet und beschrieben.

4.4.2 Herstellung der einzelnen Komponenten des Oberbaus

Die Einzelteile des Oberbaus wurden bereits im Kapitel zuvor genauer erläutert und werden in diesem Abschnitt in Hinblick auf die Massen, Volumina, Abmessungen etc. für die Modellbildung quantifiziert und jeweils tabellarisch dargestellt. Es soll somit eine transparente Vorgehensweise gewährleistet werden, um der Leser*in einen anschaulichen Überblick über die Sachbilanz(en) zu bieten.

4.4.2.1 Schiene

Es wird angenommen, dass die gesamten Schienen dieser Studie vom Hersteller voestalpine in Leoben hergestellt werden. Wobei zuerst die Stahlknüppel aus dem Roheisen hergestellt und dann durch die voestalpine Schienen GmbH zu Schienen gefertigt werden.

Die gesamten Wirkungen auf die Umwelt durch die Stahl- bzw. Schienenherstellung werden in einer firmeneigenen Umweltproduktdeklaration (kurz EPD) aus dem Jahr 2019 erfasst und dienen als Ausgangsdaten für die Modellierung in der Software SimaPro bzw. der Auswertung. Ersteller der EPD, welche der ISO 14025 und EN 15804 entspricht, war das Institut Bauen und Umwelt e.V.

4.4.2.2 Schienenbefestigung und Zwischenlage

W14

Ausgehend von Regelzeichnungen der ÖBB Infra kann das Stahlgewicht der einzelnen Komponenten relativ einfach bestimmt werden und ergibt somit:

| Sachbilanz Schienenbefestigung W14 - Stahlteile | | |
|--|---------------------|-----------------|
| Komponente | Anzahl pro Schwelle | Stahlgewicht |
| Spannklemme Skl 14 | 4 | 1,968 kg |
| Winkelführungsplatten Wfp 14 | 4 | 0,680 kg |
| Schwellenschraube Ss 33 | 4 | 2,880 kg |
| SUMME | | 5,528 kg |

Tabelle 4-1: Masse Stahlteile W14 [53–55]

Die Datenlage zur Zwischenlage Zw 700 ist etwas spärlich. Ausgehend vom ÖBB-Regelwerk 07.02.05 können die Abmessungen zu 180 x 148 x 7 mm (l x b x h) bestimmt werden. Über das Volumen und die Dichte kann somit die Masse für das Material Sylodyn® der Zwischenlage berechnet werden. [40, 56, 57]

Beim Material Sylodyn® handelt es sich um ein geschlossenzelliges Polyurethan, welches durch die Getzner Werkstoffe GmbH hergestellt wird. Genaue Informationen zur Dichte etc. konnten nicht erhoben werden. Deshalb wurde, wie auch in der Masterarbeit von Klammbauer 2017, eine Dichte von 1200 kg/m³ angenommen. Die Masse der Zwischenlage beläuft sich demnach auf 0,225 kg pro Befestigungspunkt. [40, 57]

Das Gesamtgewicht der Schienenbefestigungen pro Schwelle kann deshalb mit 5,978 kg bestimmt werden. Gerundet ergeben sich 6 kg pro Schwelle.

| Sachbilanz Schienenbefestigung W14 | | |
|---|---------------------|-----------------|
| Komponente | Anzahl pro Schwelle | Gewicht |
| Spannklemme Skl 14 | 4 | 1,968 kg |
| Winkelführungsplatten Wfp 14 | 4 | 0,680 kg |
| Schwellenschraube Ss 33 | 4 | 2,880 kg |
| SUMME Stahlgewicht | | 5,528 kg |
| | | |
| Zw 700 (Sylodyn ®) | 2 | 0,45 kg |
| | | |
| GESAMT | | 5,978 kg |

Tabelle 4-2: Sachbilanz W14

Die in Tabelle 4-2 dargestellten Produkte und die damit verbundenen Aufwendungen, Inputs und Emissionen, welche durch die Herstellung entstehen, werden im SimaPro-Modell mit ecoinvent-Datensätzen zu Rohstahl und Erdöl für die Zwischenlage abgebildet. Für die Stahlerzeugnisse wird ein globaler Ansatz verwendet. Bei dem PUR-Produkt wird ein globaler Datensatz für einen steifen PUR-Werkstoff verwendet.

W300-1

Beim Befestigungssystem für die Feste Fahrbahn war es schwieriger die Aufwände für die Sachbilanz zu ermitteln.

In der Produktbroschüre der ÖBB-Porr-Gleistragplatte ist das Gesamtgewicht der Befestigungsmittel der gesamten Fertigteileplatte angegeben und beläuft sich auf 140 kg für 16 Schienenstützpunkte. Ausgehend von diesem Wert und den bekannten Informationen zu den Abmessungen der Zwischenlage Zw 700 und der Zwischenlagenplatte Zwp 104 können wiederum die Massen über die angenommene Dichte (1200 kg/m^3) bestimmt werden. [40, 46, 57]

| Sachbilanz Schienenbefestigung W300-1 | | |
|--|-------------------|-----------------|
| Komponente(n) | Anzahl pro Platte | Gewicht |
| Stahlteile je Auflagerung | 16 | 7,95 kg |
| SUMME Stahlgewicht | | 127,2 kg |
| | | |
| Zw 700 (Sylodyn ®) | 16 | 3,58 kg |
| Zwp 104 (Sylodyn ®) | 16 | 9,22 kg |
| SUMME Sylodyn ® | | 12,8 kg |
| | | |
| GESAMT | | 140,0 kg |

Tabelle 4-3: Sachbilanz W300-1 [46, 57]

Die Modellierung folgt der Vorgehensweise des Systems W14.

4.4.2.3 Besohlung

Bei der Schwellenbesohlung kommt als Standardlösung für die Schotterschonung die Sohle vom Typ Getzner SLB 3007 oder das Produkt M 02 der Fa. Müller zur Anwendung. Im Zuge dieser Untersuchung wird das Produkt von Getzner Werkstoffe GmbH verwendet. Die Besohlung SLB 3007 besteht ebenfalls aus Sylodyn® und ist 7 mm dick. Die Dichte des geschlossenzelligen Polyurethans wird wiederum mit 1200 kg/m³ angenommen. [21, 50, 57] In Abhängigkeit der Schwellenform ergeben sich unterschiedliche Flächen und Massen des Werkstoffs. Die Tabelle 4-4 zeigt die Mengen der Schwellensohlen je untersuchter Schwellenform.

| Sachbilanz Schwellenbesohlung (Sylodyn®) | | |
|--|----------------------|---------|
| Schwellenform | Fläche | Gewicht |
| K1 | 5920 cm ² | 4,9 kg |
| L2 | 6130 cm ² | 5,2 kg |
| L17 | 5450 cm ² | 4,6 kg |

Tabelle 4-4: Sachbilanz Schwellenbesohlung [44, 58]

Die Modellierung der Inputs und Emissionen in SimaPro erfolgt wiederum über ecoinvent-Datensätze für das Erdölprodukt. Die Vorprozesse sind in den Datensätzen ebenfalls bereits inkludiert.

4.4.2.4 Schwelle K1

Die Betonschwellen werden in entsprechenden Betonfertigteilwerken in Österreich hergestellt. Je nach Hersteller erfolgt dies an unterschiedlichen Standorten.

In den Werken wird Beton in die Schalungsformen gegossen, welche zuvor mit den Spannstahldrähten und Dübel bestückt werden. Die Vorspannung der Stahldrähte erfolgt hier im Spannbett und somit mit sofortigem Verbund.

Es folgt eine Eigenmodellierung des Betons in SimaPro. Hierbei wird in einem ersten Schritt ein ecoinvent-Datensatz für Klinker auf österreichische Verhältnisse angepasst. Hierbei ist zu erwähnen, dass unter Berücksichtigung des Verursacherprinzips nach EN 15804 die Emission „Carbon dioxide, biogenic“ aus den Outputs entfernt wurde, da diese CO₂-Emissionen bereits den Vorprodukten zuzuschreiben sind [59]. Dieser adaptierte Klinker-Datensatz wird in weiterer Folge für den Zement-Datensatz, welcher ebenfalls aus der ecoinvent-Datenbank entammt und auf österreichische Verhältnisse adaptiert wurde, verwendet. Aufbauend auf den auf Österreich zugeschnittenen Daten wird ein österreichischer Beton in SimaPro eingegeben. Der Betondatensatz basiert hier auf einem ecoinvent-Datensatz für Österreich und wird mit den zuvor beschriebenen Daten befüllt bzw. die Betonrezeptur entsprechend auf die Betonschwelle K1 angepasst. Die Daten der Betonrezeptur wurden vom Hersteller Leube Betonschwellen GmbH zur Verfügung gestellt und werden aufgrund von Betriebsgeheimnissen vertraulich behandelt und können dadurch nicht im Detail öffentlich präsentiert werden.

Für die Modellierung der Spanndrähte wird angenommen, dass diese von der Fa. voestalpine stammen. Hierbei werden die Stahlerzeugnisse (Stahlknüppel) zuerst an die voestalpine Wire Rod Austria GmbH geliefert, wo Walzdraht hergestellt wird, welcher bspw. für die spätere Betonbewehrung benötigt wird. Anschließend erfolgt die Weiterverarbeitung des Walzdrahts bei der voestalpine Wire Austria GmbH, wo aus dem Walzdraht ein hochfester Spannstahldraht erzeugt wird. [40, 60]

Im Programm SimaPro wird als Ausgangsprodukt für den Spannstahl ein auf Österreich adaptierter ecoinvent-Datensatz für Spannstahl verwendet. Ausgehend davon wird unter Zuhilfenahme der aktuellsten unternehmenseigenen Umwelterklärung aus 2019 eine Eigenmodellierung der Spannstahlherstellung vorgenommen.

Bei der Monoblockschwelle K1 wird ein Spanndraht mit Durchmesser 7,5 mm verwendet [58].

Bei Betrachtung eines Streckenkilometers der Bahn und einem Schwellenabstand von 600 mm, wie er im ÖBB-Regelwerk 07.02.01 festgelegt wird, ergeben sich 1666,67 Stück an Betonschwellen [21].

Ausgehend von den spezifischen Daten des Herstellers ergibt sich für die Monoblockschwelle folgende Sachbilanz:

| Sachbilanz Schwelle K1 | |
|-------------------------------|----------------------|
| Material | Menge |
| Beton C 50/60 | 0,115 m ³ |
| Spannstahl | 7,20 kg |

Tabelle 4-5: Sachbilanz Schwelle K1 [58]

4.4.2.5 Schwelle L2

Die Herstellung der Betonschwelle L2 ist ident mit der Schwelle K1. Lediglich der Herstellungsort ist unterschiedlich, was unter Kapitel »4.4.3 Transport« ersichtlich wird.

Es wird wiederum angenommen, dass der Spannstahl von der Fa. voestalpine stammt.

Der Betondatensatz wird wie bei der Schwelle K1 in SimaPro eingegeben und die Betonrezeptur entsprechend auf die Schwelle L2 angepasst. Daten zur Betonrezeptur wurden von der MABA Fertigteilindustrie GmbH übernommen. Aufgrund von Betriebsgeheimnissen werden auch hier die genauen Zusammensetzungen des Betons nicht öffentlich gemacht und vertraulich behandelt.

Beim Spannstahl wird derselbe Datensatz wie zuvor verwendet.

Bei der Schwelle L2 kommen Spannstahldrähte mit dem Durchmesser 6 mm zum Einsatz [44]. Die Schwellenanzahl ist ebenfalls ident.

Die Sachbilanz ergibt sich somit zu:

| Sachbilanz Schwelle L2 | |
|-------------------------------|----------------------|
| Material | Menge |
| Beton C 60/75 | 0,116 m ³ |
| Spannstahl | 8,10 kg |

Tabelle 4-6: Sachbilanz Schwelle L2 [44]

4.4.2.6 Schwelle L17

Die neuartige Monoblockschwelle L17 unterscheidet sich von der Schwelle L2 lediglich durch ihre Form. Die restlichen Eingangsparameter für die Ökobilanz bleiben gleich. Somit ergibt sich die Sachbilanz zu:

| Sachbilanz Schwelle L17 | |
|--------------------------------|----------------------|
| Material | Menge |
| Beton C 60/75 | 0,127 m ³ |
| Spannstahl | 5,33 kg |

Tabelle 4-7: Sachbilanz Schwelle L17 [44]

4.4.2.7 Gleisschotter

Der Oberbauschotter ist entscheidend für einen funktionierenden Oberbau. Der Schotter selbst besteht aus natürlich gebrochenen und ungebundenen Gesteinskörnern und wird in Steinbrüchen von qualifizierten Unternehmen hergestellt. Der Gleisschotter hat in Hinblick auf Geometrie, Korngrößenverteilung und mechanischer Eigenschaften gewisse Anforderungen, welche in der ÖNORM EN 13450 geregelt sind, zu erfüllen. [61]

Im Netz der ÖBB kommt im Regelfall eine Gesteinskörnung aus Hartgestein mit der Körnung 31,5/63 mm zur Anwendung [61].

Neben der Kornverteilung ist die Bettungsstärke und die Bettungsbreite im Querschnitt entscheidend. Diese ist vor allem von der Streckenbelastung und der Schwellenart und -länge abhängig. Die Schotterbettflanken sind nach ÖBB-Regelwerk 07.02.01 mit einer Neigung von 2:3 auszuführen (siehe Regelquerschnitt ÖBB - Abbildung 4-2). [61]

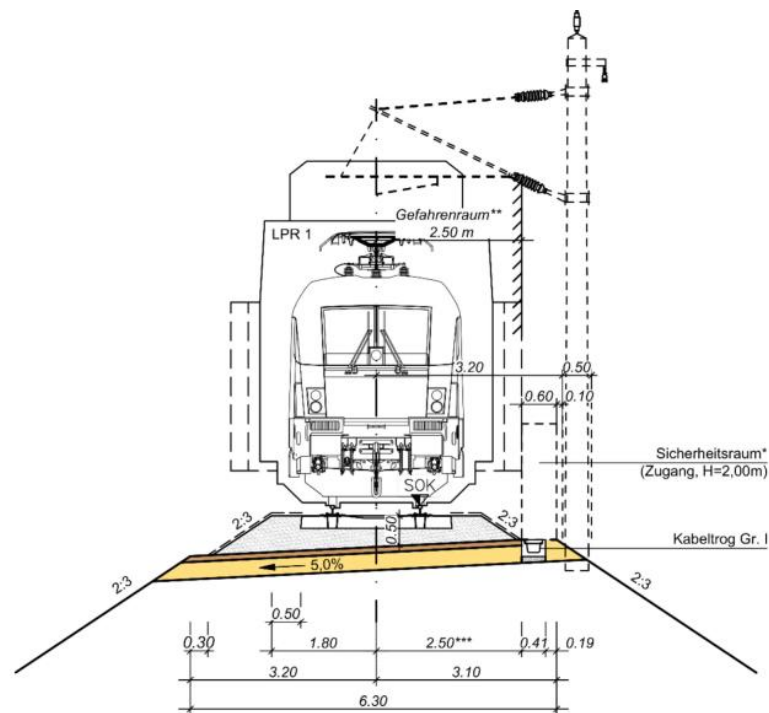


Abbildung 4-2: Regelquerschnitt nach ÖBB-Regelwerk 01.05. für eine 1-gleisige Strecke [61]

Da in dieser Studie zwei unterschiedliche Schwellenlängen untersucht werden, ergeben sich daraus zwei unterschiedliche Schotterquerschnitte für die Modellierung. Diese sind nachfolgend in schematischer Form bildlich dargestellt (vgl. Abbildung 4-3 und Abbildung 4-4).

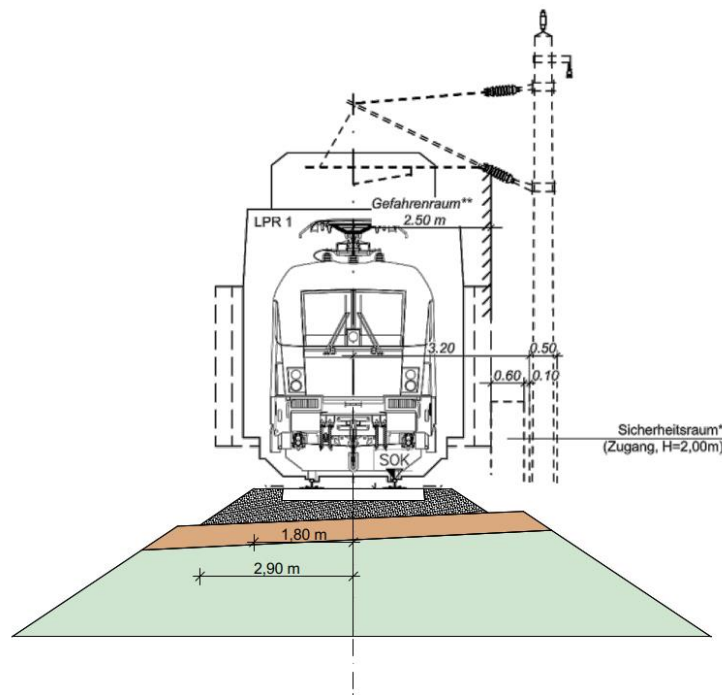


Abbildung 4-3: Regelquerschnitt Gleisschotter mit Schwellenlänge = 2,6m, eigene Abbildung

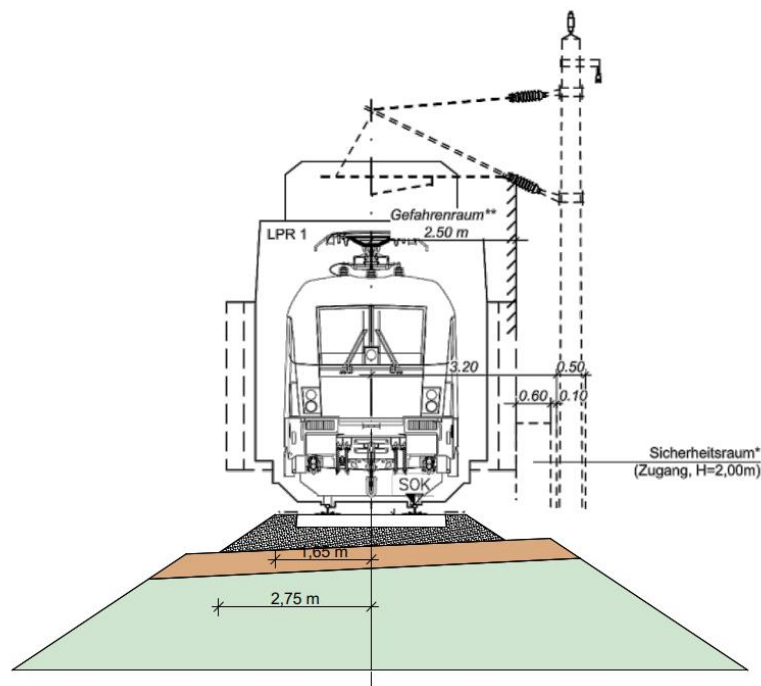


Abbildung 4-4: Regelquerschnitt Gleisschotter mit Schwellenlänge = 2,4m, eigene Abbildung

Die Querschnittsabmessungen und das angenommene Schüttgewicht je m^3 belaufen sich somit auf:

| Sachbilanz Gleisschotter | | | | |
|--------------------------|----------------|---|------------------------------|-------------------|
| Schwellenlänge | Bettungsstärke | Angenommenes Schüttgewicht pro m^3 | Querschnitt pro Meter | Volumen pro km |
| 2,6 m | 0,5 m | 1,61 t/m^3 | 2,42 m^2/m | 2140 m^3 |
| 2,4 m | 0,5 m | 1,61 t/m^3 | 2,21 m^2/m^3 | 1960 m^3 |

Tabelle 4-8: Sachbilanz Gleisschotter [61, 62]

Da die ÖBB verschiedene Verträge mit Schotterwerken bzw. Schotterzulieferern hat, ergeben sich je nach Einsatzort verschiedenste Transportdistanzen [40]. Im Zuge dieser Modellierung wird angenommen, dass sich im unmittelbaren Umkreis des Einsatzortes am BBT ein solcher Zulieferer befindet. Die Transportdistanzen werden unter Kapitel 4.4.3 detailliert aufgelistet.

Die Aufwände, welche aus der Herstellung resultieren, werden in SimaPro durch einen auf Österreich zugeschnittenen ecoinvent-Datensatz, welcher ursprünglich für die Schweiz hergestellt wurde, berücksichtigt.

4.4.2.8 FF STA ÖBB-PORR

Das Feste Fahrbahnsystem der ÖBB-Porr wird wie auch die Betonschwellen im Fertigteilwerk hergestellt und an den Einsatzort befördert [46].

Die Modellierung des Betons in SimaPro folgt hierbei dem gleichen Schema, wie bereits unter Kapitel 4.4.2.4 näher beschrieben. Die Betonrezeptur wird entsprechend auf die zur Verfügung

gestellten Daten angepasst. Etwaige Betonzusätze werden, wie auch bei den Schwellen, bei der Modellierung über EPD's vom Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) berücksichtigt.

Die Plattenkonstruktion selbst wird schlaff bewehrt [46, 60]. Der Datensatz für den Bewehrungsstahl entstammt der ecoinvent-Datenbank und gilt für den österreichischen Markt. Die Transporte des Stahls, der Befestigungsmittel etc. ins Betonfertigteilwerk werden ebenfalls unter Kapitel 4.4.3 näher beschrieben.

Bei Betrachtung eines Streckenkilometers ergibt sich eine Anzahl von 193,80 Fahrbahnplatten.

Aus Gründen der Geheimhaltungspflicht werden keine genauen Auflistungen über verwendete Materialien bzw. deren Zusammensetzung des Feste Fahrbahnsystems STA ÖBB-PORR in dieser Masterarbeit kommuniziert.

Die Aufwände für eine elastisch Gleistragplatte setzen sich nach Informationen des Herstellers folgendermaßen zusammen:

| Sachbilanz FF STA ÖBB-PORR | |
|-----------------------------------|------------------------|
| Material | Menge pro Platte |
| Beton C 30/37 | ca. 2,0 m ³ |
| Bewehrung | ca. 300 kg |
| Elastische Trennschicht | <i>vertraulich</i> |

Tabelle 4-9: Sachbilanz FF STA ÖBB-PORR [46]

Die Energieströme für die Herstellung der Fertigteilplatte werden entsprechend aus ecoinvent-Datensätzen ermittelt.

4.4.2.9 Vergussbeton

Um die Feste Fahrbahnplatte auf der Tunnelsohlplatte bzw. auf der Lastverteilerplatte auf einem Erddamm befestigen bzw. fixieren zu können, ist eine Verbindung mit einem Vergussbeton erforderlich. Der Vergussbeton ist hierbei speziell fließfähig und selbstverdichtend und erleichtert somit den Herstellungsprozess der Feste Fahrbahn. [46]

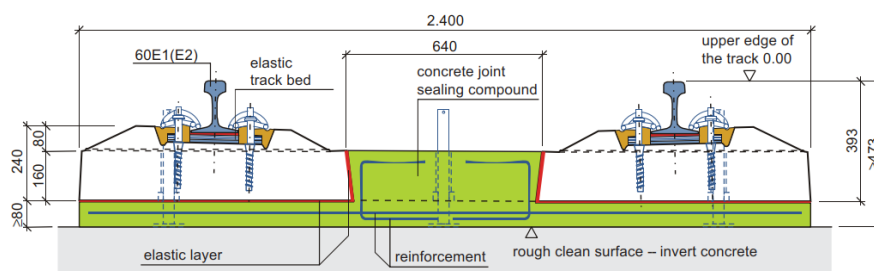


Abbildung 4-5: FF STA ÖBB-PORR im Querschnitt mit Darstellung des Vergussbetons [46]

Die Vergussbetonschicht, wie sie in Abbildung 4-5 grün dargestellt ist, wird aufgrund der Rissweitenbeschränkung leicht bewehrt und üblicherweise 8 cm stark ausgeführt [46]. Die Sachbilanz liefert folgende Zahlen:

| Sachbilanz Vergussbeton FF | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Material | Menge pro Platte |
| Beton C 25/30 | 1,17 m ³ |
| Bewehrung | ca. 20 kg |

Tabelle 4-10: Sachbilanz Vergussbeton FF [46]

Für die Abbildung des Vergussbetons in SimaPro wird der zuvor erstellte Betondatensatz auf den hier vorliegenden Beton angepasst. Für den Bewehrungsstahl wird wiederum der o.a. Datensatz verwendet.

4.4.2.10 Lastverteilerplatte (LVT)

Wird die Feste Fahrbahn auf der freien Strecke auf einem Erdbauwerk, d.h. auf einem Erddamm geführt, bedarf die FF-Konstruktion einer Lastverteilerplatte unter der Vergussbetonschicht. Diese Lastverteilerplatte übernimmt die Lasten aus der FF-Konstruktion und leitet diese über eine mindestens 30 cm dicke Betonplattenkonstruktion in den Unterbau ab. Das ÖBB-Regelwerk 07.05.01 sieht hierbei eine Mindestbreite von 2,80 m und einer Mindestbetongüte von C25/30/B3/GK32 vor (vgl. Abbildung 4-6). [15, 46, 63]

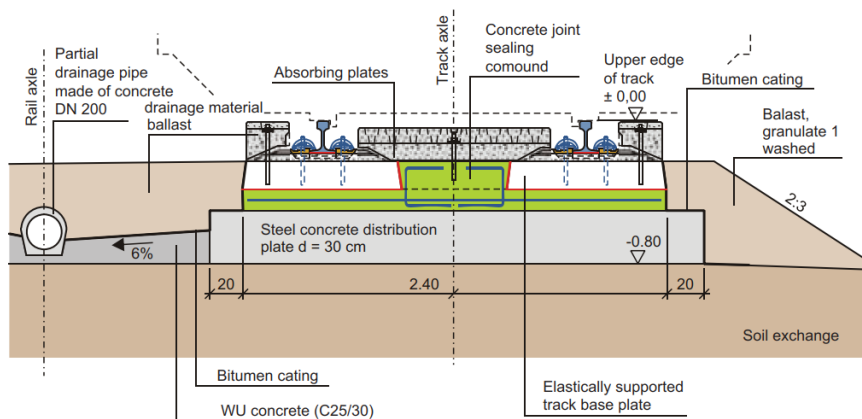


Abbildung 4-6: FF-Konstruktion auf einem Erdbauwerk mit Lastverteilerplatte [46]

Aufgrund der Rissbreitenbeschränkung von $w_k \leq 0,2$ mm wird ein Bewehrungsgrad von 0,5 % angenommen [15, 46, 63].

| Sachbilanz Lastverteilerplatte FF | |
|--|------------------------|
| Material | Menge pro m |
| Beton C 25/30/B3/GK32 | 0,84 m ³ /m |
| Bewehrung | ca. 10,5 kg/m |

Tabelle 4-11: Sachbilanz Lastverteilerplatte FF [63]

Energie-Inputs und -Outputs der Betonherstellung bzw. der Betonage vor Ort etc. wird, wie zuvor beschrieben, mit den Datensätzen für Beton und Bewehrungsstahl in der Software SimaPro berücksichtigt.

4.4.3 Transport (A4)

Um die zuvor beschriebenen Einzelteile, Komponenten etc. weiterverarbeiten zu können, bedarf es in der Logistikkette einer Vielzahl an Transporten. Je nach Bestandteil bestehen diese aus verschiedensten Transporten von Vorprodukten zu Herstellern und sind geprägt von der Beschaffung, Produktion und Distribution und entscheidend für den Materialfluss bzw. der Herstellung des gesamten Oberbaus. [11]

Hierdurch stehen mit dem Transport Emissionen und Energieverbräuche gegenüber, welche in der Ökobilanz zu berücksichtigen sind. Aufgrund der Komplexität der Güterlogistik ist es teilweise nicht möglich, den Transportablauf in einer adäquaten Form realitätsnah abzubilden, da die Datenlage recht spärlich und schwer zu erheben ist.

Aus diesem Grund werden die Distanzen auf Basis von Google Maps und die Verkehrskette nach bestem Gewissen angenommen.

Als Einsatzort wird der Brenner Basistunnel, im Speziellen Innsbruck, welcher den Startpunkt des Tunnels auf österreichischer Seite darstellt, gewählt.

Zudem ist zu erwähnen, dass aufgrund der Betrachtung verschiedenster Oberbauvarianten verschiedene Transportszenarien zu untersuchen sind. Diese wurden anhand der ermittelten Daten und teilweise mit Daten aus Klammbauer, 2017 erstellt und sind nachfolgend für die einzelnen Szenarien tabellarisch aufbereitet.

| Variante für Schwelle K1 | | | | |
|--------------------------------|---|----------------------------|-----|-------------|
| Oberbaukomponente | Transport | | km | Verkehrsart |
| | Von | Nach | | |
| Spannstahl | voest wire Austria, Bruck an der Mur | Leube Betonschwellen, Linz | 190 | Bahn |
| Besohlung | Getzner Werkstoffe, Bürs | Leube Betonschwellen, Linz | 445 | LKW |
| Zwischenlage | Getzner Werkstoffe, Bürs | Leube Betonschwellen, Linz | 445 | LKW |
| Schienenbefestigung W14 | Vossloh Fastening Systems, Werdohl (DE) | Leube Betonschwellen, Linz | 730 | LKW |
| Betonschwelle inkl. Spannstahl | Leube Betonschwellen, Linz | Einbauort BBT, Innsbruck | 320 | Bahn |
| Zwischenlage | Leube Betonschwellen, Linz | Einbauort BBT, Innsbruck | 320 | Bahn |
| Besohlung | Leube Betonschwellen, Linz | Einbauort BBT, Innsbruck | 320 | Bahn |
| Schienenbefestigung W14 | Leube Betonschwellen, Linz | Einbauort BBT, Innsbruck | 320 | Bahn |
| Gleisschotter | Schotterwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 15 | LKW |
| Schienen | voest Schienen GmbH, Leoben | Einbauort BBT, Innsbruck | 385 | Bahn |

Tabelle 4-12: Transporte für Analyse 1, Schwelle K1

| Variante für Schwellen L2 | | | | |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|-----|-------------|
| Oberbaukomponente | Transport | | km | Verkehrsart |
| | Von | Nach | | |
| Spannstahl | voest wire Austria, Bruck an der Mur | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 110 | Bahn |
| Besohlung | Getzner Werkstoffe, Bürs | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Zwischenlage | Getzner Werkstoffe, Bürs | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Schienenbefestigung W14 | Vossloh Fastening Systems, Werdohl (DE) | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 935 | LKW |
| Betonschwelle inkl. Spannstahl | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Zwischenlage | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Besohlung | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Schienenbefestigung W14 | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Gleisschotter | Schotterwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 15 | LKW |
| Schienen | voest Schienen GmbH, Leoben | Einbauort BBT, Innsbruck | 385 | Bahn |

Tabelle 4-13: Transporte für Analyse 2, Schwelle L2

| Variante für Schwellen L17 | | | | |
|--------------------------------|---|---------------------------------------|-----|-------------|
| Oberbaukomponente | Transport | | km | Verkehrsart |
| | Von | Nach | | |
| Spannstahl | voest wire Austria, Bruck an der Mur | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 110 | Bahn |
| Besohlung | Getzner Werkstoffe, Bürs | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Zwischenlage | Getzner Werkstoffe, Bürs | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Schienenbefestigung W14 | Vossloh Fastening Systems, Werdohl (DE) | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | 935 | LKW |
| Betonschwelle inkl. Spannstahl | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Zwischenlage | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Besohlung | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Schienenbefestigung W14 | Maba Fertigteilindustrie, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Gleisschotter | Schotterwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 15 | LKW |
| Schienen | voest Schienen GmbH, Leoben | Einbauort BBT, Innsbruck | 385 | Bahn |

Tabelle 4-14: Transporte für Analyse 3, Schwelle L17

| Variante für STA ÖBB-PORR - Freie Strecke | | | | |
|--|--|-----------------------------|-----|-------------|
| Oberbaukomponente | Transport | | km | Verkehrsart |
| | Von | Nach | | |
| Bewehrung | voestalpine wire rod, St.Peter-Freienstein | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 130 | Bahn |
| elastische Beschichtung | Getzner Werkstoffe, Bürs | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Zwischenlagen | Getzner Werkstoffe, Bürs | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Schienenbefestigung W300-1 | Vossloh Fastening Systems, Werdohl (DE) | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 730 | LKW |
| Fertigteilplatte inkl. Bewehrung | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Bewehrung Vergussbeton & Lastverteilerplatte | voestalpine wire rod, St.Peter-Freienstein | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Zwischenlagen | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| elastische Beschichtung | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Schienenbefestigung W300-1 | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Vergussbeton | Betonwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 10 | LKW |
| Verteilerplatte | Betonwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 10 | LKW |
| Schienen | voest Schienen GmbH, Leoben | Einbauort BBT, Innsbruck | 385 | Bahn |

Tabelle 4-15: Transporte für Analyse 4a, FF STA ÖBB-PORR im Tunnel

| Variante für STA ÖBB-PORR - TUNNEL | | | | |
|------------------------------------|--|-----------------------------|-----|-------------|
| Oberbaukomponente | Transport | | km | Verkehrsart |
| | Von | Nach | | |
| Bewehrung | voestalpine wire rod, St.Peter-Freienstein | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 130 | Bahn |
| elastische Beschichtung | Getzner Werkstoffe, Bürs | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Zwischenlagen | Getzner Werkstoffe, Bürs | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 650 | LKW |
| Schienenbefestigung W300-1 | Vossloh Fastening Systems, Werdohl (DE) | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | 730 | LKW |
| Fertigteilplatte inkl. Bewehrung | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Bewehrung Vergussbeton | voestalpine wire rod, St.Peter-Freienstein | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Zwischenlagen | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| elastische Beschichtung | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Schienenbefestigung W300-1 | Fertigteilwerk, Wöllersdorf | Einbauort BBT, Innsbruck | 520 | Bahn |
| Vergussbeton | Betonwerk Tirol | Einbauort BBT, Innsbruck | 10 | LKW |
| Schienen | voest Schienen GmbH, Leoben | Einbauort BBT, Innsbruck | 385 | Bahn |

Tabelle 4-16: Transporte Analyse 4b, FF STA ÖBB-PORR auf der freien Strecke

Transporte, welche über den eigentlichen Herstellungsprozess der Oberbaukomponenten hinausgehen und den Vorprodukten (bspw. Roheisen, Eisenerz, Erdöl etc.) zuzuordnen sind, werden über entsprechende Daten aus der ecoinvent-Datenbank berücksichtigt und nicht gesondert betrachtet [40]. Diese Vorprozesse wurden bereits bei den Datensätzen der Produktherstellung berücksichtigt und sind in den ecoinvent-Datensätzen implementiert.

Für die Abbildung der Transporte in SimaPro wird für den LKW- bzw. Bahntransport ein europäischer ecoinvent-Datensatz für den LKW (EURO 6) und ein österreichischer für die Bahn benutzt. Diese Datensätze berücksichtigen die Umweltwirkungen anhand der oben angegebenen Tonnenkilometer (tkm).

4.4.4 Errichtung, Instandhaltung, Erneuerung (A5, B1-B7)

Um der Ökobilanz eine zeitliche Komponente geben zu können, bedarf es der Betrachtung von sämtlichen Lebenszyklusphasen. Dementsprechend muss neben der Errichtung/ Herstellung auch die Instandhaltung und Erneuerung, welche die Lebensdauer des Oberbaus wesentlich prägen, betrachtet werden.

Der Einbau bzw. die Herstellung eines Gleiskörpers ist für einen SchO und eine FF unterschiedlich und bedürfen daher einer gesonderten Betrachtung der Herstellungsvorgänge. D.h., beim SchO werden heutzutage fast alle Arbeitsschritte mittels Gleisbaumaschinen durchgeführt. Sowohl die Neulage, als auch die Instandhaltung bspw. das Stopfen, das Auswechseln von Schwellen oder die Schottererneuerung erfolgt weitgehendst automatisiert und maschinell. Aus diesem Grund stellen die Vorgänge des Einbaus und des Ausbaus des Gleiskörpers bzw. einzelner Komponenten des SchO einen Arbeitsprozess dar und werden bei der Ökobilanz auch als solcher modelliert. [19]

Im Gegensatz dazu erfolgt bei der FF zum Zeitpunkt A5 der Einbau und zum Zeitpunkt C1 endet die Lebensdauer und wird dann rückgebaut. Bei der FF wird angenommen, dass über die Lebensdauer keine Instandhaltungsarbeiten am Oberbau notwendig sind, sondern lediglich die Schienen getauscht werden müssen. Zusätzlich wird angenommen, dass ein regelmäßiges Schienenschleifen erfolgt. Weitere Arbeiten/ Prozesse treten bei der FF nicht auf. [15, 52, 59]

Die maximale Liegedauer einer Oberbaukomponente ist wesentlich von dem untersuchten Streckenabschnitt (Steigung, Streckenrang, Lagequalität) abhängig und ist für ein fiktives Gleis in der Geraden, wie es hier untersucht wird, schwer vorherzusagen. Deshalb wird für die später modellierte Instandhaltung bzw. Erneuerung der Oberbaukomponenten auf minimale und maximale Liegedauern zurückgegriffen. Diese sollen mögliche Schwankungen in den Liegedauern bestmöglich abdecken und etwaige Optimierungspotentiale aufzeigen. Jedoch sind die verwendeten Daten als grobe Richtwerte anzusehen. In der Realität sind bei optimalen Bedingungen längere Liegedauern nicht auszuschließen. [19]

In Tabelle 4-17 sind die angenommenen minimalen und maximalen Liegedauern für die Komponenten bzw. die damit verbundenen Arbeitsschritte ersichtlich. Als minimal (min) ist zu verstehen, dass dies der früheste Zeitpunkt einer Instandhaltung darstellt. Unter maximal (max) wird verstanden, dass dies die längste Dauer darstellt, wo diese Komponente im Gleiskörper verbleiben können, bevor eine Auswechslung erfolgt bzw. Arbeiten nötig sind.

| Maßnahme | Jahre | |
|--------------------------|-------|-----|
| | min | max |
| Stopfen u. Richten | 4 | 5 |
| Schleifen | 1 | 3 |
| Schotterbettreinigung | 12 | 20 |
| Schienenerneuerung | 10 | 15 |
| Betonschwellenerneuerung | 30 | 40 |
| Befestigungsmittel | 10 | 30 |
| Schottererneuerung | 20 | 30 |
| Auswechslung FF | 80 | 100 |

Tabelle 4-17: Angenommene Arbeitsschritte in Abhängigkeit der Liegedauer der Oberbaukomponenten [19, 52]

Wie bereits o.a., werden für den Einbau, die Instandsetzung und den Ausbau Maschinen verwendet. Diese finden in der Ökobilanz über Kenndaten zu Arbeitsleistung, Motorleistung, Treibstoffverbrauch und somit über einen Kraftstoffdatensatz aus der ecoinvent-Datenbank Berücksichtigung. Der Treibstoffverbrauch wird über die Energiedichte von Diesel, welche 9,8 kWh/l beträgt, und einer Dichte von 0,83 kg/l für Diesel ermittelt [64]. Die Tabelle 4-18 zeigt die zum Einsatz kommenden Gleisbaumaschinen bzw. Maschinen zur Herstellung der FF.

| Sachbilanz Maschinen | | | |
|---|--------------------------|------------------|--------------------------------|
| Maschine | Arbeitsleistung [m/h] | Leistung [kW] | Kraftstoffverbrauch [kg/km] |
| Für Schotteroberbauten und teilweise für die Feste Fahrbahn: | | | |
| Bettungsreinigungsmaschine | 70 | 1566 | 2750,36 |
| Schnellumbauzug | 200 | 600 | 368,82 |
| Stopfmaschine | 350 | 440 | 154,55 |
| Dynamischer Gleisstabilisator | 350 | 370 | 129,97 |
| Schweißmaschine | 602 | 300 | 61,27 |
| Schienenschleifmaschine | 300 | 300 | 163,92 |
| Lok | 100.000 | 1305 | 1,604 |
| Schotterpflug | 2000 | 440 | 27,05 |
| Für die Feste Fahrbahn: | | | |
| Portalkran FF | 70 | 140 | 245,88 |
| Betonmischer (4 Stk.) Vergussbeton | 222 | 400 | 221,52 |
| Betonpumpe Vergussbeton | 222 | 100 | 55,38 |
| LKW-Kran | 61,9 | 100 | 198,55 |
| Betonmischer (8 Stk.) LVT | 130,2 | 800 | 755,676 |
| Betonpumpe LVT | 130,2 | 100 | 94,459 |
| Hydraulikbagger-Abbruch (2 Stk.) Tunnel | 29,6 | 300 | 1244,89 |
| LKW-Sattel (2 Stk.) Tunnel | 29,6 | 200 | 829,93 |
| LKW-Mulde (2 Stk.) Tunnel | 29,6 | 200 | 829,93 |
| Hydraulikbagger-Abbruch (2 Stk.) freie Strecke | 23,8 | 300 | 1552,25 |
| LKW-Sattel (2 Stk.) freie Strecke | 23,8 | 200 | 1034,83 |
| LKW-Mulde (3 Stk.) freie Strecke | 23,8 | 300 | 1552,25 |

Tabelle 4-18: Maschinendaten für die Herstellung, Instandhaltung und den Abbruch [19, 40, 65–70]

Der o.a. Treibstoffverbrauch der Maschinen bezieht sich hierbei auf einen Kilometer Gleis [40].

Die Modellierung erfolgt anhand der genannten Treibstoffverbräuche. Hierbei wird für die Ermittlung der Umweltwirkungen auf einen globalen Datensatz für Treibstoffverbrauch in Maschinen, welcher auf österreichischen Treibstoff adaptiert wurde, zurückgegriffen.

Ausgehend der in Tabelle 4-17 angeführten Dauern ergeben sich verschiedene Häufigkeiten der Maschineneinsätze:

| Maschinen | Schotteroberbau | | | | | | Feste Fahrbahn | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-----|------------------------------|-----|------------------------------|-----|-----------------------------|-----|------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| | Einsätze innerhalb 80 Jahre | | Einsätze innerhalb 100 Jahre | | Einsätze innerhalb 200 Jahre | | Einsätze innerhalb 80 Jahre | | Einsätze innerhalb 100 Jahre | | Einsätze innerhalb 200 Jahre | |
| | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max | min | max |
| Bettungsreinigungsmaschine | 6 | 4 | 8 | 5 | 16 | 10 | | | | | | |
| Schnellumbauzug SUZ | 2 | 2 | 3 | 2 | 6 | 5 | | | | | | |
| Stopfmaschine | 20 | 16 | 25 | 20 | 50 | 40 | | | | | | |
| Dynamischer Gleisstabilisator | 20 | 16 | 25 | 20 | 50 | 40 | | | | | | |
| Schweißmaschine | 8 | 5 | 10 | 6 | 20 | 13 | 8 | 5 | 10 | 6 | 20 | 13 |
| Schienenschleifmaschine | 80 | 26 | 100 | 33 | 200 | 66 | 80 | 26 | 100 | 33 | 200 | 66 |
| Lok | 93 | 35 | 118 | 44 | 236 | 89 | | | | | | |
| Schotterpflug | 6 | 4 | 8 | 5 | 16 | 10 | | | | | | |
| Portalkran FF/ LKW-Kran | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| Betonmischer | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| Betonpumpe | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 3 | 2 |

Tabelle 4-19: Häufigkeit der Maschineneinsätze in Abhängigkeit verschiedener Dauern der Analyse

Zu Tabelle 4-19 ist zu erklären, dass sich min und max wiederum auf den frühesten bzw. spätesten Zeitpunkt der Auswechslung/ Instandhaltung der Oberbauteile bezieht. Die Lokomotive wird je nach Bedarf eingesetzt. Eine Abschätzung ergibt oben genannte Einsatzhäufigkeiten für die Lok. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Stopfmaschine je Gleisumbau 4 und je Instandhaltung 6 Durchgänge pro Streckenkilometer abarbeitet [19, 40]. Dementsprechend sind obige Werte noch zu multiplizieren.

Der Transport der Maschinen an den Einsatzort in Innsbruck kann teilweise selbstfahrend erfolgen oder wird durch eine vorgespannte Lokomotive im gezogenen Zustand bewältigt. Es wird angenommen, dass die Gleisbaumaschinen von österreichischen Bauunternehmen stammen und ihr Heimatbahnhof in Wien-Umgebung angesiedelt ist. Die Distanz Wien – Innsbruck beläuft sich auf etwa 500 km. Da Durcharbeitungen auf lange Sicht und in Mehrjahresplänen (Jahreseinsatzpläne) geplant werden, ist erwarten, dass solche Arbeiten so terminisiert werden, dass bei einem Einsatz bspw. in Vorarlberg anschließend ebenfalls Durcharbeitungen in Tirol stattfinden. Somit kann die Transportdistanz nicht in vollem Umfang einer Durcharbeitung an einem Einsatzort zugeschrieben werden. D.h., es wird damit gerechnet, dass bei dieser Studie jeweils noch drei andere Durcharbeitungen in der Westregion Österreichs erfolgen. Deshalb wird die Transportdistanz, welche diesem Projekt zugeordnet wird, auf 300 km reduziert. [19, 65, 71]

Beim Bau der Festen Fahrbahn kann davon ausgegangen werden, dass die Maschinen (Betonmischer, Betonpumpe, Kran etc.) von Bauunternehmen aus der näheren Umgebung stammen. Es wird hier eine Transportdistanz von ca. 10 km angenommen.

In Bezugnahme auf die Lebenszyklusphasen kann weiter ausgeführt werden, dass in der Nutzungsphase (B1-B7) sämtliche Prozesse, wie die Instandhaltung, Wartung, Austausch, Verbesserung und Modernisierung, wie es in der EN 15804 festgelegt ist, in der Ökobilanz berücksichtigt werden [59]. Hierbei sind vor allem Prozesse, wie Transporte, Gleisumbau, Herstellung neuer Komponenten, Entsorgung der alten ausgebauten Komponenten etc. zu nennen. Der Austausch/ die Modernisierung gewisser Bestandteile des Oberbaus erfolgt in der Häufigkeit der notwendigen Maschineneinsätze aus Tabelle 4-19 bzw. der Dauern aus Tabelle 4-17. Daher ergeben sich je nach Komponente mehrere Auswechslungen in der Nutzungsphase und dementsprechend auch mehrere Entsorgungsvorgänge. Die jeweiligen Entsorgungsszenarien je Produkt werden im nächsten Abschnitt erläutert.

4.4.5 Entsorgung (C1-C4)

Ist die Nutzungsphase der Oberbaukomponenten beendet, sind die Teile in der Entsorgungsphase auszubauen und zu entsorgen. Je nach Bestandteil ergeben sich verschiedene Entsorgungssituationen, welche zu betrachten sind. Aus der Masterarbeit von Klammbauer, 2017, welche sich intensiv mit dem Thema der Entsorgung beschäftigt hat, geht hervor, dass folgende Situationen im Netz der ÖBB denkbar sind. [40]

| | Entsorgungsart | Entsorgung | Wiedereinbau | Wiedereinbau in anderer Funktion | Verkauf an Externe |
|---------------|-----------------|------------|--------------|----------------------------------|--------------------|
| Holzschwelle | Verbrennung | 80% | 10% | 10% | 0% |
| Betonschwelle | Betonentsorgung | 50% | 10% | 0% | 40% |
| Schiene | Verschrottung | 50% | 30% | 0% | 20% |
| Schotter | Deponie | 70-100% | 0-30% | 0% | 0% |

Tabelle 20: Entsorgung der Oberbaukomponenten laut ÖBB [50]

Abbildung 4-7: Entsorgungsszenarien aus der Masterarbeit Klammbauer, 2017 [40]

Aufgrund der Tatsache, dass das hier betrachtete Gleis ein Gleiskörper einer Hochleistungsinfrastruktur darstellt, ist ein Wiedereinbau nur in seltenen Fällen wahrscheinlich. Deshalb wird für die Betonschwellen sowie für die FF angenommen, dass der Entsorgungsanteil auf 100 % beziffert werden kann. [40]

Zum Wiedereinbau ist hinzuzufügen, dass bei einem geplanten Wiedereinbau die Altschwellen vor dem erneuten Einsatz auf Funktionalität zu prüfen sind. Bei einer Streckenbelastung > 50.000 t pro Tag scheint der Aufwand für das Prüfen bei einem unwahrscheinlichen Neueinbau unverhältnismäßig. [40]

Für die Betonkomponenten wird prognostiziert, dass diese zu 60 % dem Betonrecycling zugeführt werden und somit in dieser Studie laut Verbraucherprinzip nur Aufwände für Transport anfallen. Die restlichen 40 % werden deponiert.

Bei den Schienen wird ein 50 %-iger Wiedereinbau als realistisch angesehen. Die restlichen 50 % werden der Entsorgung zugeordnet [40].

Der Gleisschotter wird im Zuge des Umbaus mit Reinigungsbettungsmaschinen teilweise aufbereitet, sodass bis zu 30 % des Schotters wiederverwendet werden können. 70 % des Schotters landen jedoch auf Deponien [40].

Die Betonschwellen werden ebenfalls mittels Gleisbaumaschinen ausgebaut und deshalb gleisgebunden an ihren Bestimmungsort transportiert.

Bei der Festen Fahrbahn werden die Gleistragplatten, die Vergussbetonschicht und die Lastverteilerplatte mittels Hydraulikbaggern mit Hydraulikhammer abgebrochen. Hierbei wird angenommen, dass die Stahlbetonplatten in 2-metrige Stücke zerkleinert werden und in dieser Form auf die LKW-Sattelaufleger geladen werden. Die Gleistragplatten sollen in einem Stück auf LKW-Sattelzügen Platz finden und abtransportiert werden. Als Transportdistanz für die Betonwerkstoffe der Festen Fahrbahn werden 15 km gewählt.

Für die weiteren Bestandteile des Oberbaus (Kleineisen, Zwischenlagen, Besohlungen etc.) wird vorausgesetzt, dass diese der Verbrennung (Erdölprodukte) bzw. der Verschrottung (Stahlteile) zugeführt werden [40]. Diese Vorgänge werden mit SimaPro unter Zuhilfenahme von ecoinvent-Datensätzen berücksichtigt.

Die Entsorgung bzw. die Wiederverwendung der Oberbaukomponenten ergeben folgende Auflistung:

| Modellierung der Entsorgung des Oberbaus | | | |
|---|---------------------------|-------------------|-------------------------|
| Oberbaukomponente | Art der Entsorgung | Entsorgung | Wiederverwendung |
| Betonschwelle | Betonentsorgung | 100 % | 0 % |
| FF | Betonentsorgung | 100 % | 0 % |
| Schiene | Verschrottung | 50 % | 50 % |
| Gleisschotter | Deponie | 70 % | 30 % |
| Zwischenlage | Verbrennung | 100 % | 0 % |
| Besohlung | Verbrennung | 100 % | 0 % |
| Elastische Trennschicht | Verbrennung | 100 % | 0 % |
| Schienenbefestigung | Verschrottung | 100 % | 0 % |

Tabelle 4-20: Modellierung der Entsorgung des Oberbaus

Da gewisse Komponenten durch eine Wiederverwendung eine Verlängerung der Lebensdauer erfahren, entfallen bei der Schiene, Teilen der Betonwerkstoffe und Teilen des Gleisschotters Aufwände und Emissionen, welche durch die Entsorgung des hier betrachteten Gleisabschnitts entstehen.

D.h., dass für diese Studie/ diese fiktive Strecke weniger entsorgt wird, als genutzt wird. Die Aufwände, die durch einen Wiedereinbau entstehen, werden dem neuen Gleisabschnitt zugeschrieben und sind nicht Teil dieser Studie.

Jedoch müssen beim vorliegenden Projekt die Aufwendungen durch den Ein- und Ausbau und den Instandhaltungsarbeiten sehr wohl diesem zugeordnet werden, da diese Tätigkeiten durchgeführt werden, ob eine Wiederverwendung vorgesehen ist oder nicht.

Lediglich der Abtransport zum Entsorgungsort kann durch einen Wiedereinbau entfallen, da angenommen wird, dass diese Produkte auf direktem Wege zum neuen Einsatzort verfrachtet werden. Jedoch ist im Rahmen dieser Studie nicht vorherzusehen, welche Transportdistanzen zwischen Ausbauort und neuem Einsatzort liegen. Deshalb können diese Distanzen hier nicht berücksichtigt werden.

Generell wird für die restlichen Teile, welche der Entsorgung zugeführt werden, angenommen, dass diese einen Transport von ca. 100 km bis zur jeweiligen Abfallbehandlung zurücklegen [40].

Abschließend ist zu erwähnen, dass es in der Entsorgungsphase (C1-C4) je Komponente nur eine einmalige Entsorgung gibt. Dies ist der Zuordnung der Vorgänge je Lebenszyklusphase geschuldet. In der Nutzungsphase (B1-B7) erfolgen die Auswechslungen der Komponenten im Betrieb und mit Beginn der Entsorgungsphase ist der Streckenabschnitt außer Betrieb und wird rückgebaut. Somit ist die Systemgrenze dieser Studie erreicht. Etwaige spätere Neulagen entziehen sich diesem Untersuchungsrahmen.

4.5 Wirkungsabschätzung

Wie bereits unter Abschnitt »2.2.3 Wirkungsabschätzung« beschrieben, stellt der erste Schritt der Wirkungsabschätzung die Wahl der Wirkungskategorien bzw. Indikatoren dar. Die verwendete Software SimaPro bietet eine Reihe an Methoden zur Wirkungsabschätzung an. Da sich diese Untersuchung an den Normen des CEN orientiert, wird die Methode nach EN 15804 + A2 für die Berechnung der Charakterisierung gewählt. Die Methode nach EN 15804 + A2 ermöglicht die Quantifizierung einer Reihe an Wirkungsindikatoren. Um die Lesbarkeit und Übersichtlichkeit der Umweltwirkungen der Studie und der nachfolgenden Ergebnisse gewährleisten zu können, wurden drei bedeutende Indikatoren aus oben genannter Methode gewählt. Diese sind in Tabelle 4-21 aufgelistet.

| Auswahl der Indikatoren für die Umweltwirkungen | | |
|--|--|-------------------------------|
| Wirkungskategorie | Indikator | Einheit |
| Klimawandel gesamt | Treibhauspotential insgesamt (eng.: Global Warming Potential, kurz: GWP-gesamt) | kg CO ₂ -Äq. |
| Versauerung | Versauerungspotential (eng.: Acidification Potential, kurz: AP), kumulierte Überschreitung | mol H ⁺ -Äq. |
| NRCED - gesamt | Nicht erneuerbarer kumulierter Energiebedarf (eng.: non renewable cumulative energy demand, kurz: NRCED) | MJ-Äq., (unterer Heizwert) |

Tabelle 4-21: Auswahl der Indikatoren für die Umweltwirkungen dieser Studie [59]

Nachfolgend werden die drei Wirkungskategorien näher beschrieben.

4.5.1 Klimawandel – gesamt (GWP - gesamt)

Die Kategorie Klimawandel (GWP) beleuchtet den Treibhauseffekt bzw. das Treibhauspotential von emittierten Luftschadstoffen und die damit absorbierte Energie. Die Zunahme der Erderwärmung ist direkt vom Treibhauseffekt bzw. von den Treibhausgasen abhängig, da diese Energie absorbieren und die Geschwindigkeit verringern, in welcher Energie wieder aus der Atmosphäre austritt. [2, 40, 72]

Bei der Ökobilanz versteht man unter Treibhauseffekt den zusätzlichen anthropogenen Treibhauseffekt, welcher menschengemacht ist und neben dem natürlichen Treibhauseffekt Gase emittiert [2].

Jedes Gas weist hierbei ein charakteristisches Treibhauspotential (GWP) auf und gibt somit Auskunft über Energiemengen (Strahlungsleistung), welche die Emissionen des Gases über einen Zeitraum absorbieren. D.h., es werden Absorptionskoeffizienten für infrarote Strahlung, die Zeitdauer der Gase in der Erdatmosphäre und die prognostizierte Immissionsentwicklung berücksichtigt [73]. Je nach Gas hat dieses eine unterschiedliche troposphärische Lebensdauer, wodurch die Ökobilanz-Modellierung einen zeitlichen Horizont abstecken muss. In der Regel wird dieser Zeithorizont mit 100 Jahren festgelegt. Es ist dann von den GWP₁₀₀-Werten die Rede. [2, 72]

Jedoch ist es für die Wirkungsabschätzung bzw. für die Ökobilanzierung sehr komplex jedes Gas in einer unterschiedlichen Einheit zu bewerten. Deshalb hat sich eine Methode etabliert, bei der die Emissionen bspw. von Methan, Lachgas, Kohlendioxid uvm. gewichtet werden können. Die Global Warming Potentials ermöglichen es sämtliche Treibhausgase anhand von kg CO₂-Äquivalenten abzubilden und die Wirkung nur anhand dieser Einheit zu beschreiben. Hierbei wird die äquivalente Masse an CO₂ für ein anderes Treibhausgas angegeben, welches den gleichen Effekt hat wie CO₂. [2]

Über die Charakterisierungsfaktoren besteht weltweit weitgehende Übereinstimmung. Die Werte für die Charakterisierung werden durch das IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) herausgegeben und sind in der Methode nach EN 15804 etabliert.

Für die gegenständliche Analyse wird die Charakterisierung ebenfalls softwaregestützt mittels SimaPro bewerkstelligt. SimaPro verfügt über bereits implementierte Datensätze zum Global Warming Potential. Die Charakterisierungsfaktoren stützen sich hierbei auf IPCC 2013 und beziehen sich auf einen 100-jährigen Zeithorizont. [59]

In Tabelle 4-22 werden einige der wichtigsten Treibhausgase samt Umrechnungsfaktor dargestellt.

| Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren GWP₁₀₀ nach IPCC 2013 | | |
|--|---------------------------------|-------------------------|
| Wirkungskategorie | Charakterisierungsfaktor | Einheit |
| Kohlendioxid CO ₂ | 1 | kg CO ₂ -Äq. |
| Methan CH ₄ | 36,8 | kg CO ₂ -Äq. |
| Distickstoffmonoxid N ₂ O | 298 | kg CO ₂ -Äq. |
| Stickstofffluorid N ₂ F ₂ | 17.900 | kg CO ₂ -Äq. |

Tabelle 4-22: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren GWP₁₀₀ nach IPCC 2013, entnommen aus SimaPro

4.5.2 Versauerung (AP)

Die Versauerung ist eine wesentliche Wirkungskategorie und kann zu drei Umweltproblemen, wie Versauerung von Boden und Gewässern sowie „Waldsterben“ führen [2].

Neben der natürlichen Versauerung stellen anthropogene Ursachen die Ökosysteme vor Probleme und bringen diese aus dem Gleichgewicht. Der Eintrag von den Schadgasen Schwefeldioxid (SO₂), Stickoxide (NO_x) und Ammoniak (NH₃), welche meist aus Prozessen der Industrie etc. entstammen, führen dazu, dass die Ökosysteme versauern. D.h., durch die Deposition der Schadgase und der damit verbundenen chemischen Reaktion kommt es zur Freisetzung von Protonen im Wasser/ Boden, was zu einer pH-Wert-Verschiebung hin zu einem sauren Milieu führt. Dadurch entsteht eine toxische Wirkung, was Lebewesen schädigt und bei Pflanzen zu einer multifaktoriellen Erkrankung führt. Sprich, es kommt zum Rückgang von Nadelwäldern und vermehrten Fischsterben. [2, 73–75]

Das Versauerungspotential (eng. Acidification Potential, AP) wird in der Ökobilanzierung als Charakterisierungsfaktor verwendet. In der EN 15804 findet das Charakterisierungsmodell nach Seppälä et al. 2006 Berücksichtigung. Das Modell von Seppälä stützt sich hierbei auf einen kumulierten Überschreitungsansatz (eng.: accumulated exceedance, kurz AE). Diese AE-Methode bietet gegenüber anderer Methoden Vorteile, da die räumliche und länderspezifische Umgebung berücksichtigt wird und dadurch genauere Ergebnisse entstehen. Durch die räumliche Dimension werden somit Ökosysteme ebenfalls sensibilisiert und miteinbezogen. [28, 59, 76, 77]

Als Einheit wird die Anzahl der H⁺-Protonen Äquivalente, welche pro Substanz produziert werden können, verwendet [73].

Nachstehend sind die wichtigsten Charakterisierungsfaktoren nach EN 15804 bzw. nach Seppälä et al. 2006 aufgelistet:

| Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren AP nach Seppälä et al. 2006 | | |
|---|---------------------------------|-------------------------|
| Wirkungskategorie | Charakterisierungsfaktor | Einheit |
| Schwefeldioxid SO ₂ | 0,711 | mol H ⁺ -Äq. |
| Stickstoffdioxid NO ₂ | 0,307 | mol H ⁺ -Äq. |
| Stickstoffoxide NO _x | 0,307 | mol H ⁺ -Äq. |
| Ammoniak NH ₃ | 1,72 | mol H ⁺ -Äq. |

Tabelle 4-23: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren AP nach Seppälä, entnommen aus SimaPro

4.5.3 Nicht erneuerbarer kumulierter Energiebedarf (NRCED)

Neben den oben genannten Wirkungskategorien erfährt der Energiebedarf immer mehr an Bedeutung. Gerade bei Produktionsprozessen scheint der Energiebedarf, genauer der kumulierte Energiebedarf von nicht erneuerbaren Energieträgern, eine Schlüsselrolle einzunehmen und findet aus gegebenem Anlass in Medienberichterstattungen vermehrt Berücksichtigung.

Der kumulierte Energiebedarf (eng.: cumulative energy demand, kurz CED) wird häufig in Ökobilanzen als Energieverbrauchsindikator verwendet. Der Grundgedanke des CED ist es, alle gewonnene Energie aus der Natur, sowohl Primärenergieverbrauch aus erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieflüssen zu berücksichtigen. Diese Energie soll einerseits die Energie selbst als auch solche, die für materielle Zwecke (Produktion) genutzt wird, berücksichtigen. [78]

Bei der vorliegenden Untersuchung beschränkt sich die Betrachtung auf die nicht erneuerbaren Energiebeiträge, da diese Energiequellen einem höheren Risiko der Erschöpfung ausgeliefert sind als die Erneuerbaren. Demnach beinhaltet der nicht erneuerbare kumulierte Energiebedarf (eng.: non renewable cumulative energy demand, kurz NRCED) sämtliche aus der Natur gewonnene Formen von Energie aus nicht erneuerbaren Produkten. [78]

Laut EN 15804 + A2, Tab. 6 wird die Charakterisierung der o.a. verwendeten Energie in MJ-Äquivalenten in Bezug auf den unteren Heizwert verwendet [59].

In Tabelle 4-24 sind die wichtigsten Rohstoffe bzw. Energieträger samt Charakterisierungsfaktor angeführt.

| Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren NRCED | | |
|---|---------------------------------|----------------|
| Wirkungskategorie | Charakterisierungsfaktor | Einheit |
| Energie, Kohle | 1 | MJ-Äq. |
| Energie, Öl | 1 | MJ-Äq. |
| Energie, Gas | 1 | MJ-Äq. |
| Energie, nicht | 1 | MJ-Äq. |
| Erdgas pro m ³ | 34,5 | MJ-Äq. |
| Rohöl | 43,2 | MJ-Äq. |
| Braunkohle | 8,75 | MJ-Äq. |
| Steinkohle | 18,2 | MJ-Äq. |

Tabelle 4-24: Übersicht einiger Charakterisierungsfaktoren NRCED, entnommen aus SimaPro

4.6 Auswertung

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung bzw. Charakterisierung für die jeweiligen Lebenszyklusphasen A1-C4 der Oberbauvarianten präsentiert und beschrieben.

Um die Richtigkeit der Ergebnisse auf Plausibilität zu prüfen, wurde eine Ergebnisverifikation anhand der Masterarbeit „Ökobilanz Gleis“ von Klammbauer, 2017 durchgeführt. Diese Prüfung wird am Ende der Ergebnispräsentation kurz erläutert.

Anfangs werden je Oberbauvariante die gesamten Ergebnisse des Lebenszyklus für den jeweiligen Analysezeitraum (80 oder 200 Jahren) dargestellt und beschrieben, bevor auf einzelne Phasen gesondert eingegangen wird. Die zuvor mehrfach erwähnten minimalen und maximalen Liegedauern werden in der Ergebnispräsentation im Detail diskutiert und die Resultate entsprechend aufbereitet dargestellt.

Bei der Betrachtung der einzelnen Phasen werden die Ergebnisse aus der Charakterisierung bis auf die Komponentenebene heruntergebrochen. Somit wird eine genaue Zuordnung der Zahlenwerte ermöglicht. Daraus können auch zentrale Aussagen zu den möglichen ökologischen Potentialen getätigt werden.

Abschließend werden die Oberbauten für den Wirkungsindikator GWP gegenübergestellt um spätere Aussagen über die Umwelteffekte in der jeweiligen Lebenszyklusphase treffen zu können (siehe »4.6.7 GWP – Gegenüberstellung der Analysen«). Zudem wird mittels Diagramme veranschaulicht, wie sich das GWP bei Veränderung des Betrachtungszeitraums der untersuchten Strecke in der Nutzungsphase (B1-B7) verändert (siehe »4.6.6 Änderung des GWP bei Veränderung des Analysezeitraums«). Hierbei wird ebenso eine Ergebnispräsentation ohne Schienen, welche, wie später ersichtlich wird, einen bedeutenden Anteil an den Umweltwirkungen einnehmen, durchgeführt und entsprechend diskutiert.

4.6.1 Analyse 1: Betonschwelle K1

4.6.1.1 Betrachtungszeitraum 80 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

Die nachstehenden Diagramme zeigen, dass die Nutzungsphase, welche die Auswechslung von Oberbaukomponenten über die Jahre beinhaltet, den Lebenszyklus mit ca. 83 % deutlich prägt. Die zweitgrößte Kategorie stellt die Erstherstellung in der Phase (A1-A3), gefolgt von der Entsorgungsphase (C1-C4) mit 2 % und der Errichtungsphase (A4-A5) mit 1 %, dar.

Das GWP beläuft sich bei der Annahme von minimaler Liegedauer und einem Betrachtungszeitraum im Gesamten auf etwa 3.306 Tonnen CO₂ eq. Das Versauerungspotential (AP) kann mit ca. 11.070 mol H⁺ eq und der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand mit 35,670 Mio. MJ eq beziffert werden.

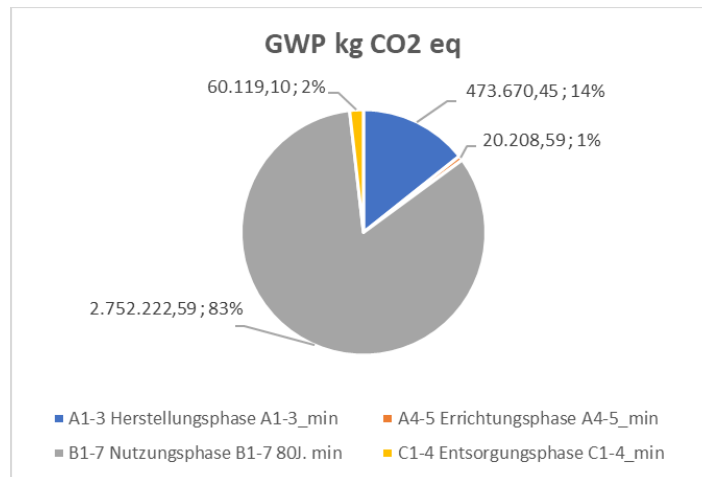


Abbildung 4-8: Analyse 1-GWP, 80 Jahre_min

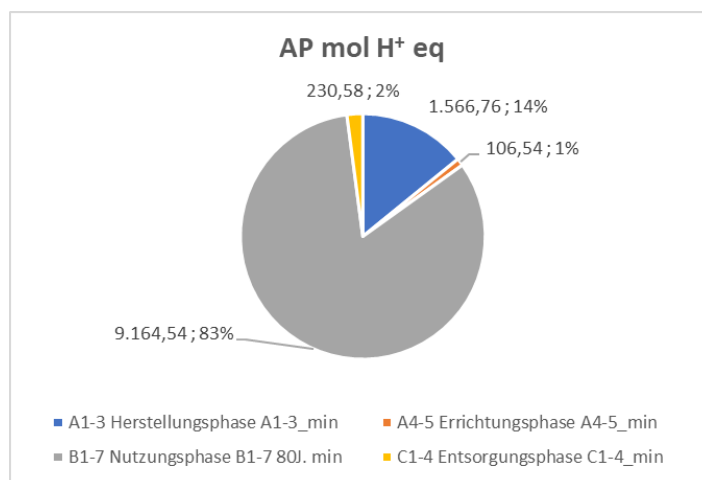


Abbildung 4-9: Analyse 1-AP, 80 Jahre_min

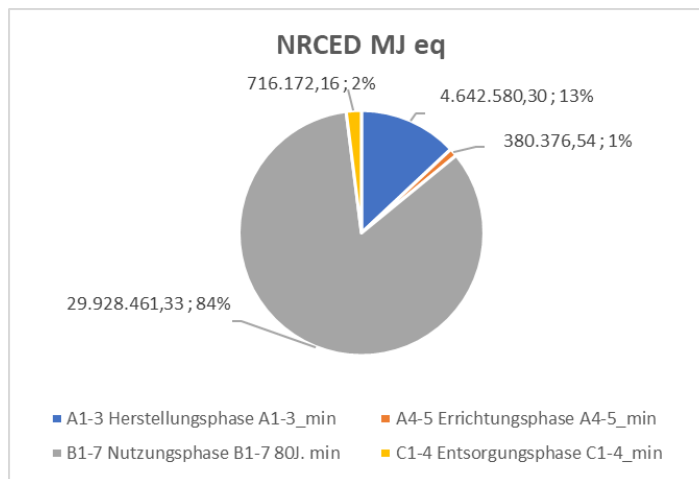


Abbildung 4-10: Analyse 1-NRCED, 80 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

Verlängert man nun die Liegedauer der Komponenten, ist wiederum zu erkennen (siehe nachfolgende Abbildungen), dass die Nutzungsphase den Lebenszyklus wesentlich bestimmt. Jedoch ist ersichtlich, dass sich bei Verlängerung der Liegedauer logischerweise die Anteile der Auswirkungen verschieben. Hierbei nehmen vor allem, prozentuell gesehen, die Wirkungen, welcher der Herstellungsphase zuzuschreiben sind, zu. Absolut gesehen, ändern sich die Zahlenwerte der Herstellungsphase nicht. Die Entsorgungsphase und die Errichtungsphase verändern sich natürlich durch die Verlängerung der Liegedauer in absoluten Zahlen ebenfalls nicht. Prozentuell gesehen ist die Zunahme in diesen zwei Bereichen (A4-A5 und C1-C4) jedoch auch marginal.

Die gesamten absoluten Ergebnisse weisen dabei deutlich geringere Beträge auf, als bei der minimalen Liegedauer, da Ressourcen gespart werden können.

Das GWP beläuft sich somit auf etwa 2.200 Tonnen CO₂ eq. Das Versauerungspotential (AP) kann mit ca. 7.391 mol H⁺ eq und der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand (NRCED) mit 23,415 Mio. MJ eq beziffert werden.

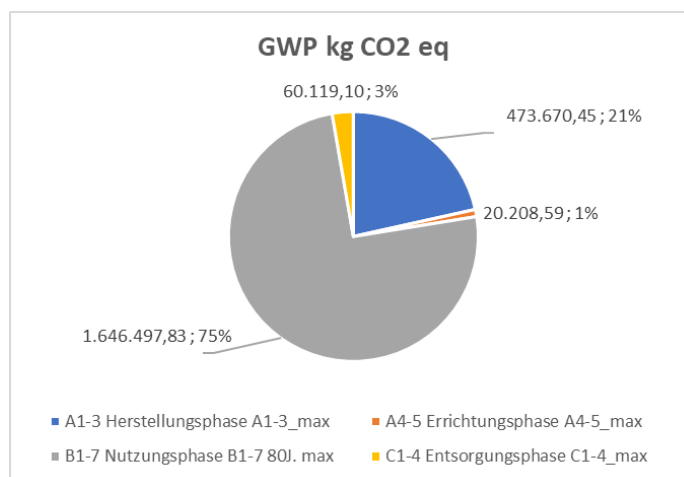


Abbildung 4-11: Analyse 1-GWP, 80 Jahre_max

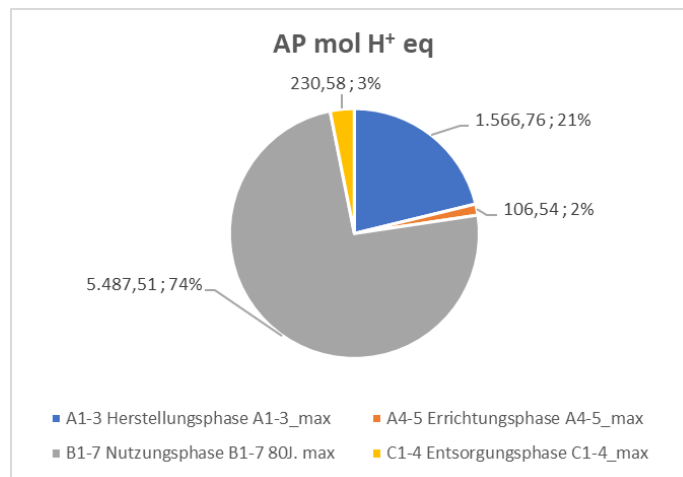


Abbildung 4-12: Analyse 1-AP, 80 Jahre_max

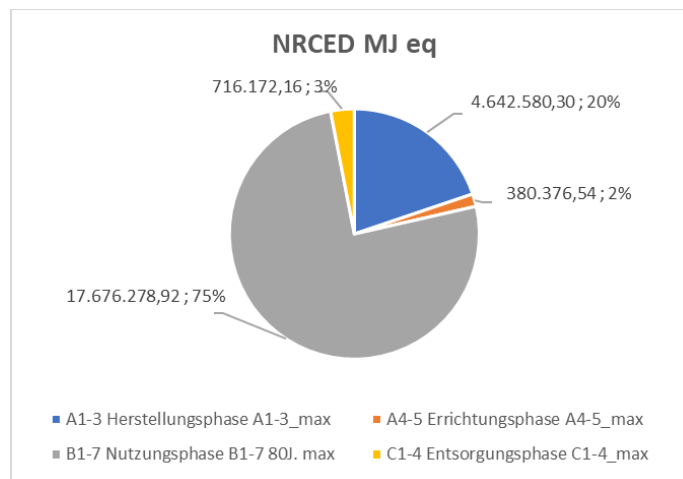


Abbildung 4-13: Analyse 1-NRCED, 80 Jahre_max

Im Folgenden werden die einzelnen Lebenszyklusphasen separat und detaillierter begutachtet und beschrieben.

Herstellungsphase A1-A3

Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Phasen können die Umweltwirkungen der einzelnen Komponenten dargestellt werden. Auf der nächsten Seite in Abbildung 4-14 ist die Herstellungsphase des Schotteroberbaus mit der Schwelle K1 abgebildet.

Es ist zu erkennen, dass die Schienen mit etwa 50 % den größten Anteil der Umweltwirkungen in der Produktion einnehmen. Dahinter folgt die Schwelle bzw. die Besohlung mit ca. 10 %. Die Herstellung des Gleisschotters beläuft sich auf ca. 6 % des GWPs.

Grundsätzlich ist bereits in dieser Lebenszyklusphase zu erkennen, dass ökologische Potentiale vorhanden sind. Vor allem bei der Schienenproduktion/ Stahlerzeugung könnten bei Optimierung der Produktion in allen betrachteten Wirkungskategorien Umweltwirkungen reduziert werden.

Bei den Betonschwellen stellt sich der Beton bzw. der Klinker für die Zementherstellung als „Treiber“ heraus. Eine Reduktion des Zementgehalts in den Schwellen wäre eine denkbare Option. Jedoch darf eine solche Minderung natürlich nicht zu Lasten der Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Produkts fallen.

In Hinblick auf den Gleisschotter würde natürlich eine Verringerung der Menge pro Streckenkilometer eine ökologische Verbesserung mit sich bringen. Unter Vorgriff auf die Analyse der Schwelle L2 und der ermittelten Ergebnisse, kann im gegenständlichen Fall gesagt werden, dass Einsparungspotentiale von Gleisschotter bei Reduktion der Bettungsbreite um 0,3 m vorhanden sind und dadurch Ressourcen geschont werden können. Die Umweltwirkungen reduzieren sich dabei proportional mit der Menge des eingesetzten Gleisschotters.

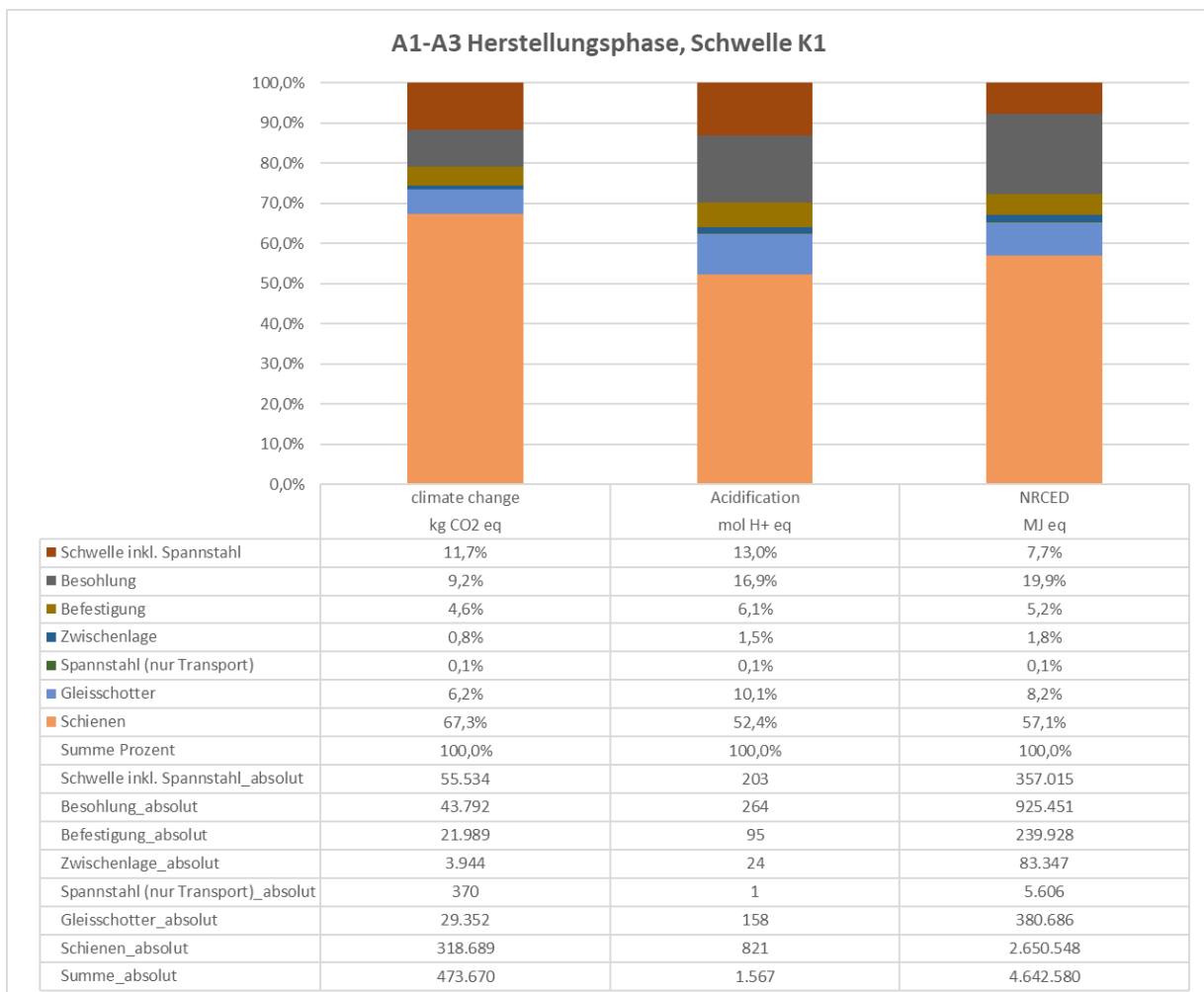


Abbildung 4-14: Analyse 1, Herstellungsphase A1-A3

Errichtungsphase A4-A5

Bei der Errichtungsphase (siehe Abbildung 4-15) überwiegen die Umweltwirkungen, welche durch den Transport vom Hersteller an den Einbauort entstehen. Hierbei sind vor allem die Transporte mit größerer Wegstrecke und großen Tonnagen prägend. Die Aufwände,

Maschineneinsätze etc. beim Einbau selbst nehmen nur einen Bruchteil der Gesamtwirkungen in der Lebenszyklusphase A4-A5 ein und belaufen sich bei Betrachtung des GWP auf etwa 5 %. Maximal ergibt sich ein Anteil des Einbaus beim nicht erneuerbaren kumulierten Energiebedarf (NRCED) von knapp einem Drittel.

In dieser Lebenszyklusphase sind kaum ökologische Optimierungspotentiale zu erkennen, da im Zuge dieser Untersuchung angenommen wird, dass beinahe alle Transporte zum Einbauort mit der umweltfreundlichen Bahn erfolgen. Die Herstellung beim SchO und sämtliche damit verbundenen Arbeiten erfolgen in dieser Studie mit Gleisumbaumaschinen, welche ebenfalls gleisgebunden mit vorgespannter Lok bzw. selbstfahrend an den Einsatzort gelangen.

Das Einzige, was in Abbildung 4-15 zu erkennen ist, ist, dass der Gleisschotter aufgrund der großen transportierten Mengen und des angenommenen LKW-Transports einen erheblichen Anteil der Effekte auf die Umwelt einnimmt. Hierbei würde einerseits ein Transport per Bahn eine deutliche Verbesserung mit sich bringen. Andererseits würde eine mengenmäßige Verminderung des Gleisschotters den ökologischen Fußabdruck des Oberbaus verbessern. Zweiteres wird nachfolgend beim SchO mit der Schwelle L17 genauer untersucht.

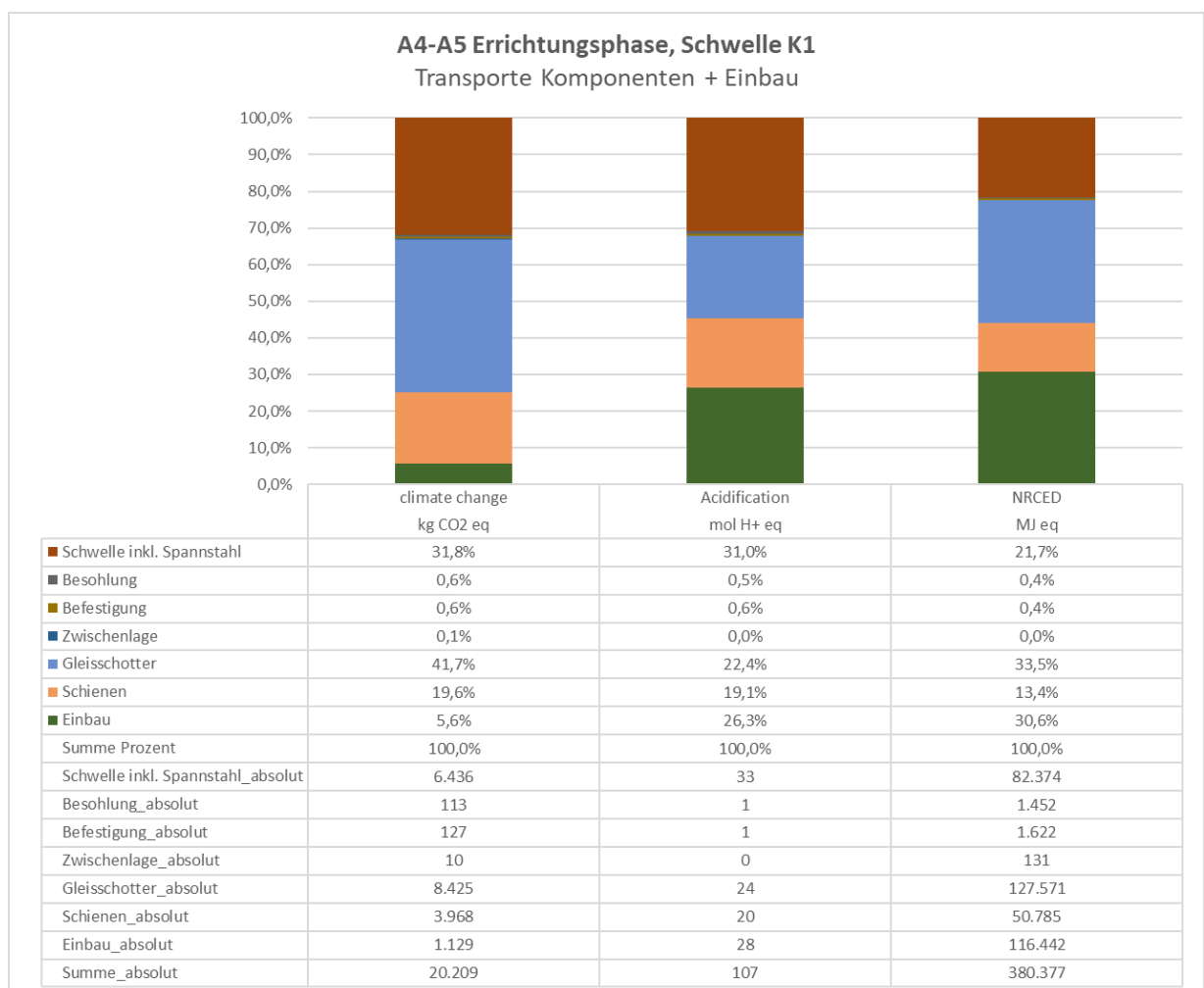


Abbildung 4-15: Analyse 1, Errichtungsphase A4-A5

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

Die Nutzungsphase nimmt, wie bereits o.a., den größten Anteil der Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus ein. Dabei ist die Liegedauer der einzelnen Komponenten der „Multiplikator“ der Umwelteinflüsse und deshalb von wesentlicher Bedeutung. Logischerweise können die Bestandteile des Oberbaus bei längerer Liegedauer länger im Gleiskörper verbleiben. Während dieser Nutzung im Gleiskörper entstehen keine bedeutenden Auswirkungen auf die Umwelt. Werden jedoch Teile des Oberbaus modernisiert bzw. gewechselt, so ist dieser Tausch jeweils mit Maschineneinsätzen, Herstellungs- und Transportprozessen der neuen Komponenten, dem Ein- und Ausbau und der abschließenden Entsorgung verbunden. D.h., dass bei einem SchO im Betrachtungszeitraum von 80 Jahren mehrere Modernisierungszyklen durchlaufen werden und dementsprechend Umweltwirkungen entstehen.

Im Speziellen nimmt bei der Nutzungsphase B2-B5 bei differenzierter Betrachtung (vgl. Abbildung 1-13) die Herstellung von neuen Oberbaukomponenten den größten Anteil ein. Die Herstellung der Einzelteile wurde hierzu bereits bei der Herstellungsphase A1-A3 näher beschrieben. Unter Vorgriff auf Abschnitt »4.6.7 GWP – Gegenüberstellung der Analysen« und der ermittelten Ergebnisse, kann festgestellt werden, dass hierbei die Schiene einen wesentlichen Anteil der Umweltwirkungen in der Nutzungsphase einnimmt. Das kann damit begründet werden, dass die Schiene auf hochbelasteten Strecken (Hochleistungsinfrastruktur) gegenüber anderen Oberbaukomponenten eine relativ geringe Lebensdauer/ Liegedauer aufweist.

Ökologische Verbesserungsmöglichkeiten stellen daher in der Nutzungsphase wiederum die Schiene bzw. generell die Liegedauer der einzelnen Komponenten des Oberbaus dar. Die damit verbundenen Prozesse wie Transporte, Ein- und Ausbautvorgänge und Entsorgung sind proportional zur Liegedauer.

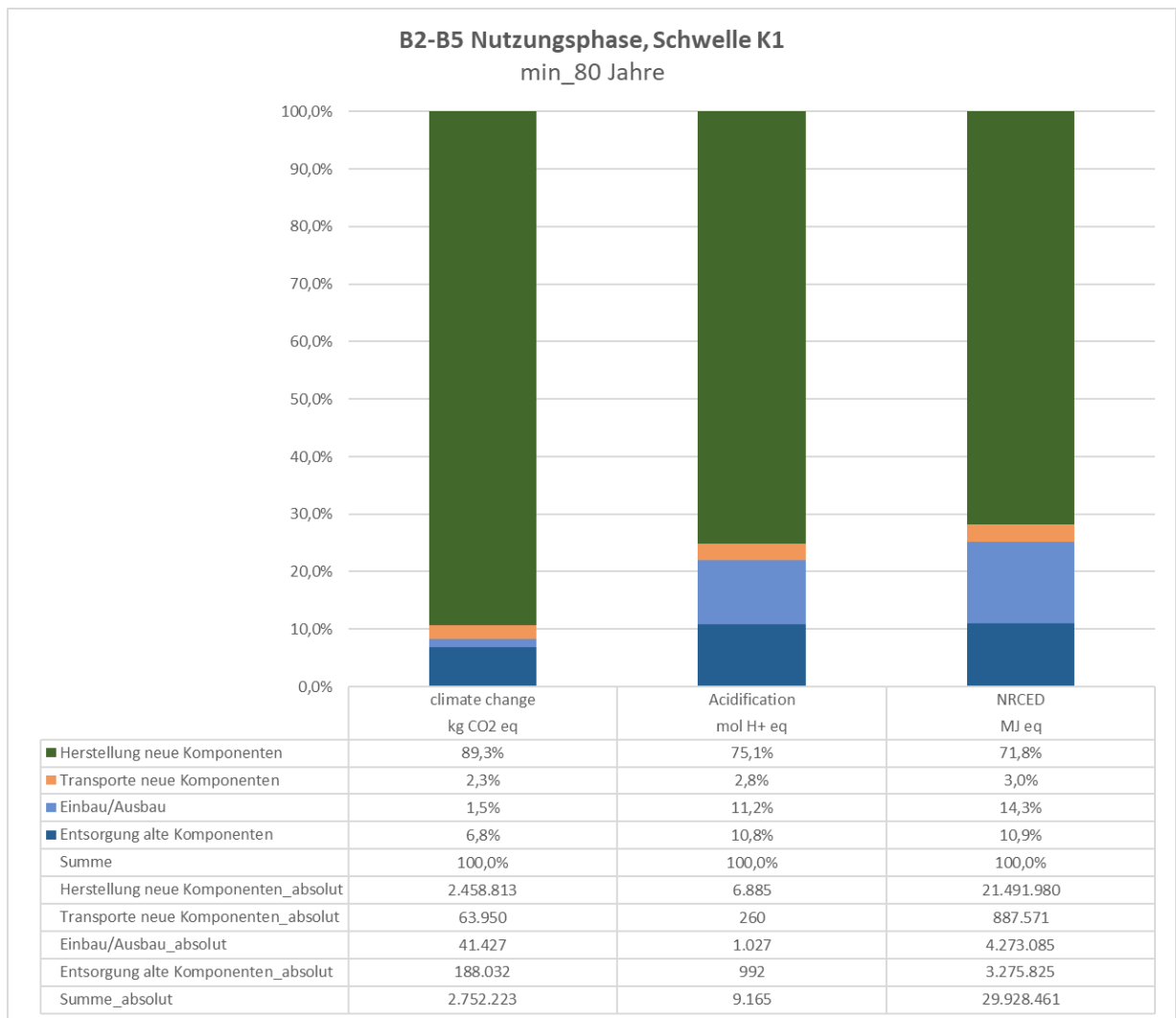


Abbildung 4-16: Analyse 1, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 80 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

Aufgrund der Tatsache, dass sich nur die Nutzungsphase durch eine länger Liegedauer verändert, verringert sich bei der Betrachtung der „Maximalen Liegedauer“ der Materialeinsatz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass geringere Mengen des Oberbaus über den Analysezeitraum von 80 Jahren modernisiert bzw. ausgetauscht werden müssen.

In der Datentabelle der Abbildung 4-17 ist ersichtlich, dass durch den hier einmaligen Gleisumbau, die reduzierte Schotterbettreinigung (zwei Reinigungen weniger) und durch den 4-maligen Schientausch in absoluten Zahlen die Reduktion der Wirkungen augenfällig sind. Bei Begutachtung des GWPs der Nutzungsphase mit minimaler und maximaler Liegedauer (Abbildung 4-16 & Abbildung 4-17) ist zu erkennen, dass durch die Verlängerung der Liegedauer etwa 1.000.000 kg CO₂ eq. eingespart werden können. Bei den restlichen Wirkungsindikatoren ergibt sich eine Minderung der Auswirkungen auf etwa die Hälfte.

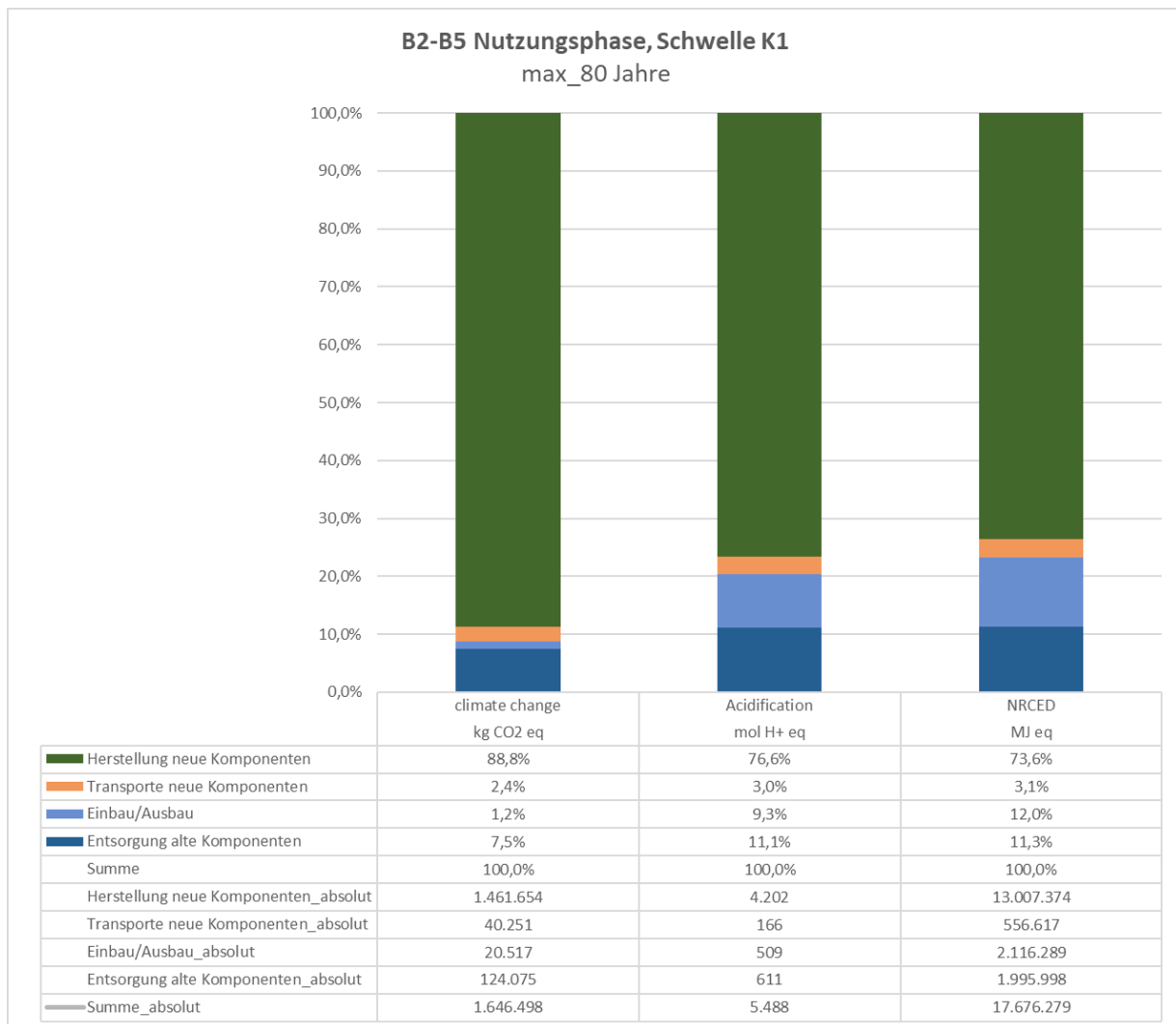


Abbildung 4-17: Analyse 1, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 80 Jahre

Entsorgungsphase C1-C4

Bei der Entsorgung der Oberbaueinzelteile ist für die ökologische Sicht die Art der Abfallbeseitigung entscheidend. So verursacht der Gleisschotter, welcher zu 70 % deponiert wird (Annahme in dieser Studie), die größten Auswirkungen auf die Umwelt. Dementsprechend scheint auch hier eine Reduktion der Schottermenge aus ökologischer Sichtweise als sinnvoll.

Ebenso schneiden alle Produkte, welche in die Verbrennung gehen, verhältnismäßig „schlecht“ ab und verursachen deutliche Umweltwirkungen. Hiermit sind die Erdölprodukte der Besohlung und der elastischen Zwischenlage gemeint. Eine andere Art der Entsorgung für die Erdölprodukte erscheint für die Besohlungen und die Zwischenlagen als denkbar und sinnvoll, wurde jedoch in dieser Studie nicht weiter untersucht. Imaginabel wären etwaige Abfallbehandlungen. So wäre es bspw. möglich, weitere neue Produkte aus den Zwischenlagen bzw. Besohlungen zu erzeugen, sofern dies die chemische Zusammensetzung zulässt. Exkurs: Man denke hierbei an die T-Shirts aus PET-Flaschen etc.

Die Betonschwellen selbst fallen durch das Betonrecycling und den geringen Anteil an Deponierung nicht wesentlich ins Gewicht. Selbiges gilt für die Schienen bzw. die Befestigung. Diese Stahlerzeugnisse werden durch die 50 %-ige Wiederverwendung und die Rückführung in die Stahlproduktion als Stahlschrott weitestgehend wiederaufbereitet.

Die Abbildung 1-14 zeigt die Erkenntnisse nochmals in bildlicher Form:

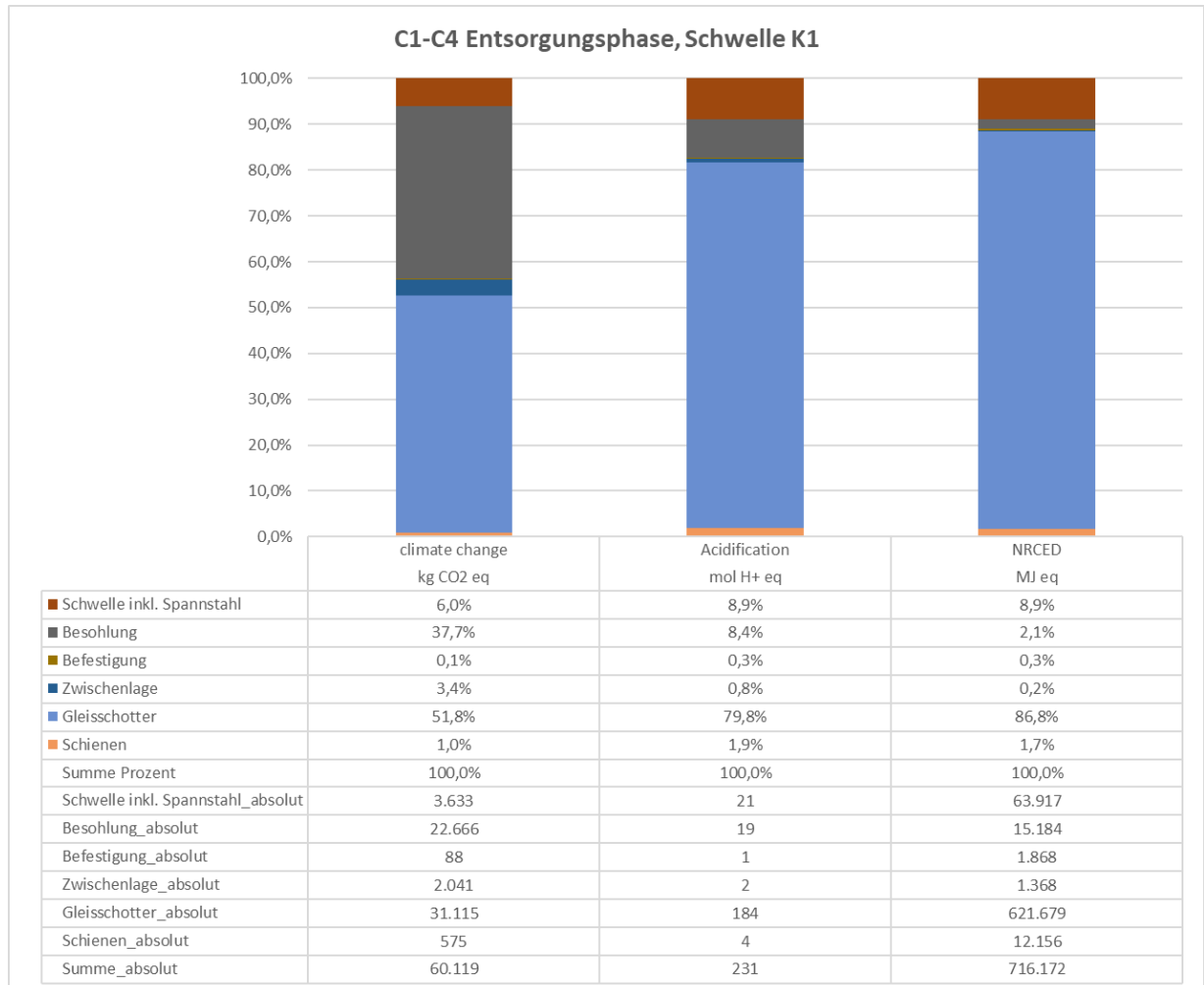


Abbildung 4-18: Analyse 1, Entsorgungsphase C1-C4

4.6.1.2 Betrachtungszeitraum 200 Jahre

Verlängert man nun den Analysezeitraum um 120 Jahre, ist zu erkennen, dass die Umweltwirkungen, die aus der Nutzungsphase einhergehen, bereits 94 % der Effekte des gesamten Lebenszyklus beanspruchen.

Betrachtet man wiederum die Nutzungsphase im Detail (vgl. Abbildung 4-25 und Abbildung 4-26), so ist zu erkennen, dass die Wirkungen proportional mit den Jahren zunehmen. Die prozentuelle Aufteilung von Herstellung, Transport, Ein- und Ausbau, sowie Entsorgung verändern sich unwesentlich.

Im Folgenden werden die Ergebnisse wiederum bildlich dargestellt und die wesentlichen Erkenntnisse, welche sich vom Betrachtungszeitraum von 80 Jahren beträchtlich unterscheiden,

beschrieben. Die Phasen A1-A3, A4-A5 und C1-C4 verändern sich durch die Verlängerung des begutachteten Zeitraums nicht. Dementsprechend werden hier nur die Phasen B2-B5 im Detail betrachtet.

Minimale Liegedauer (A1-C4)

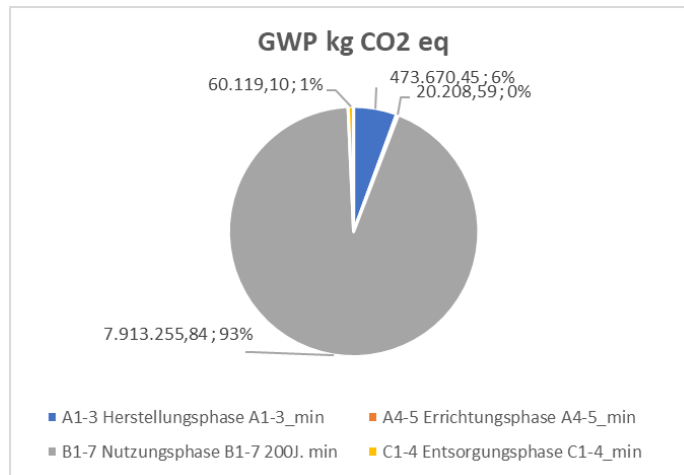


Abbildung 4-19: Analyse 1-GWP, 200 Jahre_min

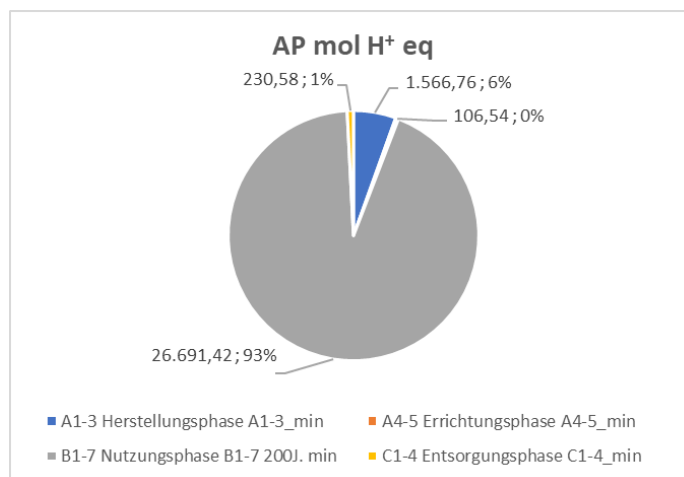


Abbildung 4-20: Analyse 1-AP, 200 Jahre_min

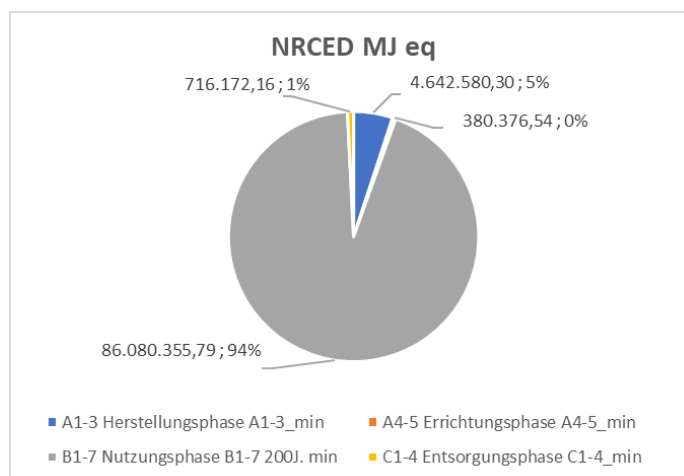


Abbildung 4-21: Analyse 1-NRCED, 200 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

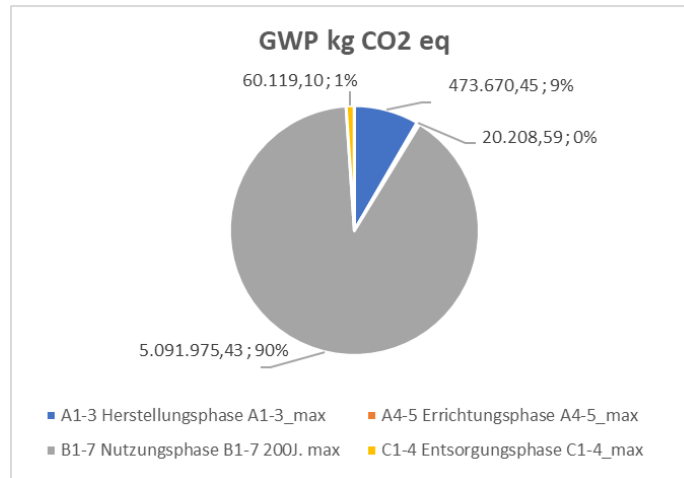


Abbildung 4-22: Analyse 1-GWP, 200 Jahre_max

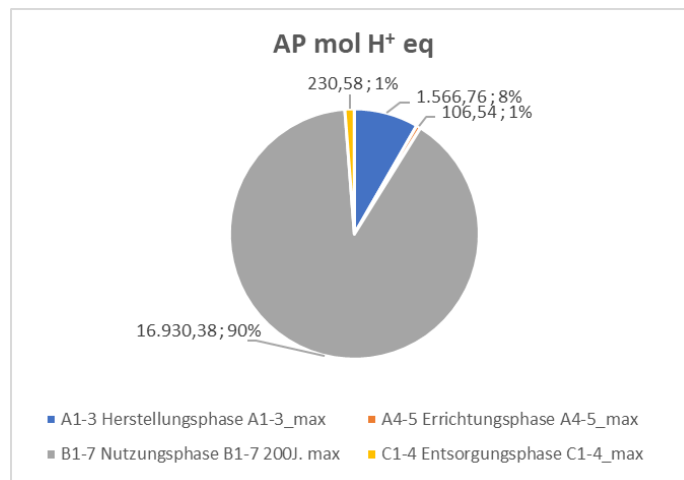


Abbildung 4-23: Analyse 1-AP, 200 Jahre_max

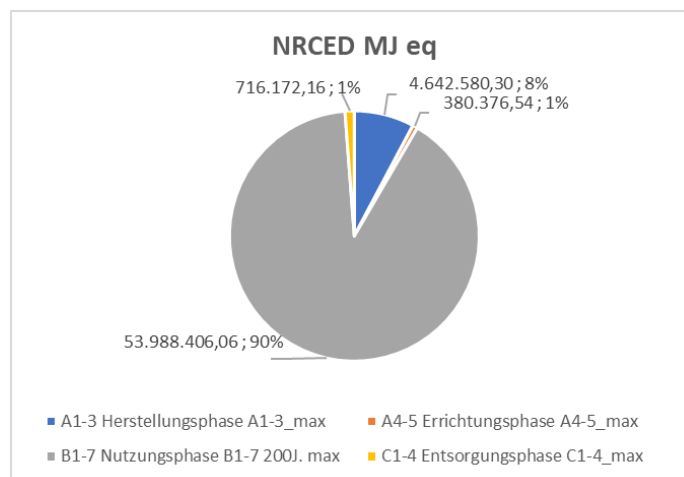


Abbildung 4-24: Analyse 1-NRCED, 200 Jahre_max

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

Es ist klar ersichtlich, dass die absolute Summe der Umweltwirkungen proportional mit dem Mehr an Auswechslungen von Oberbaukomponenten ansteigt. Die prozentuelle Aufteilung der einzelnen Prozesse (Herstellung, Transport, Ein- und Ausbau und Entsorgung) unterscheidet sich von der Betrachtungsweise mit 80 Jahren nur marginal.

Es liegt somit auf der Hand, dass durch die Verlängerung der Liegedauer die ökologischen Auswirkungen gemindert und auf lange Sicht Ressourcen gespart werden können. Demnach scheint es sinnvoll zu sein, die Produkte dahingehend so zu optimieren, dass diese eine lange Lebensdauer bzw. Liegedauer aufweisen und in der Nutzungsphase eine geringe Anzahl an Auswechslungen/ Modernisierungen aufweisen. Dadurch kann eine mehrfache Neuerstellung von Elementen verhindert werden. In Summe könnte sich somit die Konstruktion bei der Ersterstellung aus ökologischer Sicht verschlechtern, wenn diese später in der Nutzungsphase eine längere Liegedauer aufweist, da der Mehrwert des längeren Verbleibs im Gleiskörper klar kompensiert wird. D.h., es könnten in der Phase der Herstellung mehr Ressourcen verbraucht werden, wenn dadurch die Dauerhaftigkeit bzw. Lebensdauer des Produkts derart verbessert wird, sodass es langfristig im Betrieb verbleiben kann.

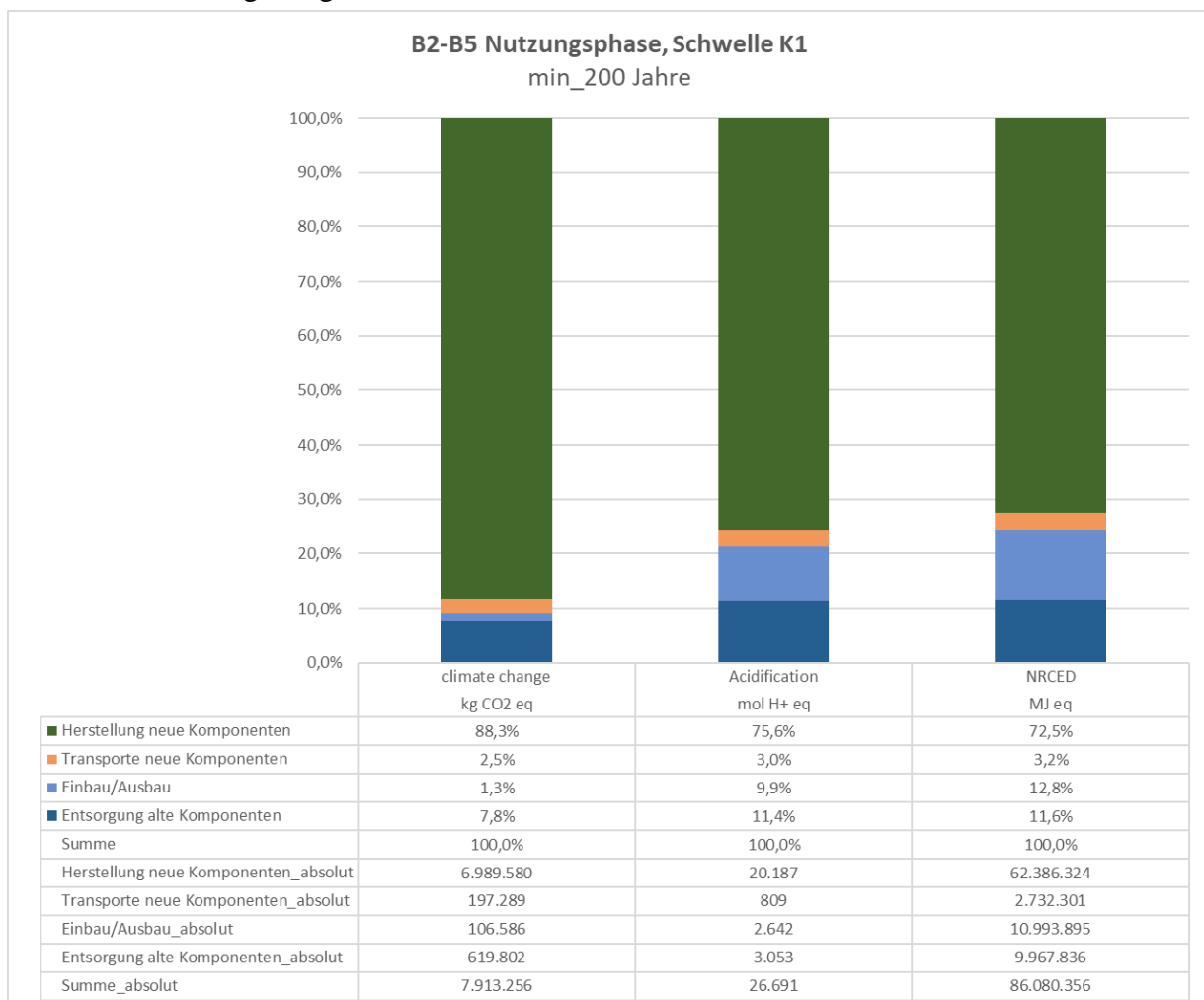


Abbildung 4-25: Analyse 1, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 200 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

Bei der maximalen Liegedauer kommt man zum selben Ergebnis, wie bei der zuvor beschriebenen, minimalen Liegedauer. Es erscheint auch hier sinnvoll, die Lebensdauer der Oberbauelemente auf ein Maximum zu trimmen, da sich die prozentuellen Aufteilungen der Prozesse der Nutzungsphase bei Vergrößerung des Betrachtungszeitraums nicht wesentlich verändern. Das bestätigen die absoluten Zahlen. Es ist auch bei der 200-jährigen Betrachtung augenscheinlich, dass geringere Umweltwirkungen auftreten. Der GWP unterscheidet sich von minimaler zu maximalen Liegedauer um etwa 2.000.000 kg CO₂ eq. Beim Versauerungspotential oder dem nicht erneuerbaren kumulierten Energiebedarf entstehen bei der maximalen Anschauung etwa ein Drittel weniger an Umweltwirkungen.

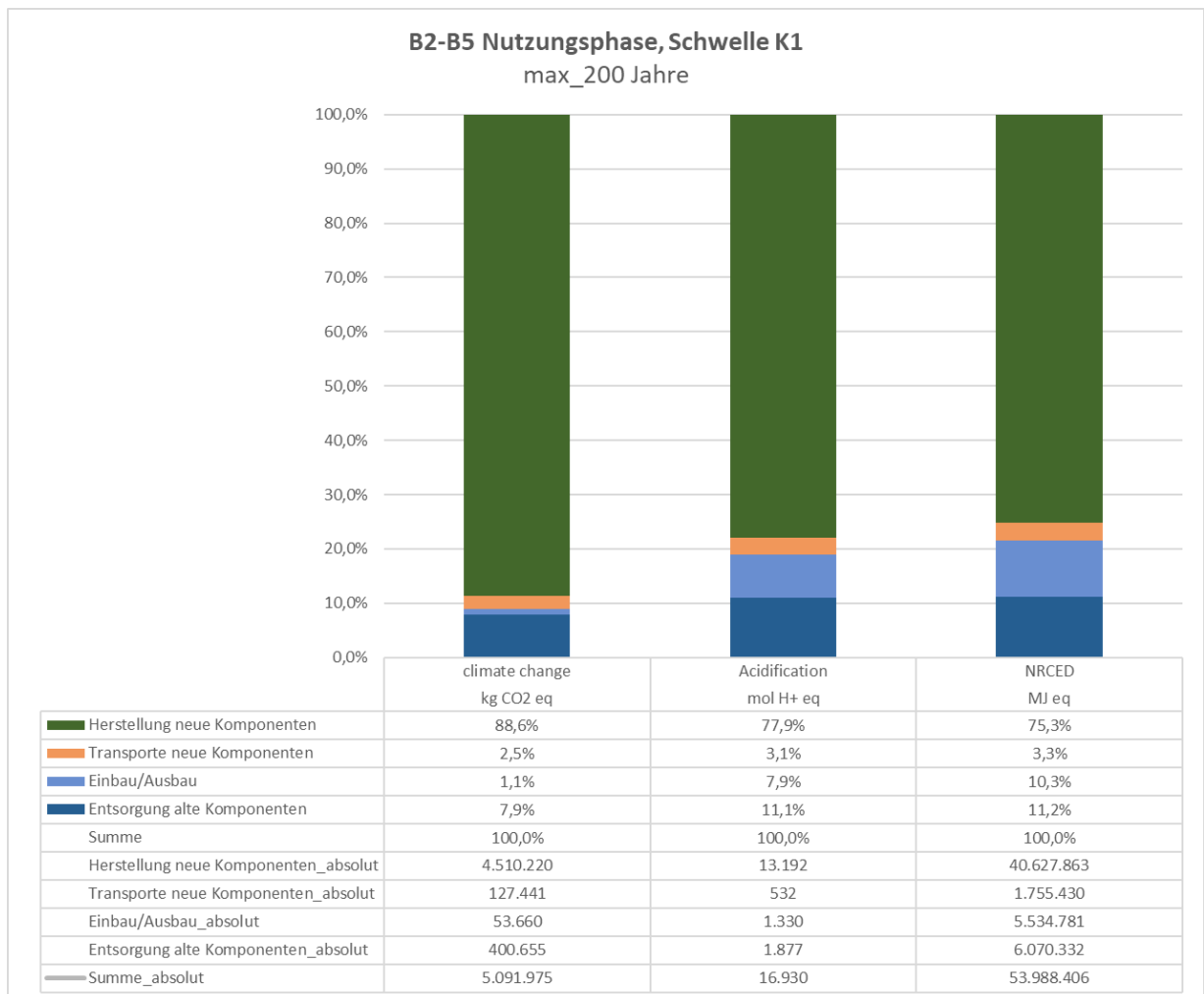


Abbildung 4-26: Analyse 1, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 200 Jahre

4.6.2 Analyse 2: Betonschwelle L2

Für die Monoblockschwelle L2 ergeben sich dieselben Erkenntnisse wie bei der zuvor erwähnten Betonschwelle K1. Deshalb werden diese hier nicht nochmals beschrieben und auf

die vorhergehenden Beschreibungen verwiesen. Es folgt aus diesem Grund nur eine Ergebnispräsentation in bildlicher Form bzw. mit Diagrammen.

Die Zahlenwerte der Ergebnisse unterscheiden sich von der zuvor betrachteten SchO-Konstruktion mit der Schwelle K1 nur durch die Volumina, Konstruktion und Zusammensetzungen der hier betrachteten Schwelle L2. Zudem ergeben sich bei der Schwelle L2 und später bei der Betonschwelle L17 andere Transportdistanzen etc., da diese an einem anderen Standort in Österreich gefertigt werden.

4.6.2.1 Betrachtungszeitraum 80 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

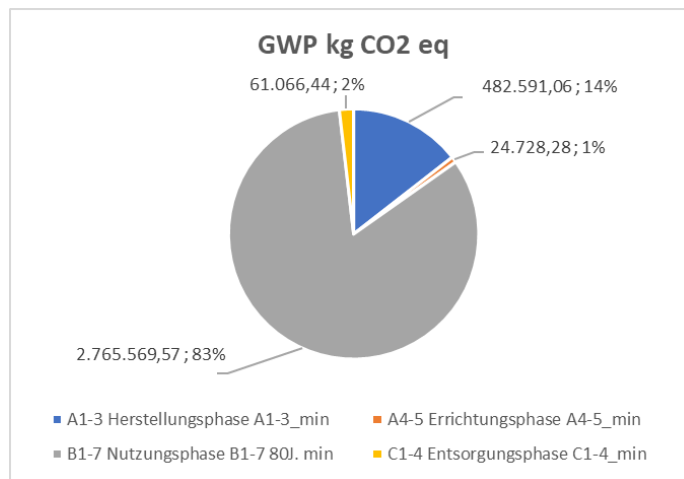


Abbildung 4-27: Analyse 2-GWP, 80 Jahre_min

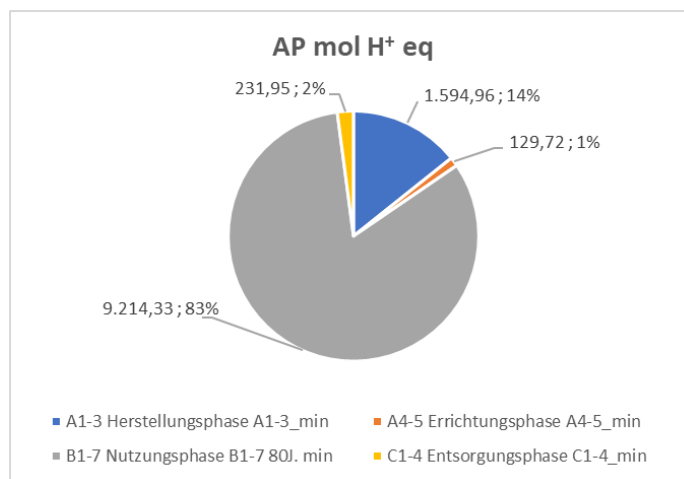


Abbildung 4-28: Analyse 2-AP, 80 Jahre_min

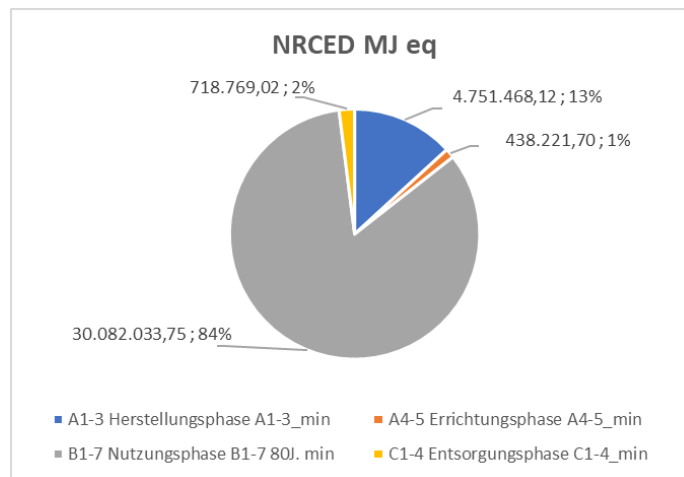


Abbildung 4-29: Analyse 2-NRCED, 80 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

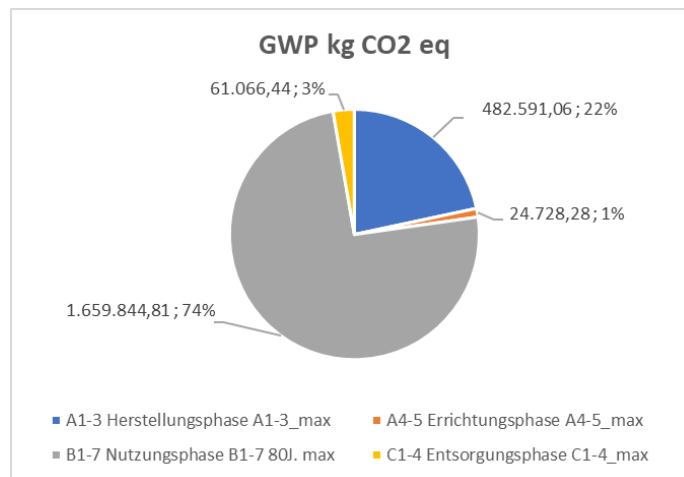


Abbildung 4-30: Analyse 2-GWP, 80 Jahre_max

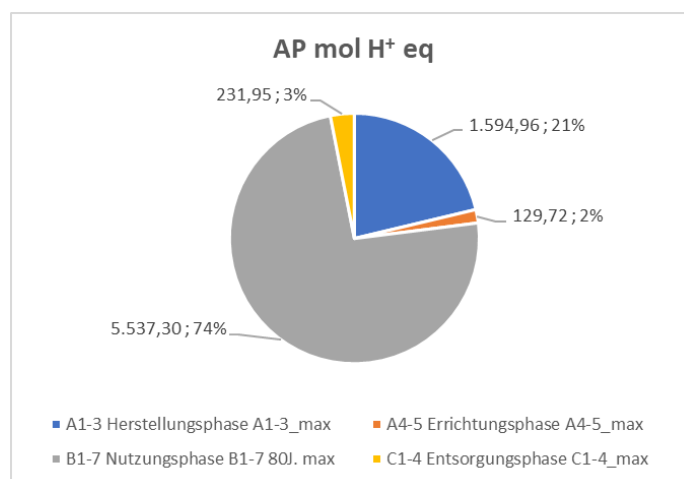


Abbildung 4-31: Analyse 2-AP, 80 Jahre_max

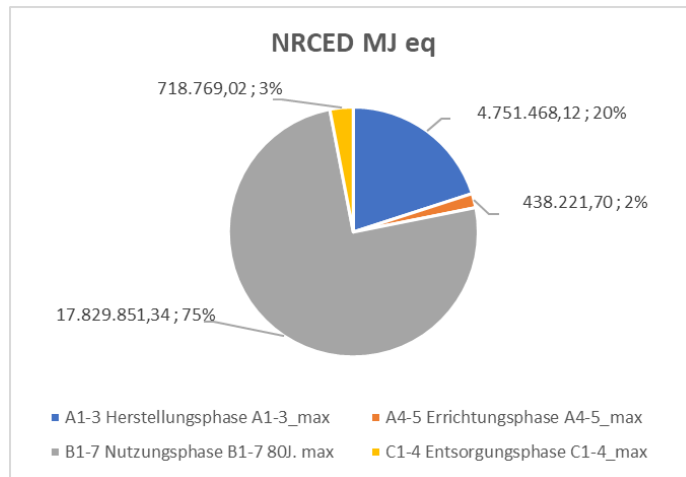


Abbildung 4-32: Analyse 2-NRCED, 80 Jahre_max

Herstellungsphase A1-A3

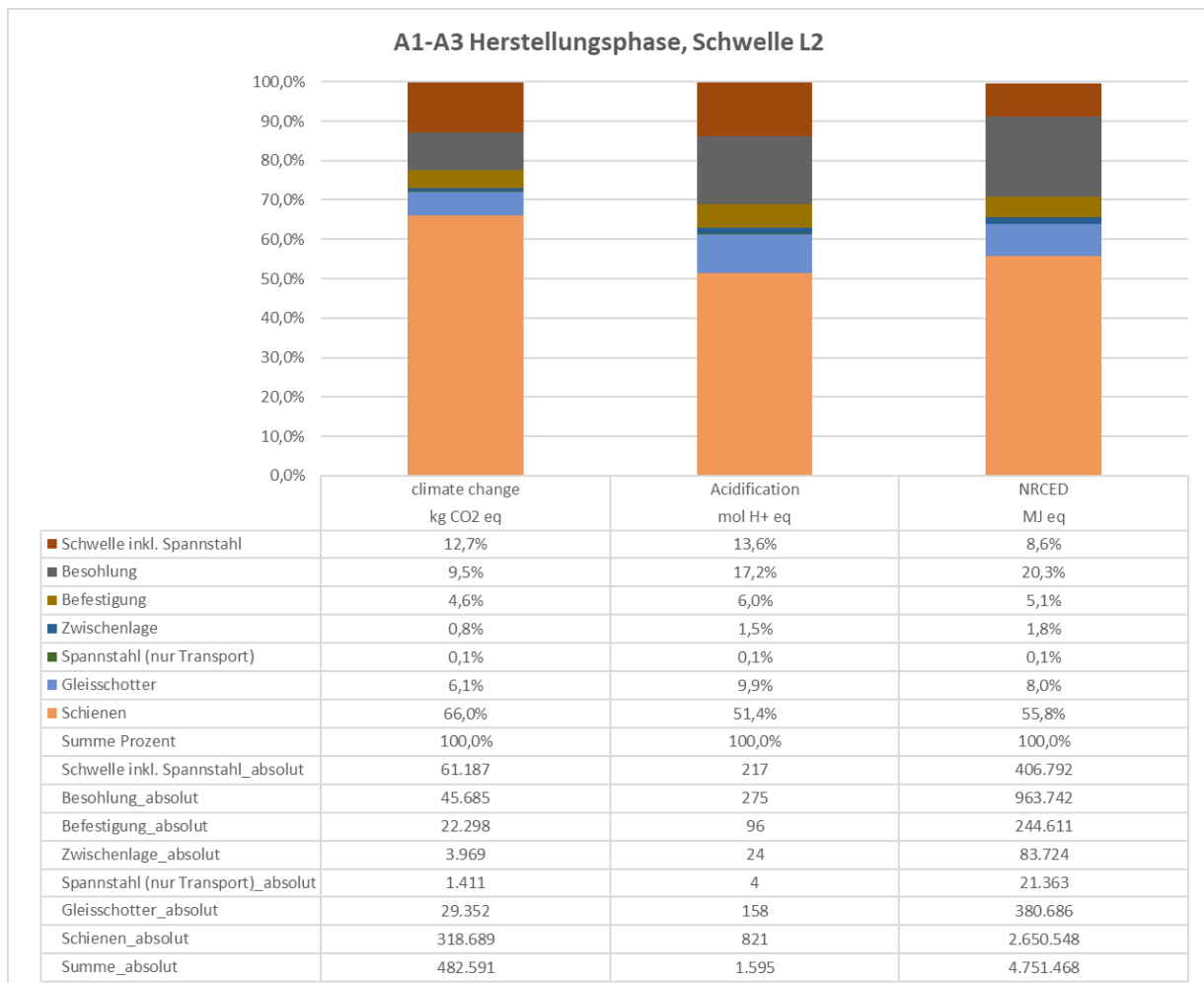


Abbildung 4-33: Analyse 2, Herstellungsphase A1-A3

Errichtungsphase A4-A5

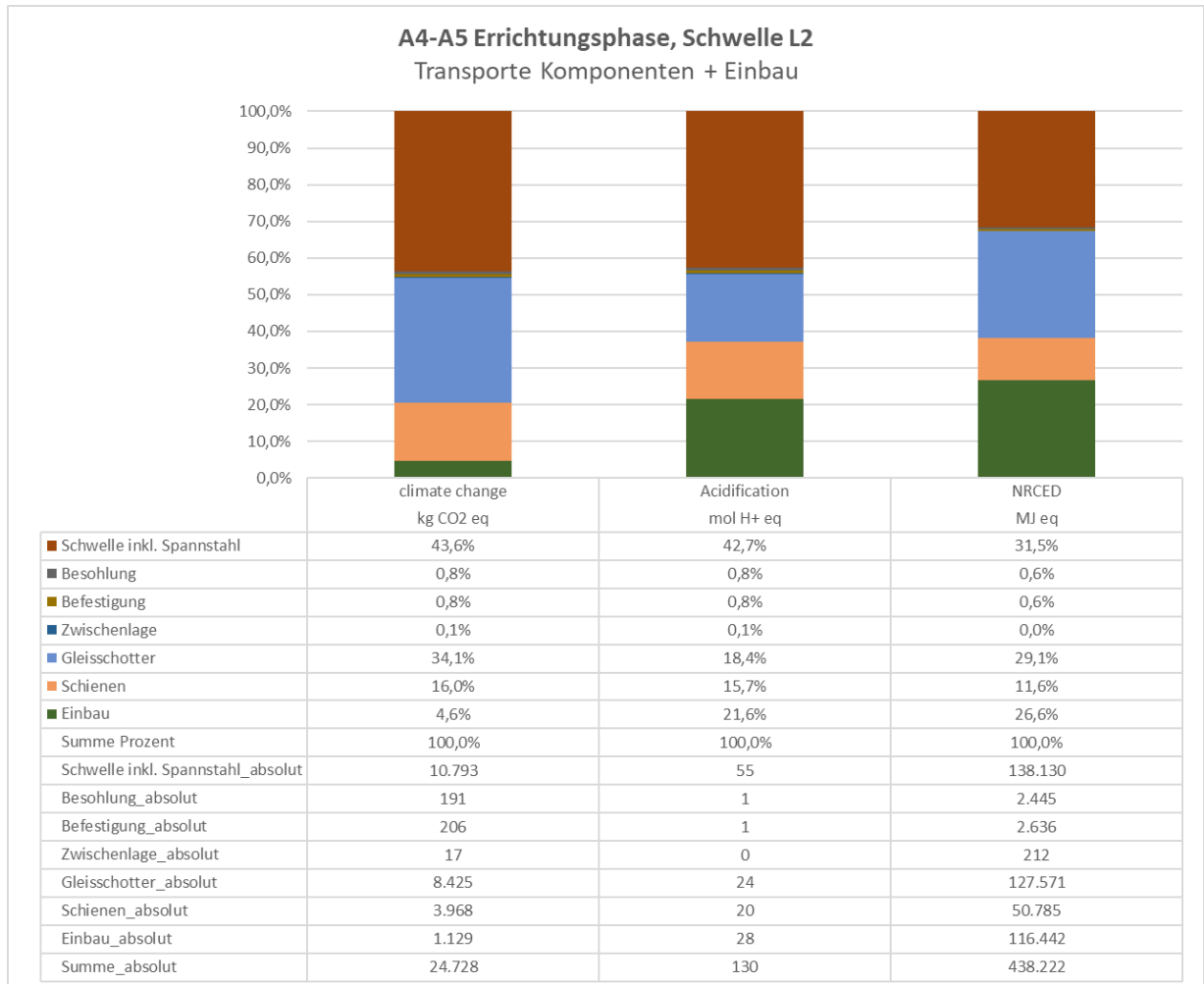


Abbildung 4-34: Analyse 2, Errichtungsphase A4-A5

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

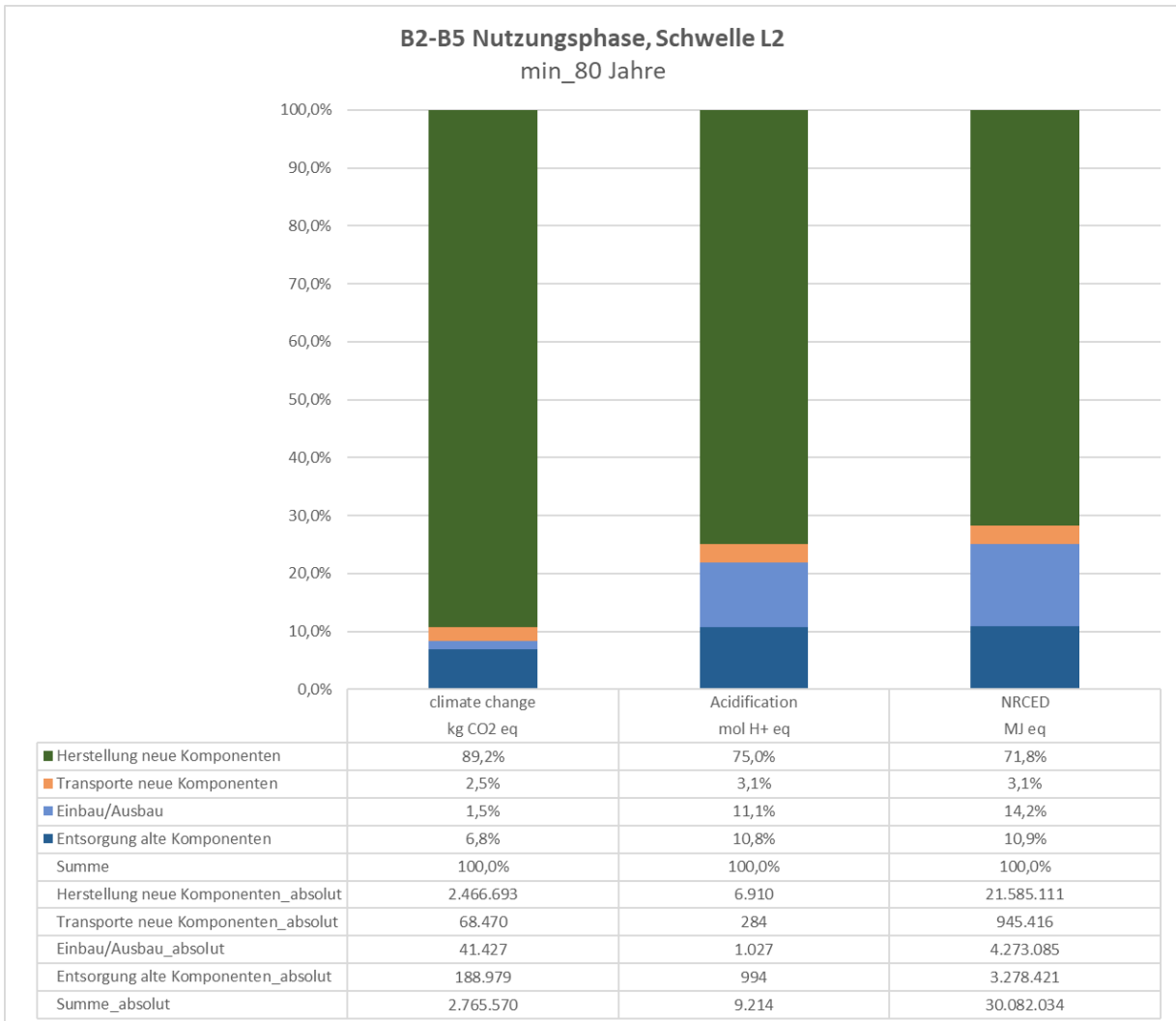


Abbildung 4-35: Analyse 2, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 80 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

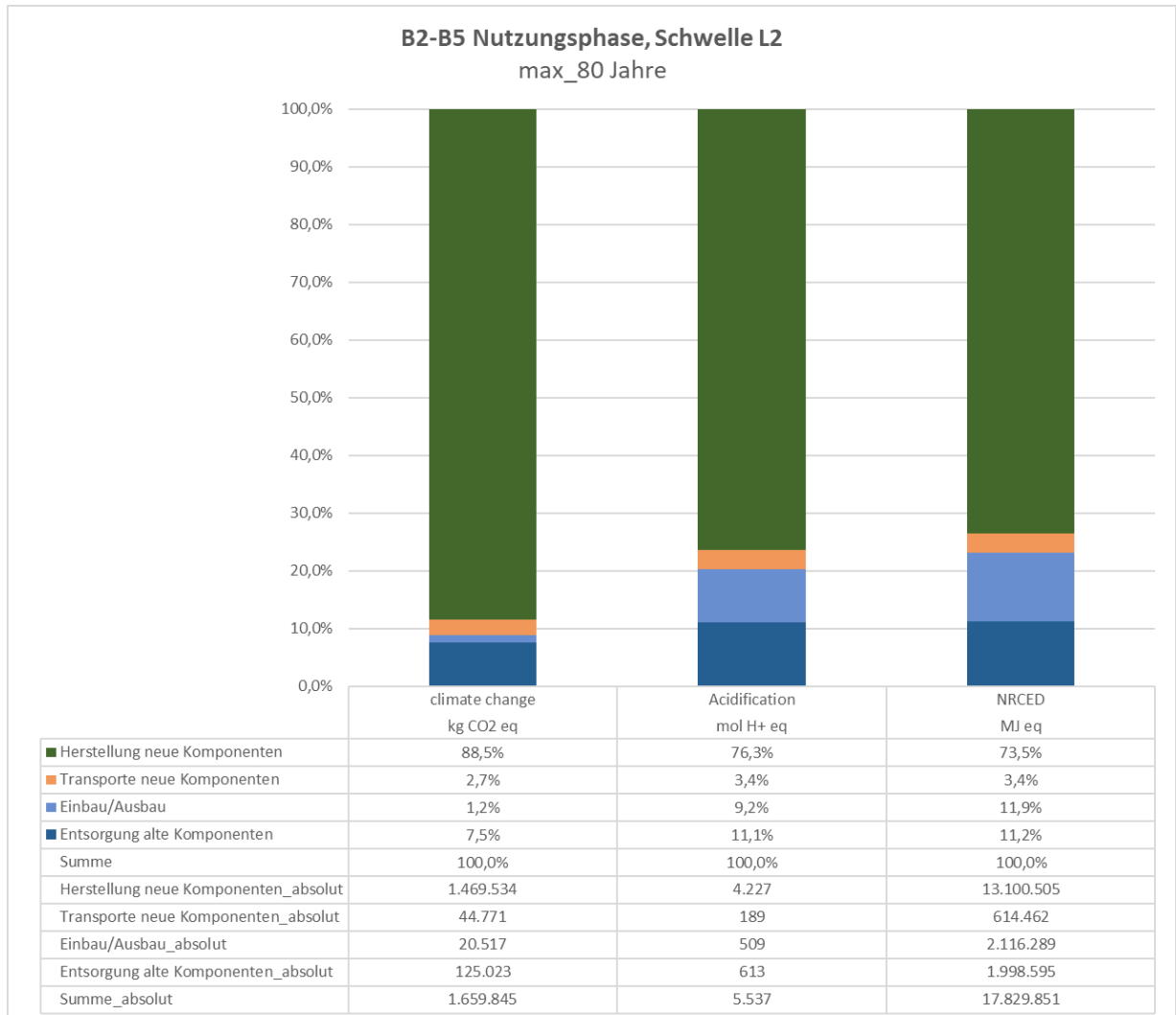


Abbildung 4-36: Analyse 2, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 80 Jahre

Entsorgungsphase C1-C4

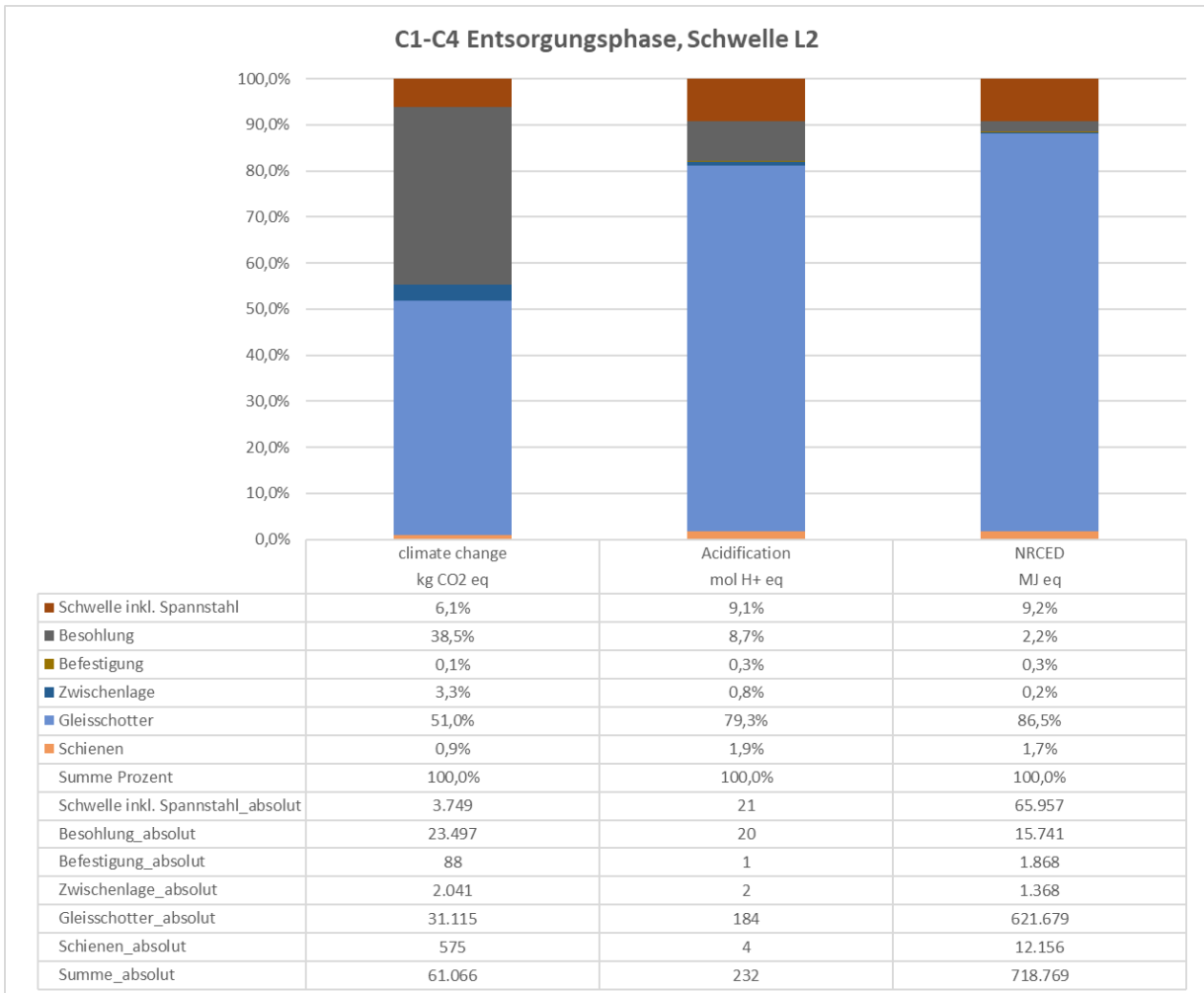


Abbildung 4-37: Analyse 2, Entsorgungsphase C1-C4

4.6.2.2 Betrachtungszeitraum 200 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

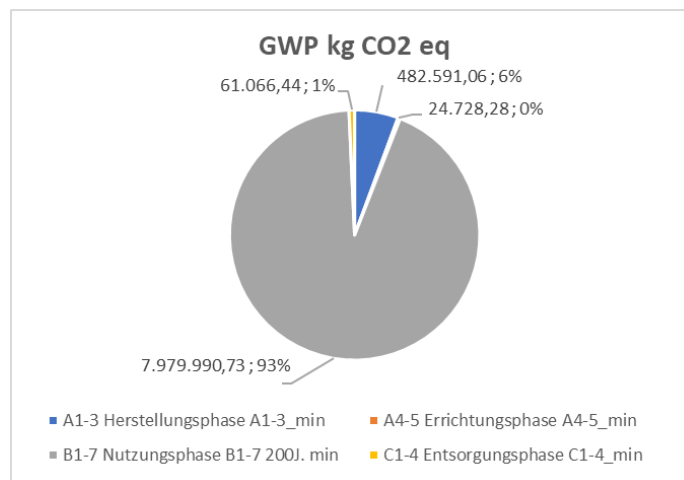


Abbildung 4-38: Analyse 2-GWP, 200 Jahre_min

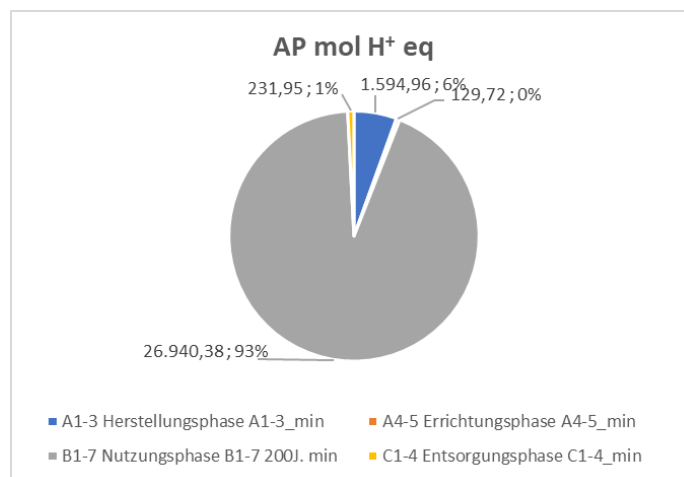


Abbildung 4-39: Analyse 2-AP, 200 Jahre_min

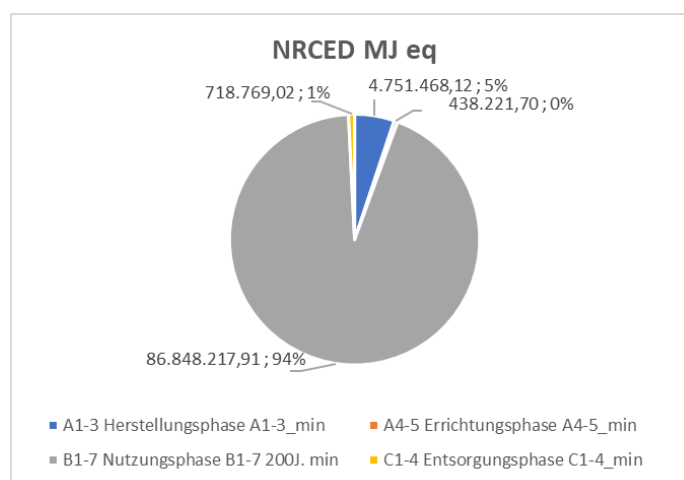


Abbildung 4-40: Analyse 2-NRCED, 200 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

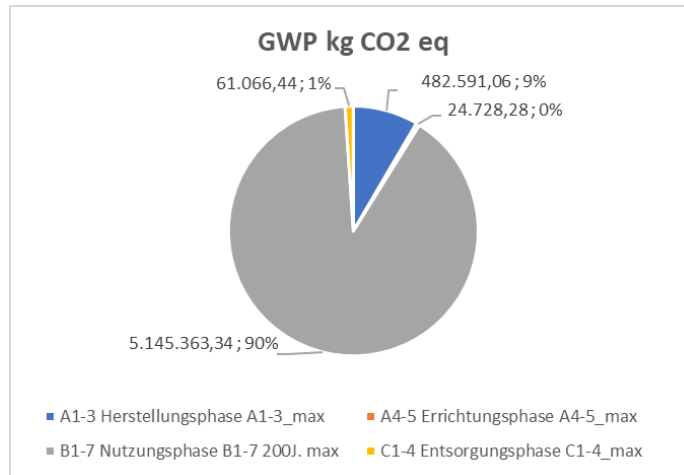


Abbildung 4-41: Analyse 2-GWP, 200 Jahre_max

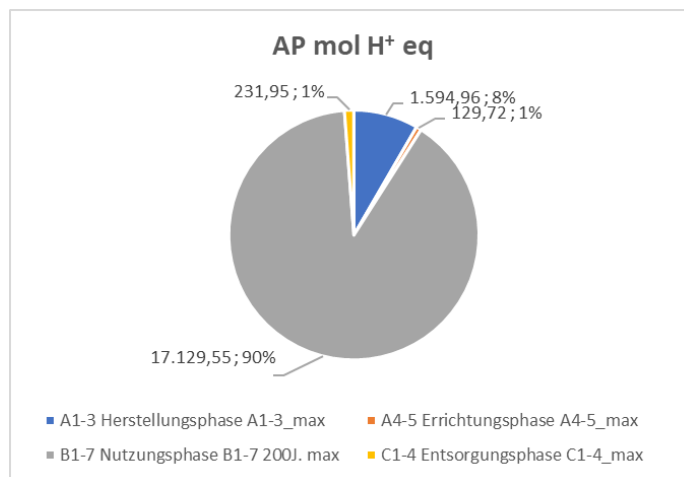


Abbildung 4-42: Analyse 2-AP, 200 Jahre_max

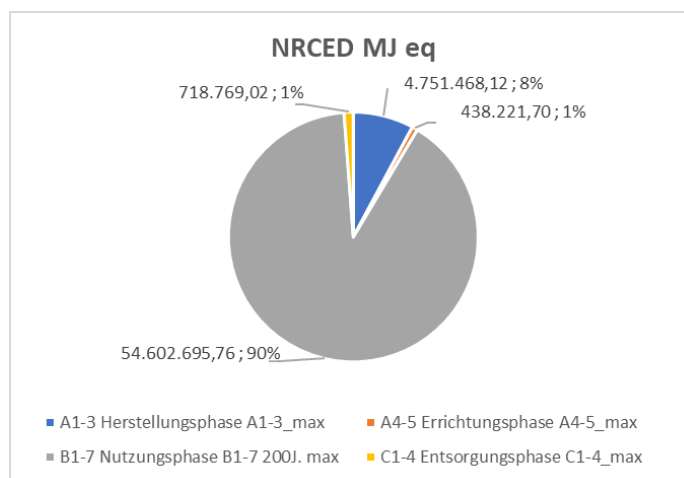


Abbildung 4-43: Analyse 2-NRCED, 200 Jahre_max

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

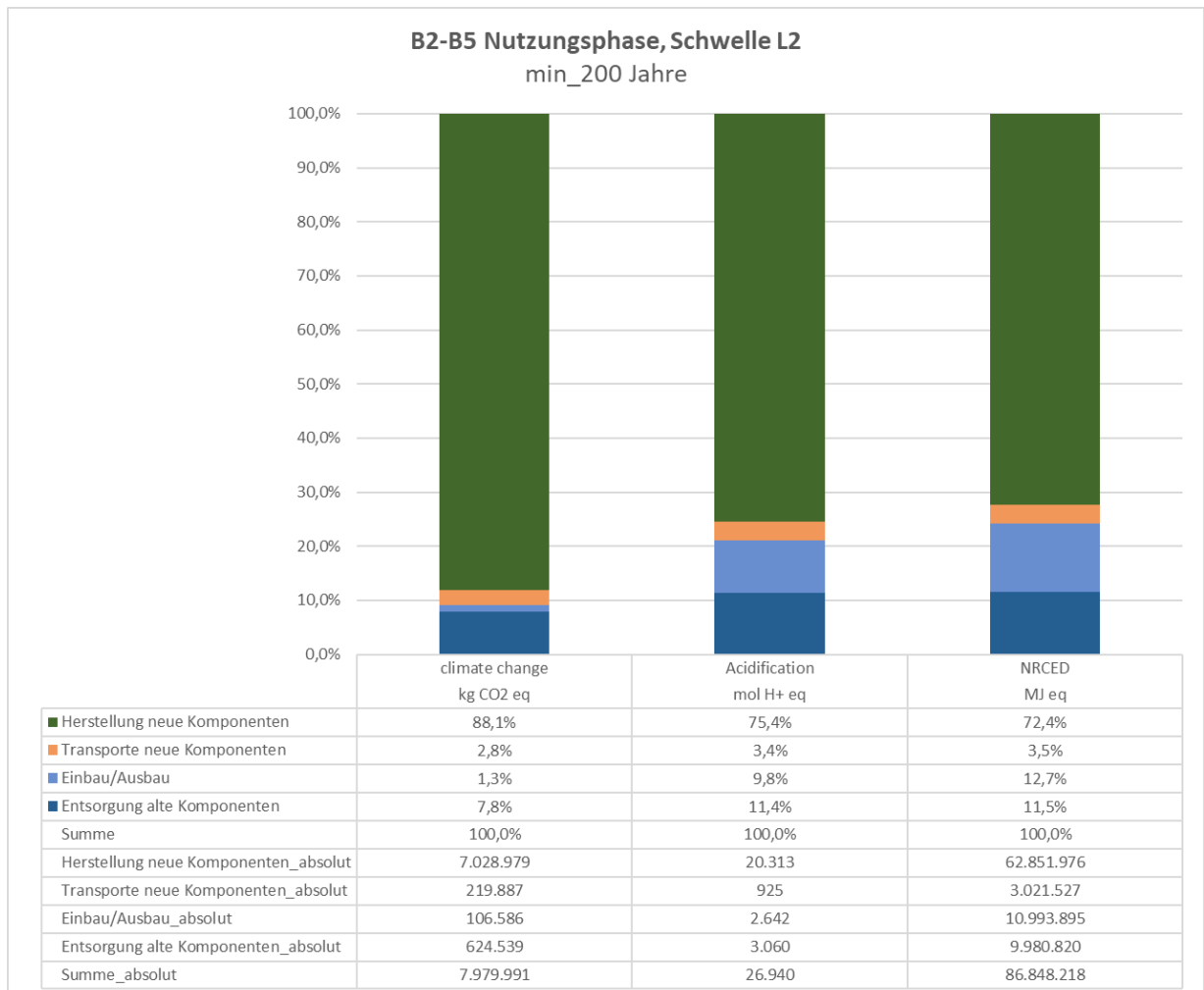


Abbildung 4-44: Analyse 2, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 200 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

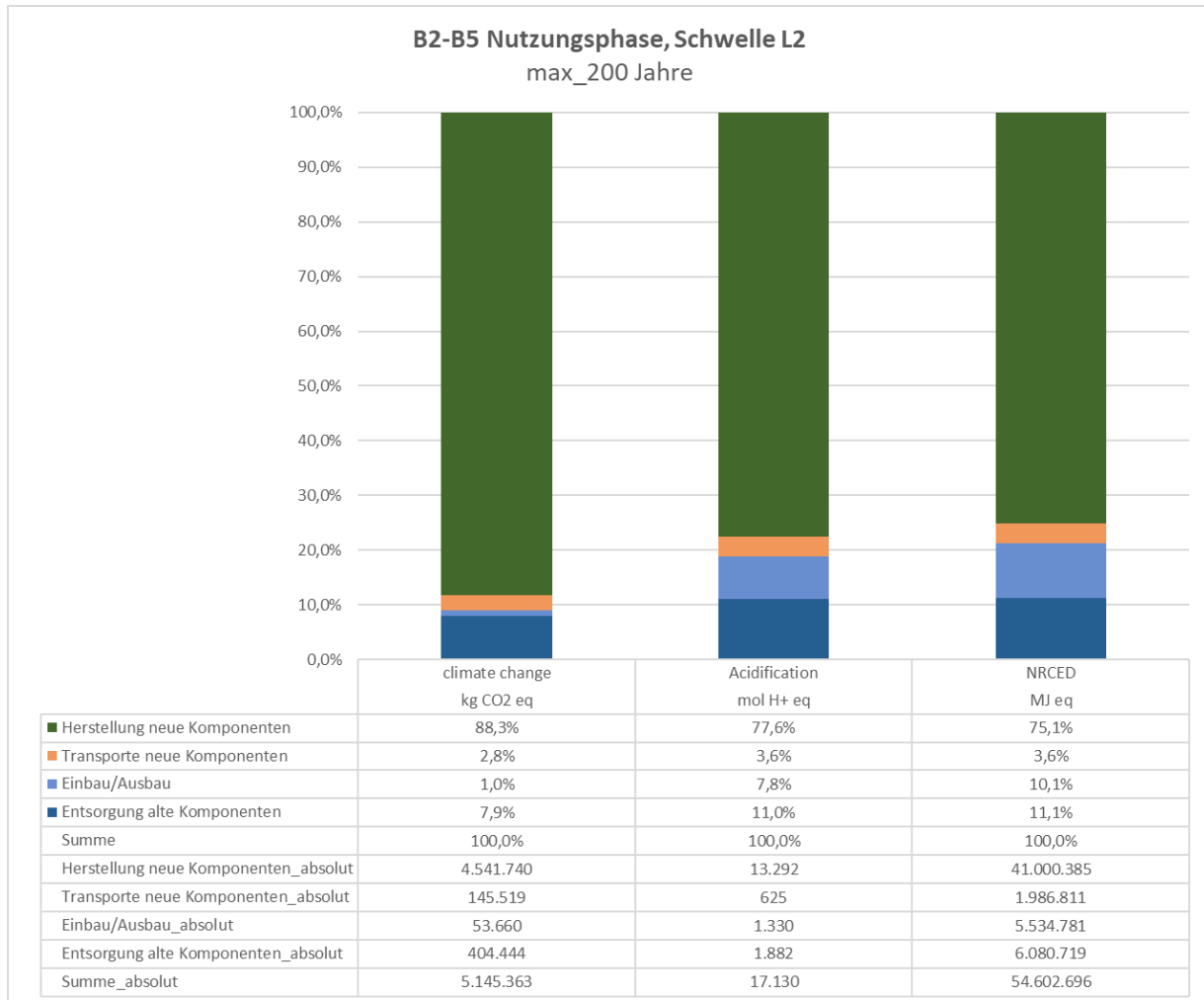


Abbildung 4-45: Analyse 2, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 200 Jahre

4.6.3 Analyse 3: Betonschwelle L17

Der SchO mit der Betonschwelle L17 unterscheidet sich von den zuvor beschriebenen Oberbaukonstruktionen doch etwas. Wie bereits in vorherigen Kapiteln ausgeführt, kommt die Betonschwelle L17 mit einem geringeren Schotterbettquerschnitt aus als die „Standard“-Schwellen zuvor. Im Zuge dieser Untersuchung wurde angenommen, dass die Monoblockschwelle L17 mit einer 30 cm geringeren Schotterbettbreite auskommt. Bei einer Strecke von einem Kilometer und einer Schotterbettstärke von 0,5 m kann daher eine Gleisschottereinsparung von ca. 8 % beziffert werden, was etwa 290 Tonnen weniger an Schotter bedeutet.

Daher kann die aufgetretene Erkenntnis aus der Auswertung der Schwelle K1, dass der Gleisschotter über den gesamten Lebenszyklus einen bedeutenden Anteil der Umweltwirkungen einnimmt, gleich an der hier vorliegenden Schwelle näher betrachtet werden.

Ansonsten ergeben sich für die Schwelle L17 keine neuen Einsparungspotentiale, welche sich von den zuvor beschriebenen und analysierten Betonschwellen unterscheiden würden. Aus diesem Grund wird hierbei nur auf die Gleisschotterthematik eingegangen und die anderen Ergebnisse außen vorgelassen und auf die Beschreibung des SchO mit der Schwelle K1 verwiesen. Die Unterschiede in den Zahlenwerten im Vergleich zu obigen Schwellen ergeben sich wiederum durch die unterschiedliche Konstruktion der Schwelle und der reduzierten Gleisschottermenge. Herstellungsort der Betonschwellen L17 und L2 sind hierbei ident.

4.6.3.1 Betrachtungszeitraum 80 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

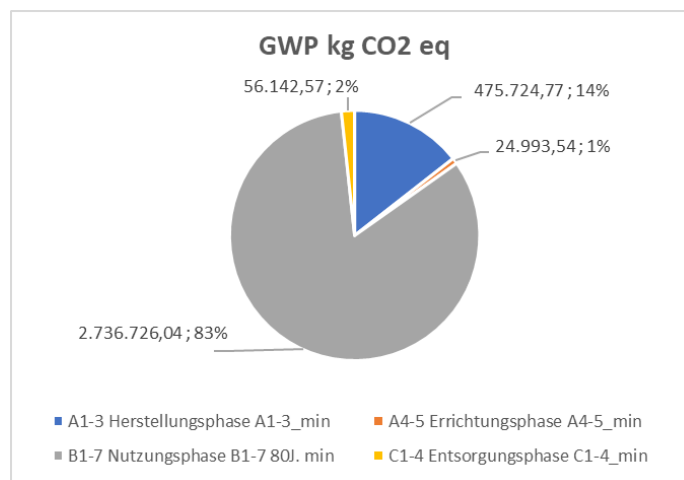


Abbildung 4-46: Analyse 3-GWP, 80 Jahre_min

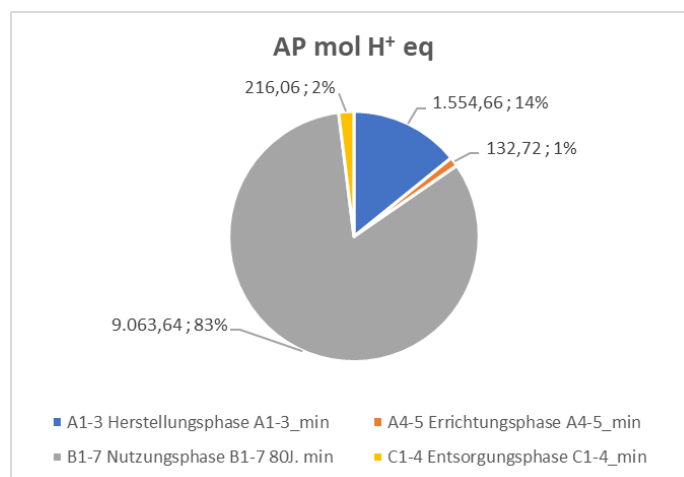


Abbildung 4-47: Analyse 3-AP, 80 Jahre_min

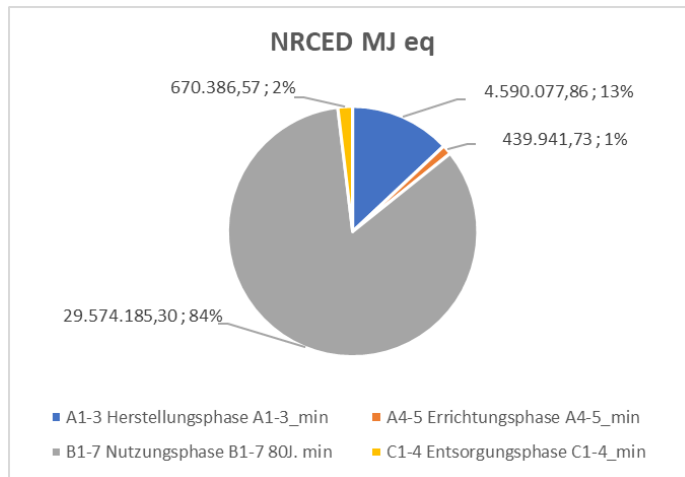


Abbildung 4-48: Analyse 3-NRCEP, 80 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

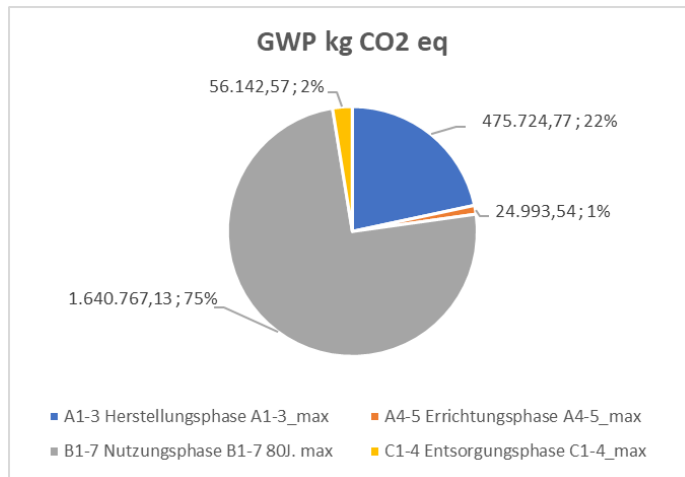


Abbildung 4-49: Analyse 3-GWP, 80 Jahre_max

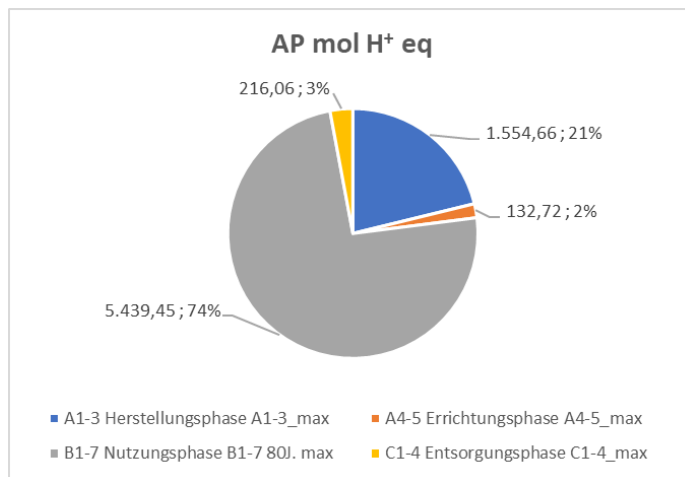


Abbildung 4-50: Analyse 3-AP, 80 Jahre_max

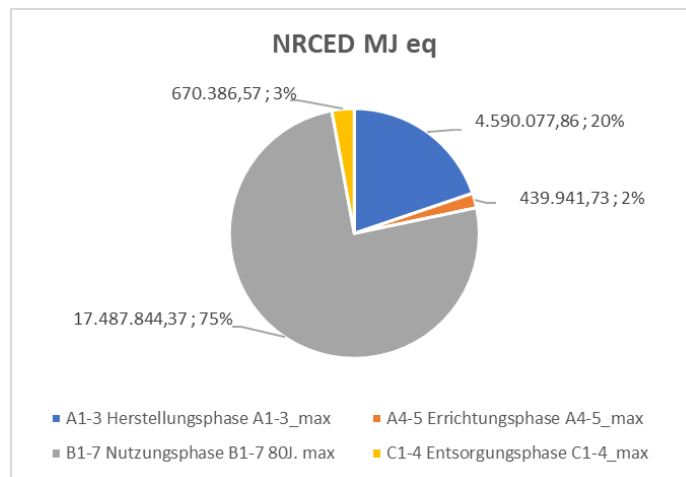


Abbildung 4-51: Analyse 3-NRCEP, 80 Jahre_max

Herstellungsphase A1-A3

Aus der geringeren Gleisschottermenge ergibt sich in der Herstellungsphase bei Betrachtung des GWPs eine Einsparung von etwa 9 %, bezogen auf die Umwelteffekte des größeren Gleisschotterquerschnitts. In absoluten Zahlen beläuft sich die Reduktion auf etwa 2.500 kg CO₂ eq. Das AP und der NRCED nehmen entsprechend adäquat ab.

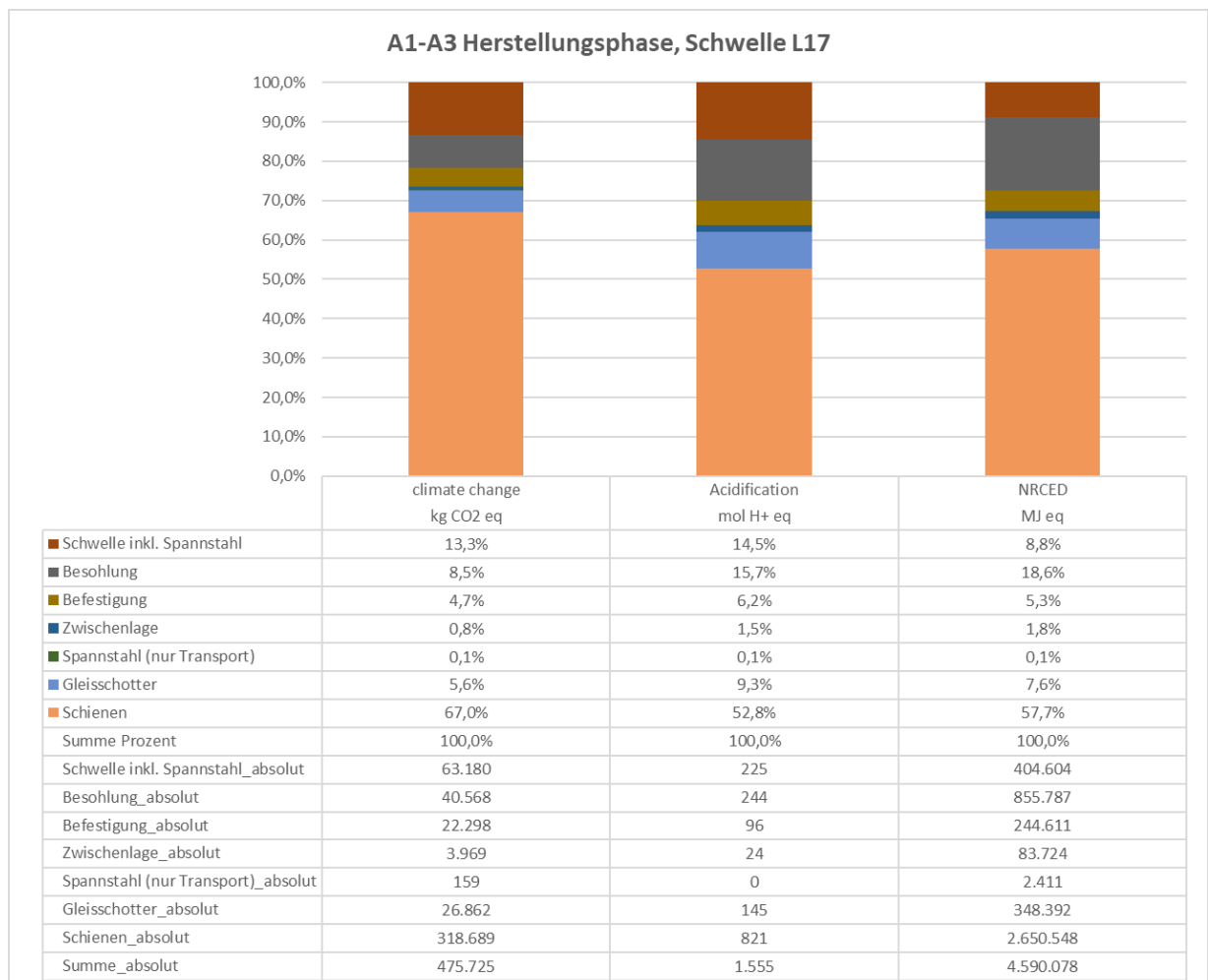


Abbildung 4-52: Analyse 3, Herstellungsphase A1-A3

Errichtungsphase A4-A5

Bei der Errichtungsphase folgen die Umweltwirkungen für den Gleisschotter beinahe zur Gänze aus dem Transport vom Hersteller zum Einbauort. Deswegen stehen die Auswirkungen der Umwelt im Wesentlichen proportional mit der Förderleistung in tkm in Zusammenhang. Durch die reduzierte Tonnage ergibt sich eine Minderung des Klimawandelindikators (GWP) von ca. 8,5 %. Es können dadurch etwa 715 kg CO₂ eq. eingespart werden. Die Herabsetzung des AP und dem NRCED bewegt sich auch im Bereich von 8 %.

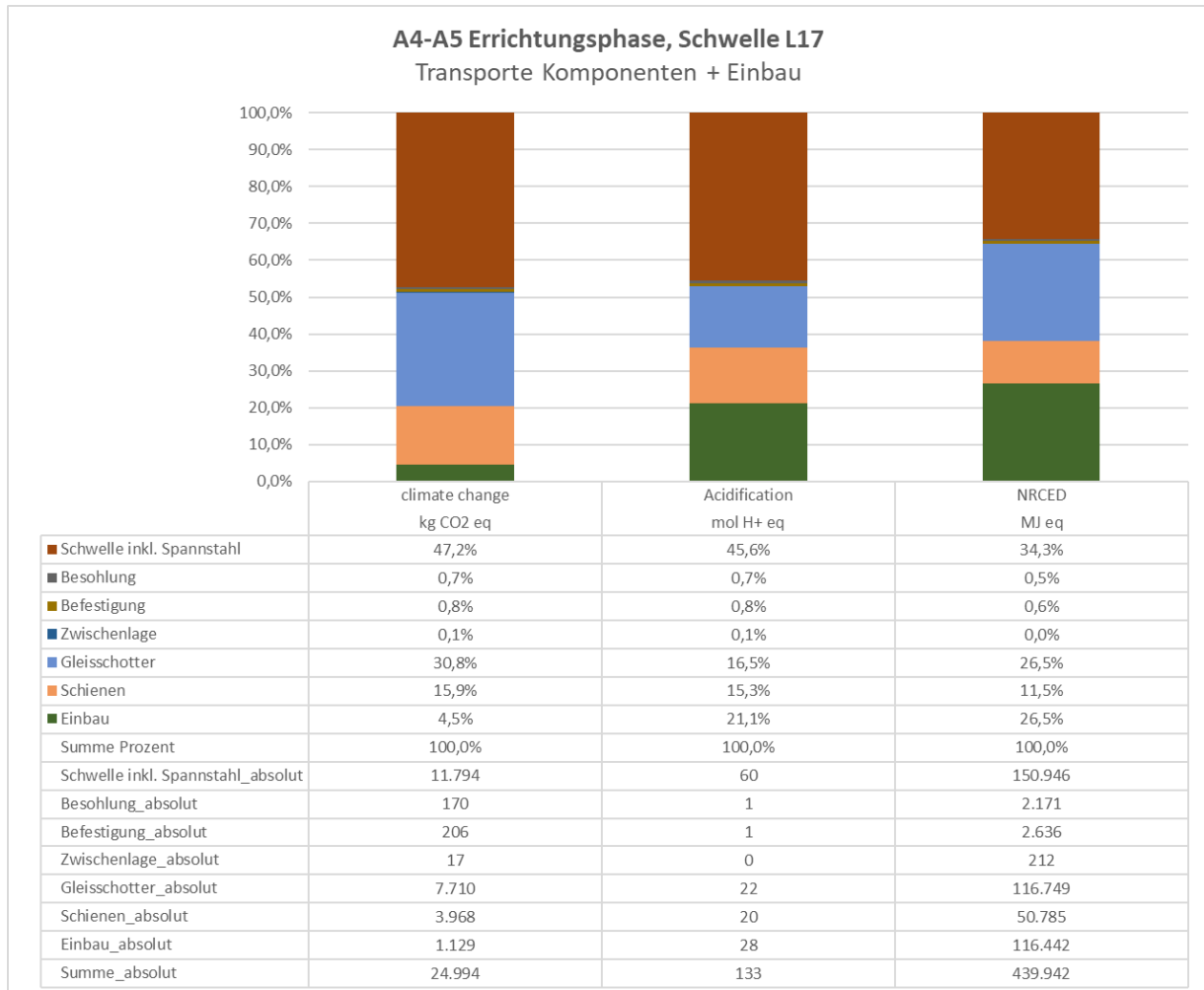


Abbildung 4-53: Analyse 3, Errichtungsphase A4-A5

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

Auch in der Nutzungsphase ergibt sich durch die reduzierte Menge eine prozentuelle Verminderung der betrachteten Wirkungsindikatoren von 8 %.

Für das GWP heißt das in absoluten Zahlen, dass etwa 24.500 kg CO₂ eq. eingespart werden konnten.

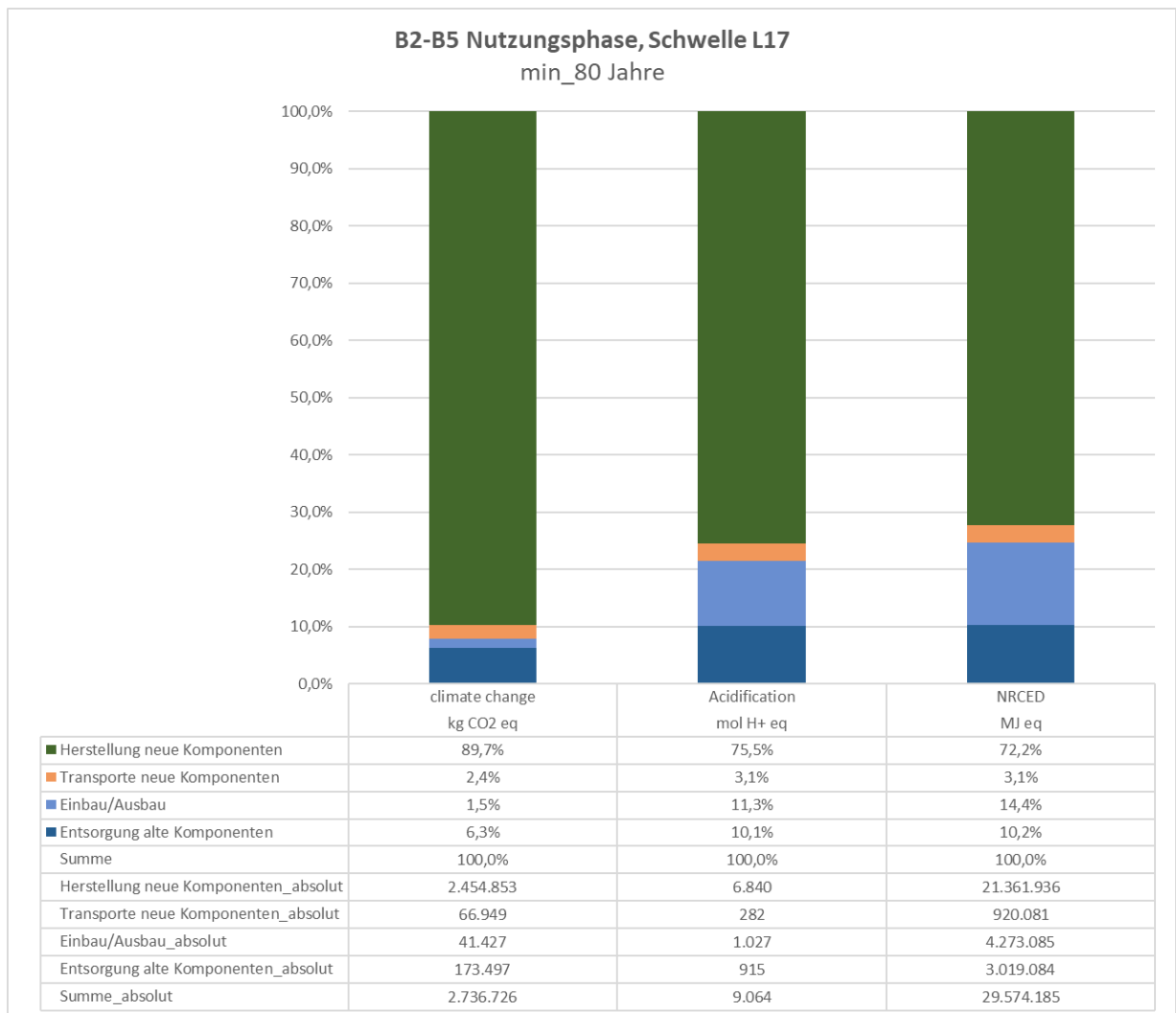


Abbildung 4-54: Analyse 3, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 80 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

Bei der maximalen Liegedauer fällt die absolute Herabsetzung des GWPs etwas geringer aus, jedoch können trotzdem ca. 14.500 kg CO2 eq. reduziert werden. Die prozentuelle Änderung beläuft sich wiederum auf eine Größenordnung von -8 %.

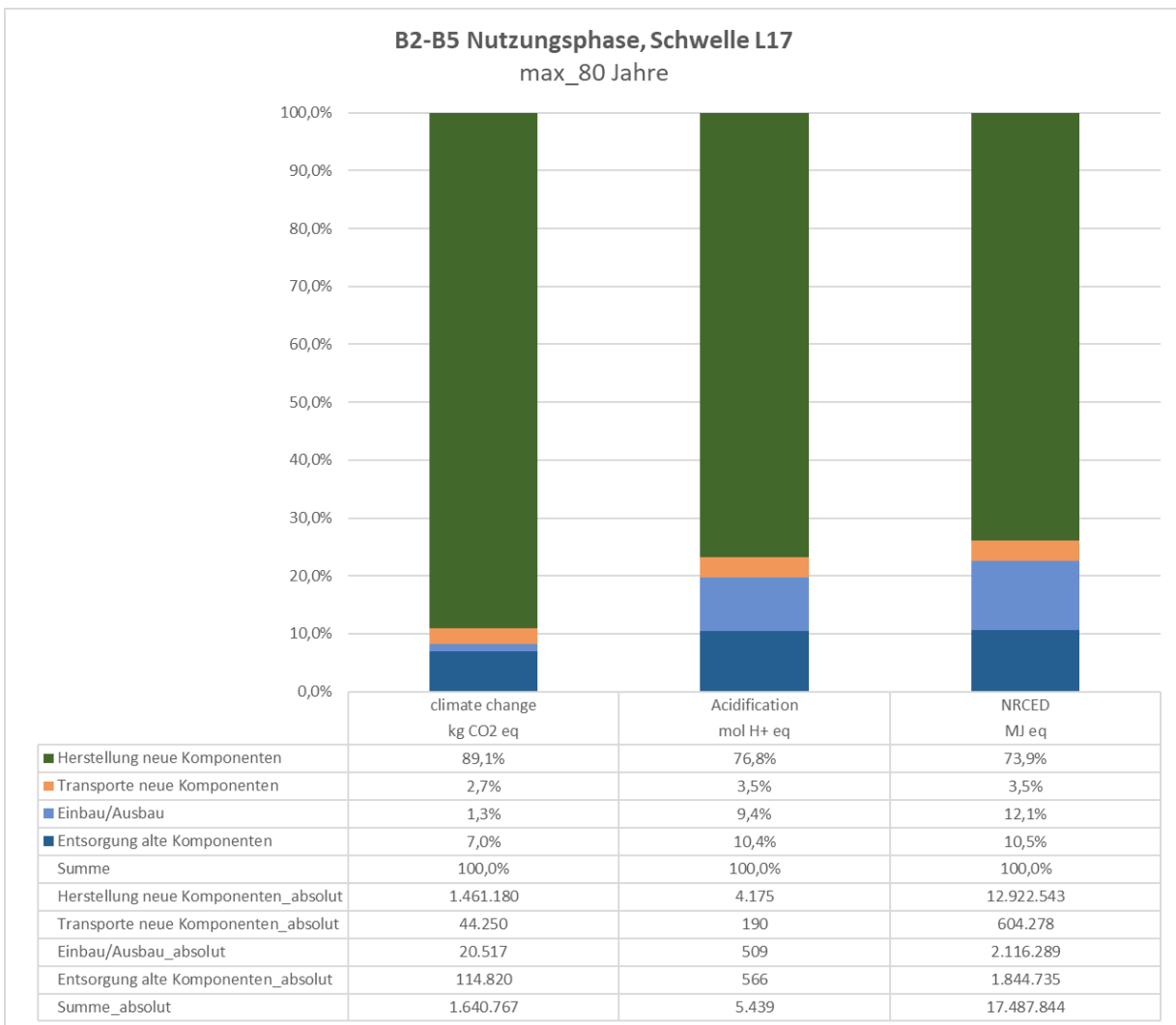


Abbildung 4-55: Analyse 3, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 80 Jahre

Entsorgungsphase C1-C4

Selbiges Bild zeigt sich in der Phase der Entsorgung. Die Auswirkungen auf die Umwelt konnten folglich in jeder Kategorie um ca. 8 % geschmälert werden. Nachstehend ist die Entsorgungsphase abermals in bildlicher Form dargestellt.

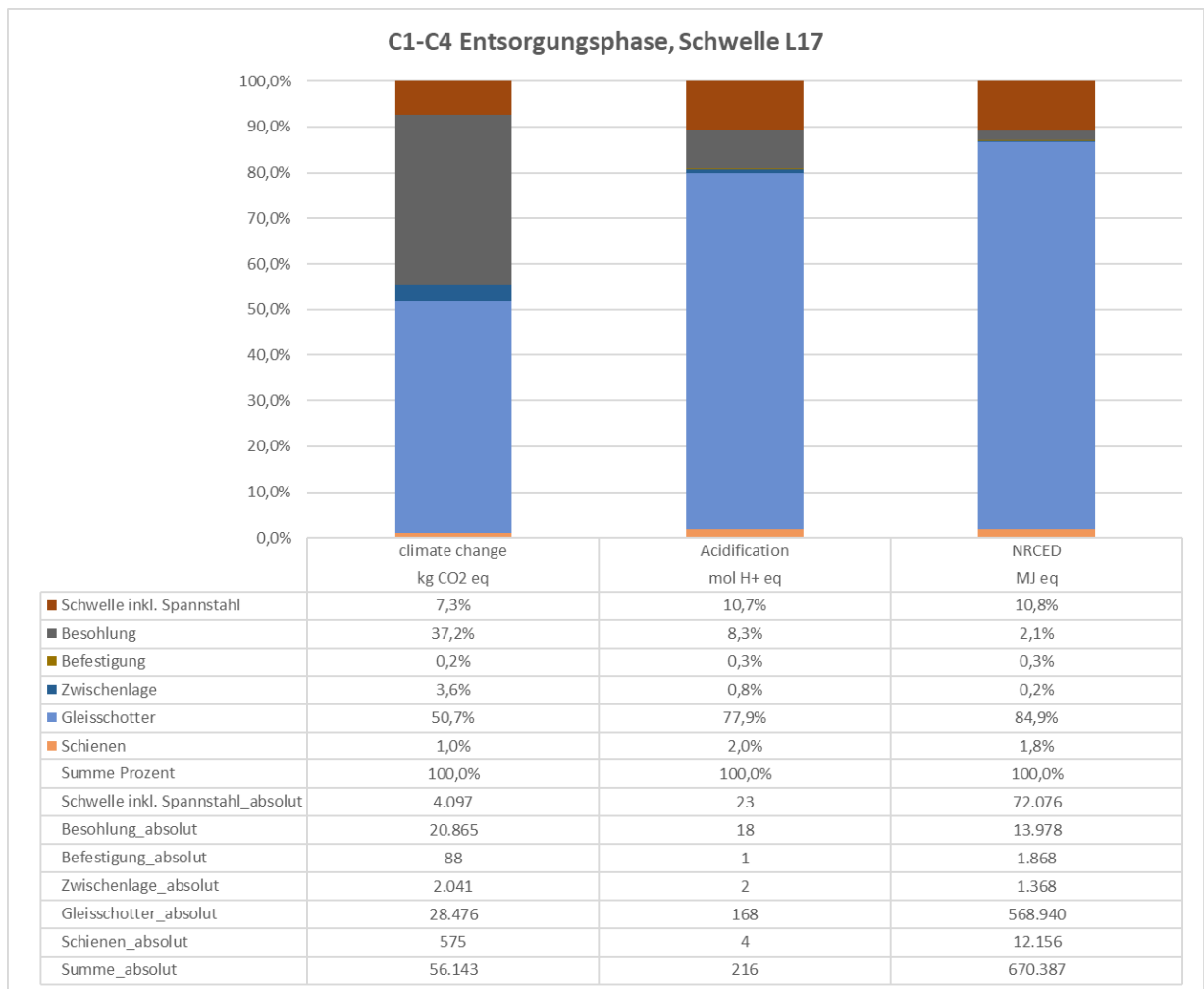


Abbildung 4-56: Analyse 3, Entsorgungsphase C1-C4

Zusammenfassung Reduktion Gleisschotter

In Summe bedeutet dies, dass durch das 30 cm schmalere Schotterbett Einsparungen zwischen 8-9 % in jeder Lebenszyklusphase erreicht werden können. Das machen bei minimaler Liegedauer etwa 30.400 kg CO₂ eq. und bei maximaler ca. 20.600 kg CO₂ eq. für das GWP aus. Bei Betrachtung des gesamten GWPs scheinen die Einsparungen zwar marginal zu sein, dennoch stellt die Reduktion des Gleisschotter eine Möglichkeit dar, um die Wirkungen auf die Umwelt einzudämmen. Zudem ist zu erwähnen, dass diese Reduktion nur aus der Schmälerung der Breite hervorgeht. Aus einer Dezimierung der Bettungsstärke würden ähnliche Ergebnisse resultieren, sofern dies aus betrieblicher Sicht möglich ist.

4.6.3.2 Betrachtungszeitraum 200 Jahre

Da sich das Einsparungspotential in Hinblick auf den Gleisschotter durch den Wandel des Betrachtungszeitraum auf 200 Jahre aus prozentueller Sicht im Allgemeinen nicht wegweisend ändern wird, erfolgt keine Beschreibung dieses Analysezeitraums. Es werden lediglich die allgemeinen Ergebnisse der SchO-Konstruktion mit Schwelle L17 für den Zeitraum 200 Jahre präsentiert.

Minimale Liegedauer (A1-C4)

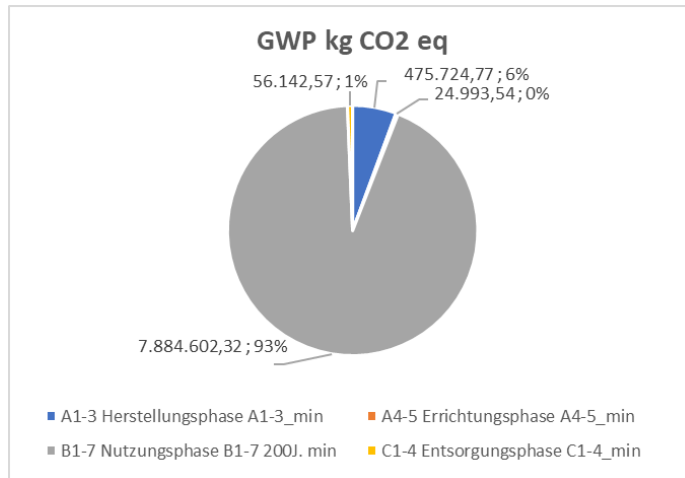


Abbildung 4-57: Analyse 3-GWP, 200 Jahre_min

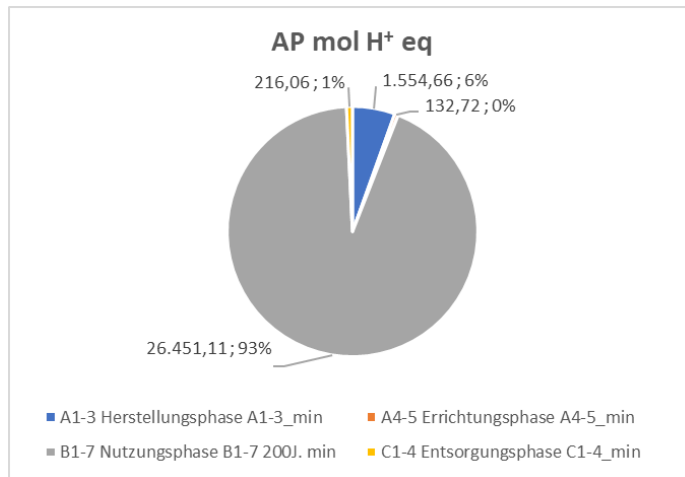


Abbildung 4-58: Analyse 3-AP, 200 Jahre_min

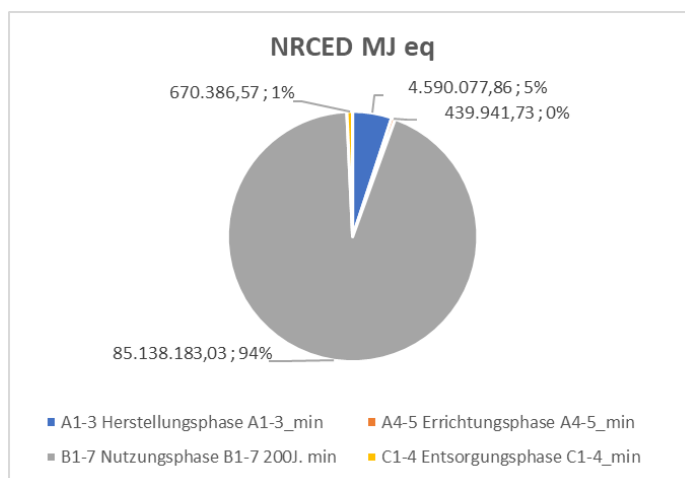


Abbildung 4-59: Analyse 3-NRCED, 200 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

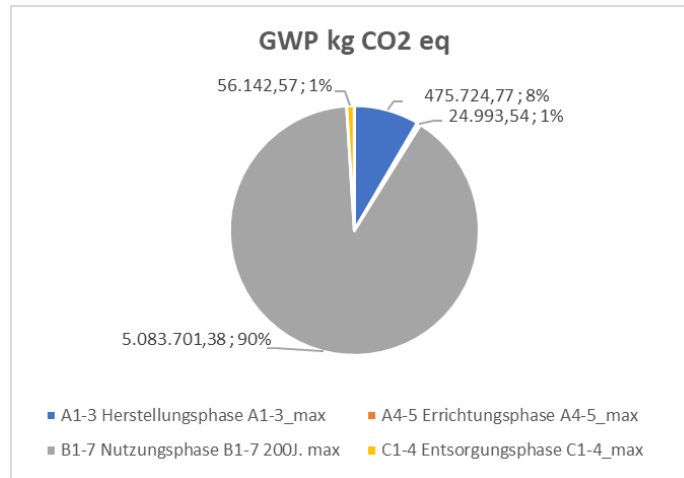


Abbildung 4-60: Analyse 3-GWP, 200 Jahre_max

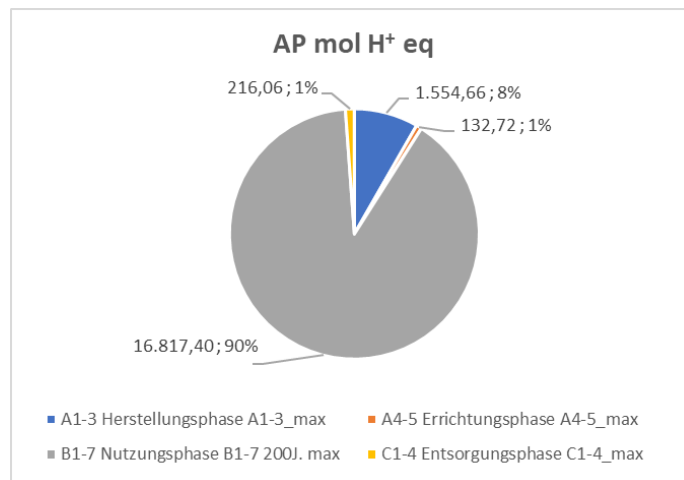


Abbildung 4-61: Analyse 3-AP, 200 Jahre_max

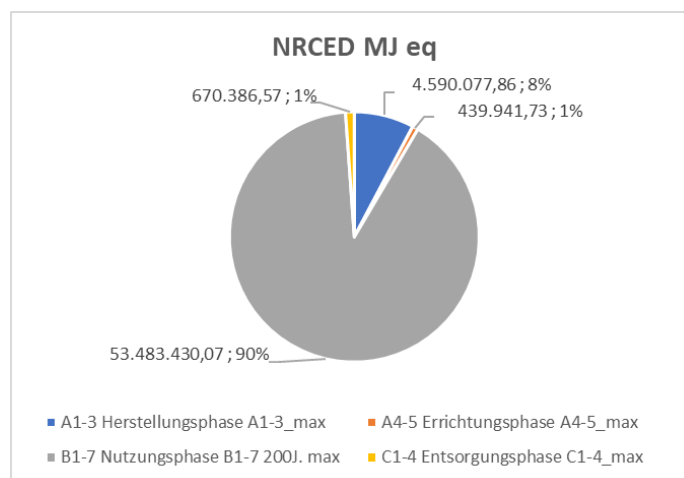


Abbildung 4-62: Analyse 3-NRCED, 200 Jahre_max

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

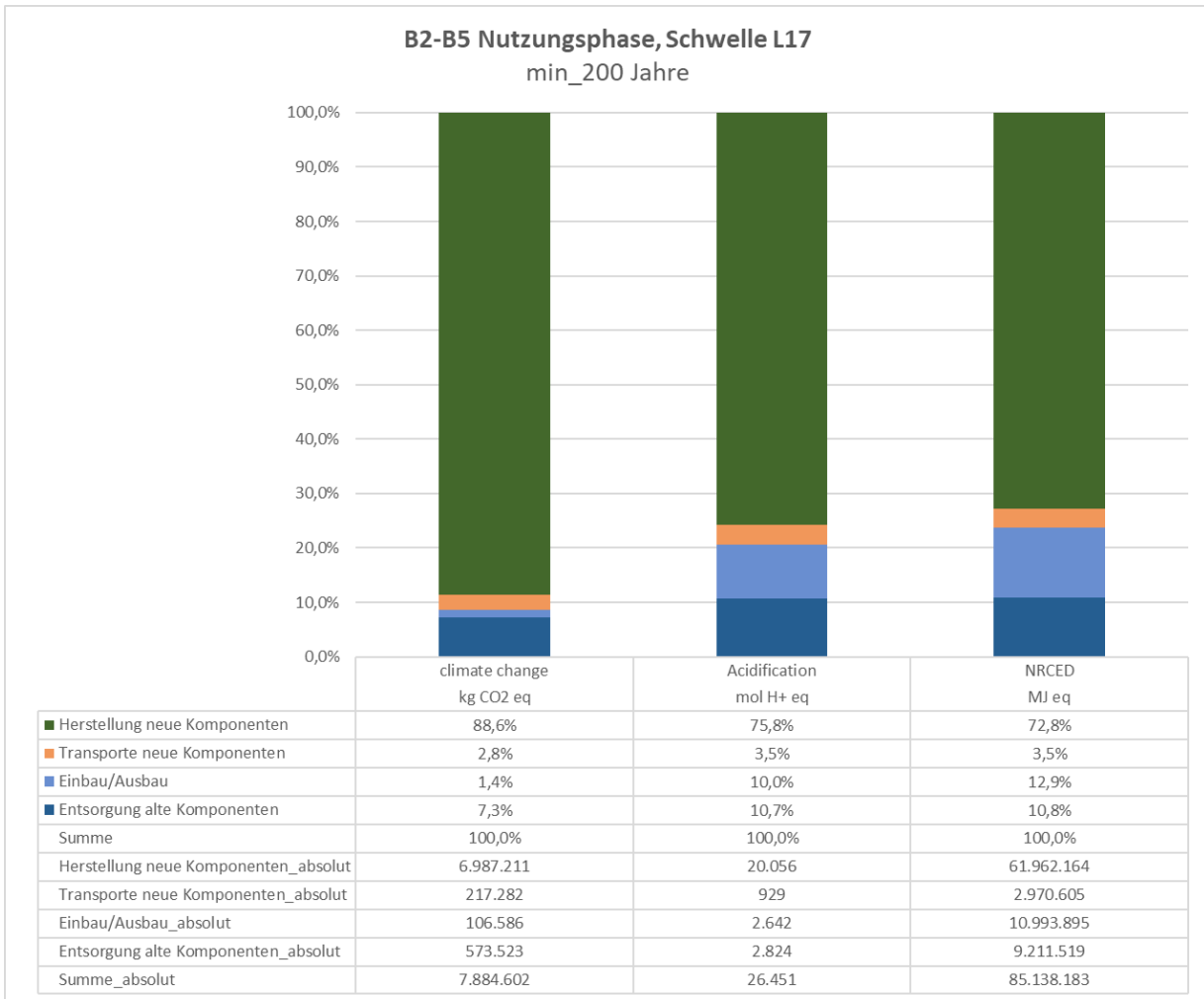


Abbildung 4-63: Analyse 3, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 200 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

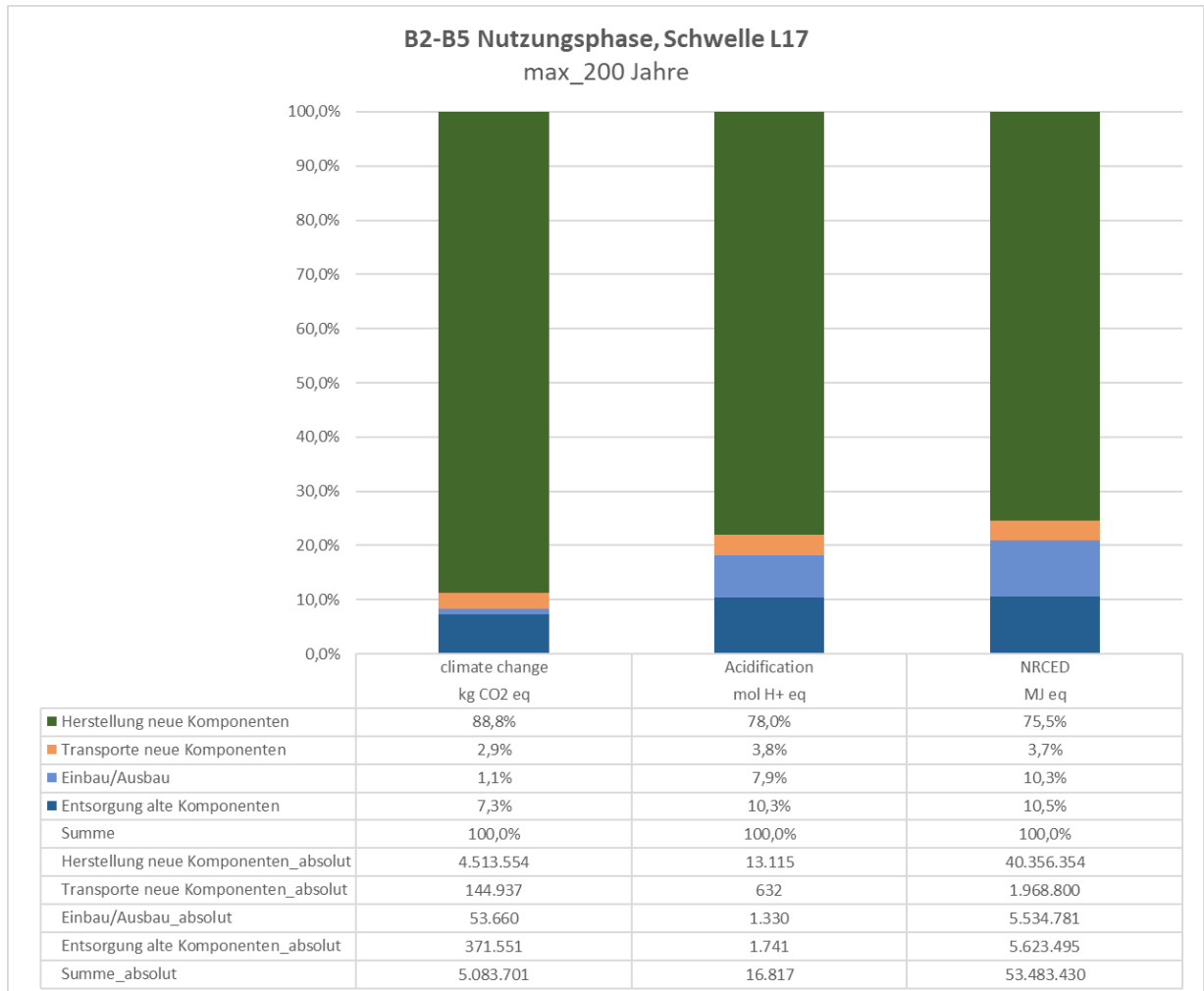


Abbildung 4-64: Analyse 3, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 200 Jahre

4.6.4 Analyse 4a: Feste Fahrbahn – Slab Track Austria ÖBB-Porr

Bei der Analyse 4a wird die betrachtete Feste Fahrbahn auf der freien Strecke aus ökologischer Sicht begutachtet.

4.6.4.1 Betrachtungszeitraum 80 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

Es ist auf den ersten Blick zu erkennen (vgl. nachfolgende Diagramme), dass sich die Anteile der Umweltwirkungen je Lebenszyklusphase im Vergleich zu den zuvor begutachteten SchO-Konstruktionen deutlich verschoben haben. So nimmt die Herstellungsphase anteilig mit etwa einem Viertel der gesamten Wirkungen auf die Umwelt ein. Im Vergleich waren dies bei den Schotteroberbauten ca. 14 %. Das resultiert daraus, dass durch die flächige Betonkonstruktion (Gleistragplatten und Unterkonstruktionen) deutlich mehr Klinker und Zement verbraucht wird.

Jedoch wird dies durch die geringeren Auswirkungen in der Nutzungsphase kompensiert, da durch die langlebige Konstruktion kaum bis keine Instandhaltungsarbeiten zu tätigen sind. Zu erwähnen ist, dass bei der Festen Fahrbahn-Konstruktion bei einer Betrachtung von 80 Jahren lediglich Erneuerungen der Schienen und deren Befestigungen erforderlich sind. Die Fahrbahnplatte und die Unterkonstruktion bedarf in diesem Zeitraum keiner Instandhaltung. D.h., gänzliche Umweltwirkungen, welche in der Phase B1-B7 im Zeitraum anfallen, sind diesen beiden Oberbauelementen bzw. den damit verbundenen Prozessen zuzuschreiben.

Die Entsorgungsphase nimmt bei der Festen Fahrbahn prozentuell gesehen ebenfalls zu. Absolut gesehen beläuft sich das GWP auf etwa 3.230 Tonnen CO₂ eq. Das Versauerungspotential (AP) kann mit ca. 9.820 mol H⁺ eq und der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand mit 31,0 Mio. MJ eq beziffert werden.

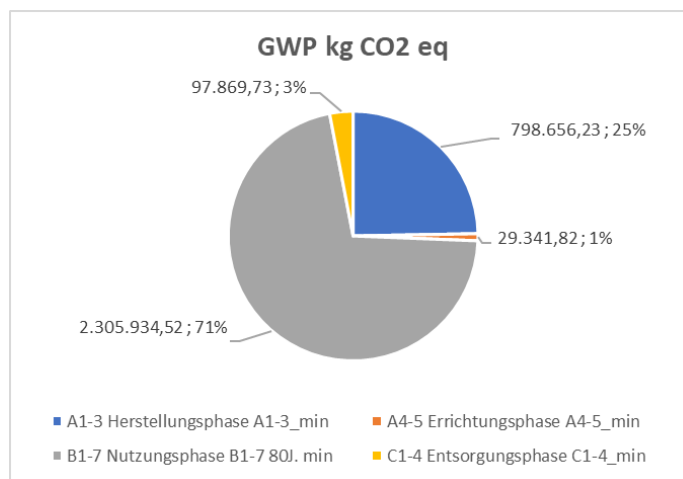


Abbildung 4-65: Analyse 4a-GWP, 80 Jahre_min

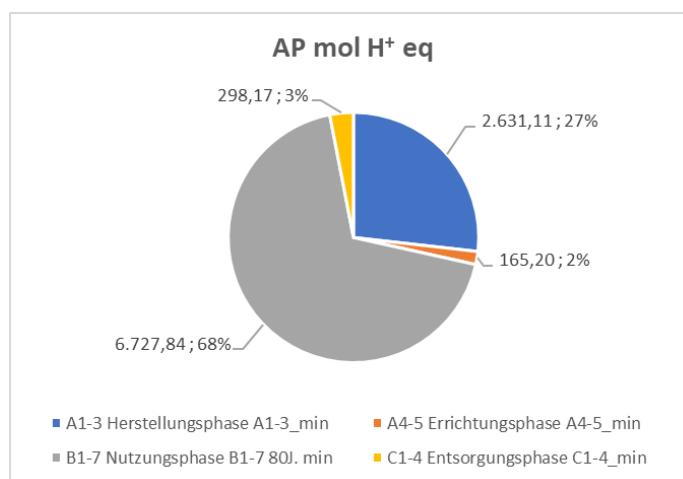


Abbildung 4-66: Analyse 4a-AP, 80 Jahre_min

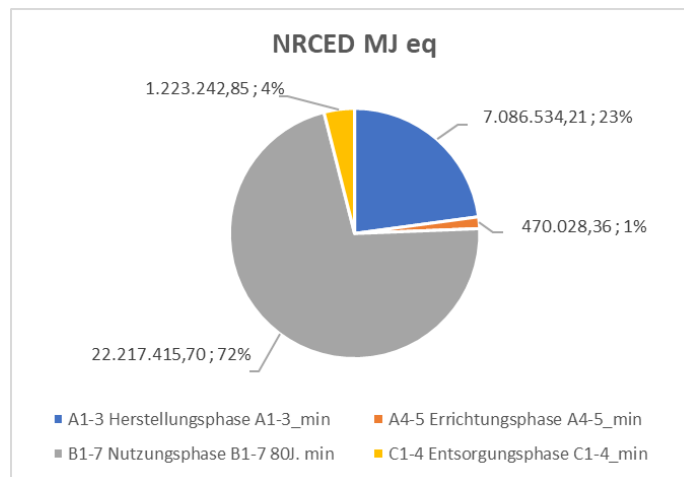


Abbildung 4-67: Analyse 4a-NRCED, 80 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

Die Resultate der maximalen Liegedauer sind noch augenscheinlicher. Hierbei nimmt die Herstellungsphase A1-A3 über ein Drittel der Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus ein. Das liegt daran, dass in der Nutzungsphase mit längerer Liegedauer weniger Schienen zu tauschen sind und dadurch die Umweltflüsse abnehmen. Die absoluten Zahlen der Phasen A1-A3, A4-A5 und C1-C4 verändern sich natürlich durch die längere Liegedauer nicht und sind ident mit jenen zuvor. Bei Untersuchung des GWP der Nutzungsphase reduziert sich durch die längere Liegedauer der Wert auf 1.311.703 kg CO₂ eq., was eine Minderung von 1 Mio. kg CO₂ eq. bedeutet. Das AP und der NRCED dezimieren sich ebenfalls in der Größenordnung von 50 %.

Nachkommend wird erneut auf die einzelnen Lebenszyklusphasen genauer eingegangen.

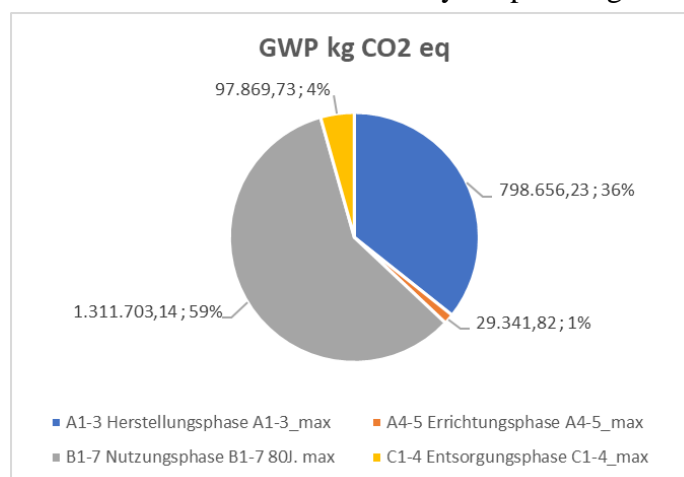


Abbildung 4-68: Analyse 4a-GWP, 80 Jahre_max

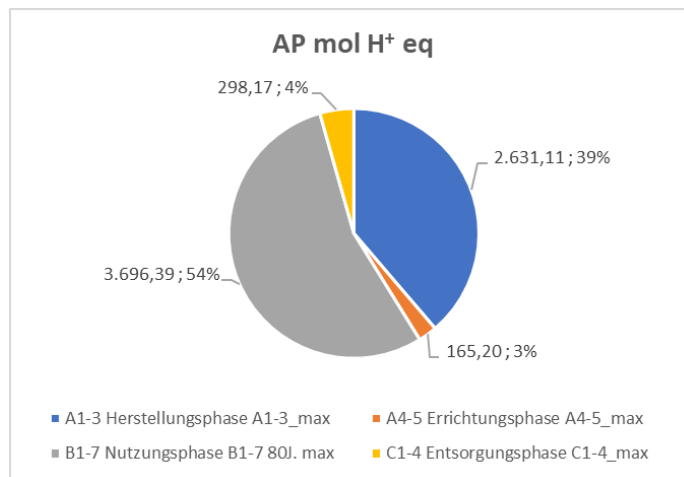


Abbildung 4-69: Analyse 4a-AP, 80 Jahre_max

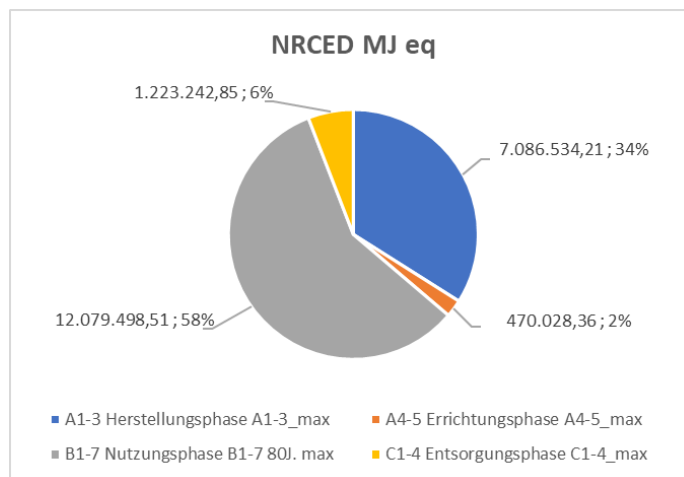


Abbildung 4-70: Analyse 4a-NRCED, 80 Jahre_max

Herstellungsphase A1-A3

Bei der Festen Fahrbahn sind mit ca. 35-45 % die größten Auswirkungen der Herstellungsphase (siehe Abbildung 4-71) auf die Umwelt der massiven Betonkonstruktion zuzuordnen. Vor allem ist hierbei die Unterkonstruktion mit der Lastverteilerplatte und dem Vergussbeton der „Verursacher“ bei den Betonkomponenten. Auf die Gleistragplatten entfallen lediglich ca. 12-15 %. Danach nimmt die Erzeugung der Schienen mit 31-40 % den zweitgrößten Anteil der Umweltwirkungen in Anspruch. Die weiteren Umwelteinflüsse entfallen auf die Befestigung und die Erdölprodukte (Zwischenlagen und elastische Trennschicht).

Als möglicher Optimierungsbereich kristallisiert sich neuerlich die Schiene heraus, da gerade hier große Outputs bei der Herstellung an die Umwelt entstehen. Wie bereits unter »4.6.1 Analyse 1: Betonschwelle K1« beschrieben, wären hierbei ökologische Optimierungen in der Stahlerzeugung/ Produktion denkbar.

Zur Lastverteilerplatte, welche den größten Teil der Betonauswirkungen einnimmt, wäre naheliegend, dass hierbei eine Mengenminderungen eine Möglichkeit wäre, um die Umweltwirkungen zu minimieren. Jedoch sollten diese Veränderungen nicht zu Lasten der Festigkeit, Standsicherheit oder gar der Dauerhaftigkeit fallen, da dies zu höheren ökologischen

Auswirkungen in der Nutzungsphase führt. Diese Kenntnis konnte bereits beim SchO festgestellt werden und gilt auch hier für die Feste Fahrbahn. Demnach ist es besser, in der Herstellungsphase aus ökologischer Sicht schlechter abzuschneiden und dafür über einen langen Zeitraum in der Nutzungsphase zu punkten, um dadurch Umweltwirkungen zu kompensieren bzw. gar langfristig einzusparen.

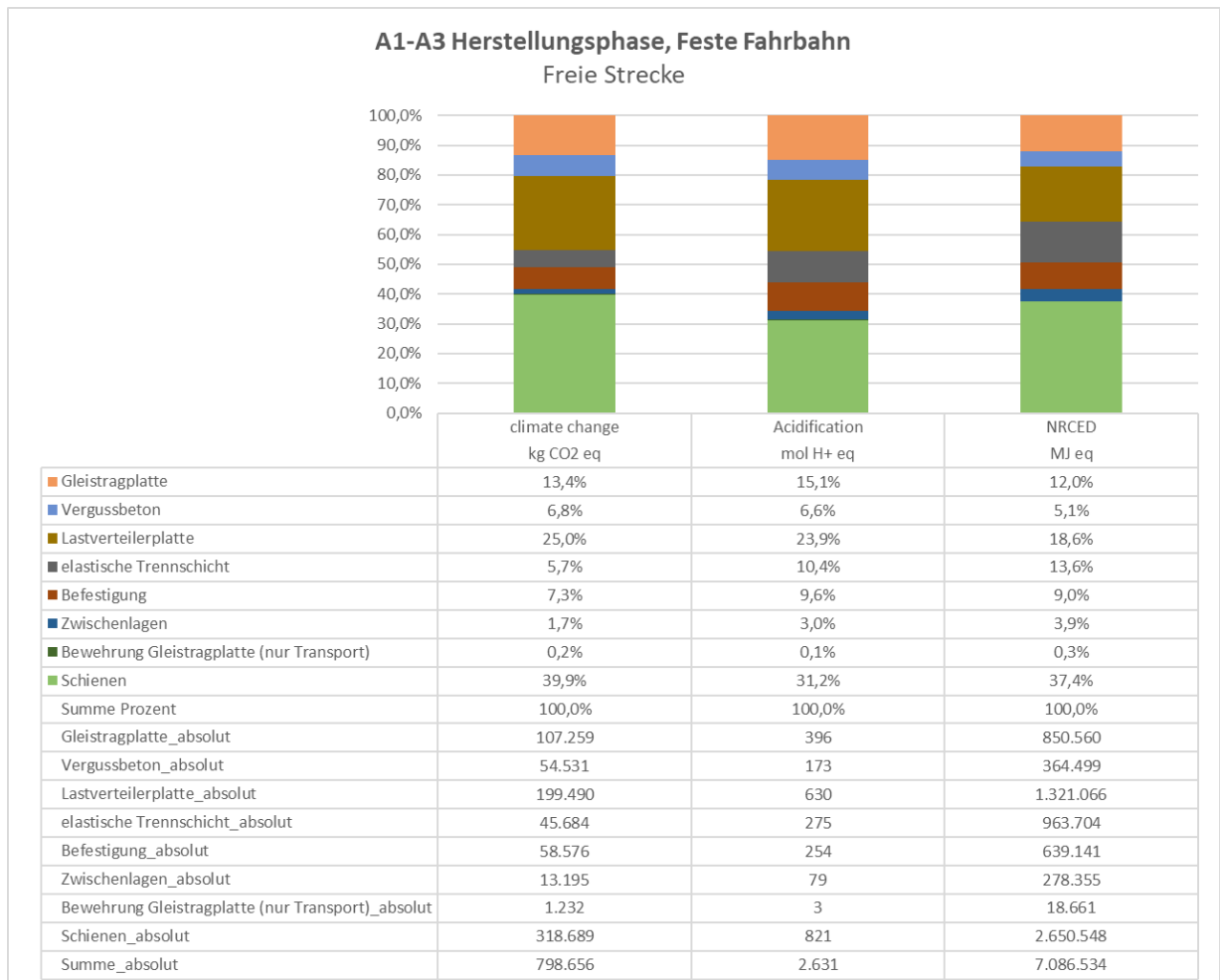


Abbildung 4-71: Analyse 4a, Herstellungsphase A1-A3

Errichtungsphase A4-A5

In der Errichtungsphase nimmt mit 80-97 % abermals der Transport der Komponenten an den Einbauort sämtliche Umwelteffekte ein. Hierbei ist der Transport der relativ schweren Gleistragplatten maßgebend. Der Einbau selbst, welcher durch die Baumaschinen wesentlich geprägt ist, hat hier unwesentlich Einfluss auf den Output der betrachteten schädlichen Stoffe. In Summe ist der Beitrag der Errichtungsphase zum gesamten Lebenszyklus gering und kann auf etwa 1 % beziffert werden. Wirkliche Optimierungspotentiale ergeben sich durch die hier ersichtlichen Resultate nicht. Eine erdenkliche Möglichkeit, die ergriffen werden kann, ist eine Herstellung der Gleistragplatten auf der Baustelle mittels provisorischem Betonfertigteilwerk. Diese Option ist am Beispiel Brenner Basistunnel denkbar. Jedoch muss durch diese

Vorortherstellung eine entsprechende Qualitätssicherung betrieben werden, sodass dieselbe Güte und Qualität des Produkts hergestellt wird. Zudem werden durch die Vorortherstellung zusätzliche Effekte auf die Umwelt entstehen, da die Errichtung des provisorischen Betonmischwerks zum Teil durch Allokation dem Produkt der Festen Fahrbahn zugeschrieben werden muss. Eine Abwägung, ob durch diese Vorgehensweise eine umweltfreundlichere Lösung gefunden wird, ist hierbei vorab erforderlich, da doch der Beitrag dieser Lebenszyklusphase in Hinblick auf den gesamten Lebenszyklus derart gering ist. Eine Untersuchung dieser Thematik entzieht sich der vorliegenden Ausarbeitung und müsste zumindest in einer Folgeanalyse Berücksichtigung finden.

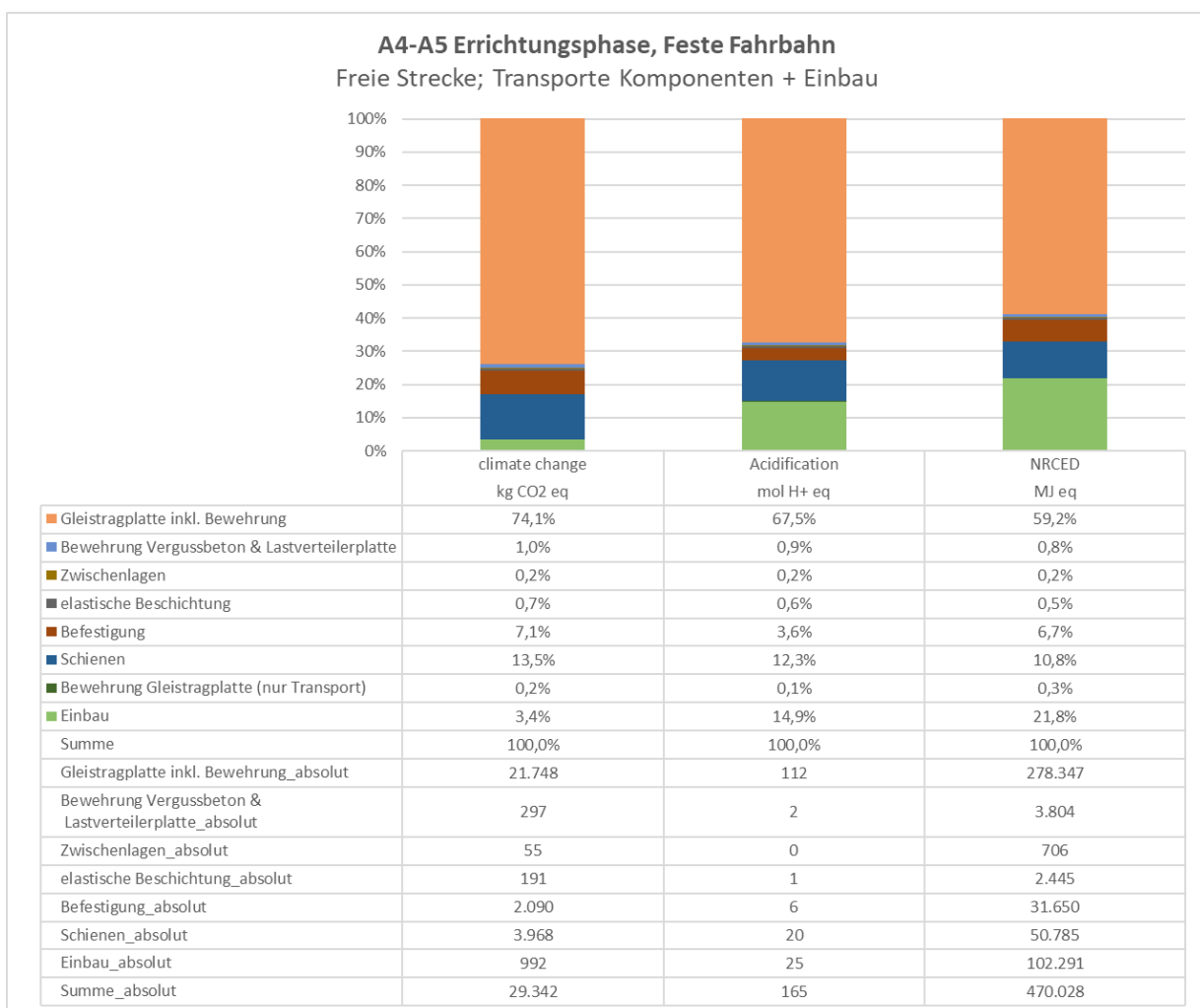


Abbildung 4-72: Analyse 4a, Errichtungsphase A4-A5

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

Die in Abbildung 4-73 dargestellten Reaktionen auf die Umwelt sind gänzlich dem Tausch/ der Modernisierung der Schienen bzw. der Schienenbefestigung in Betrachtungszeitraum zuzuschreiben. Andere Auswechslungen sind bei der Festen Fahrbahn über 80 Jahren nicht vorzunehmen.

Eine ökologische Verbesserung könnte hierbei nur durch die Verlängerung der Schienen-Liegedauer erreicht werden. Andere Optimierungen scheinen aufgrund des geringen Beitrags als vernachlässigbar und als nicht sinnvoll.

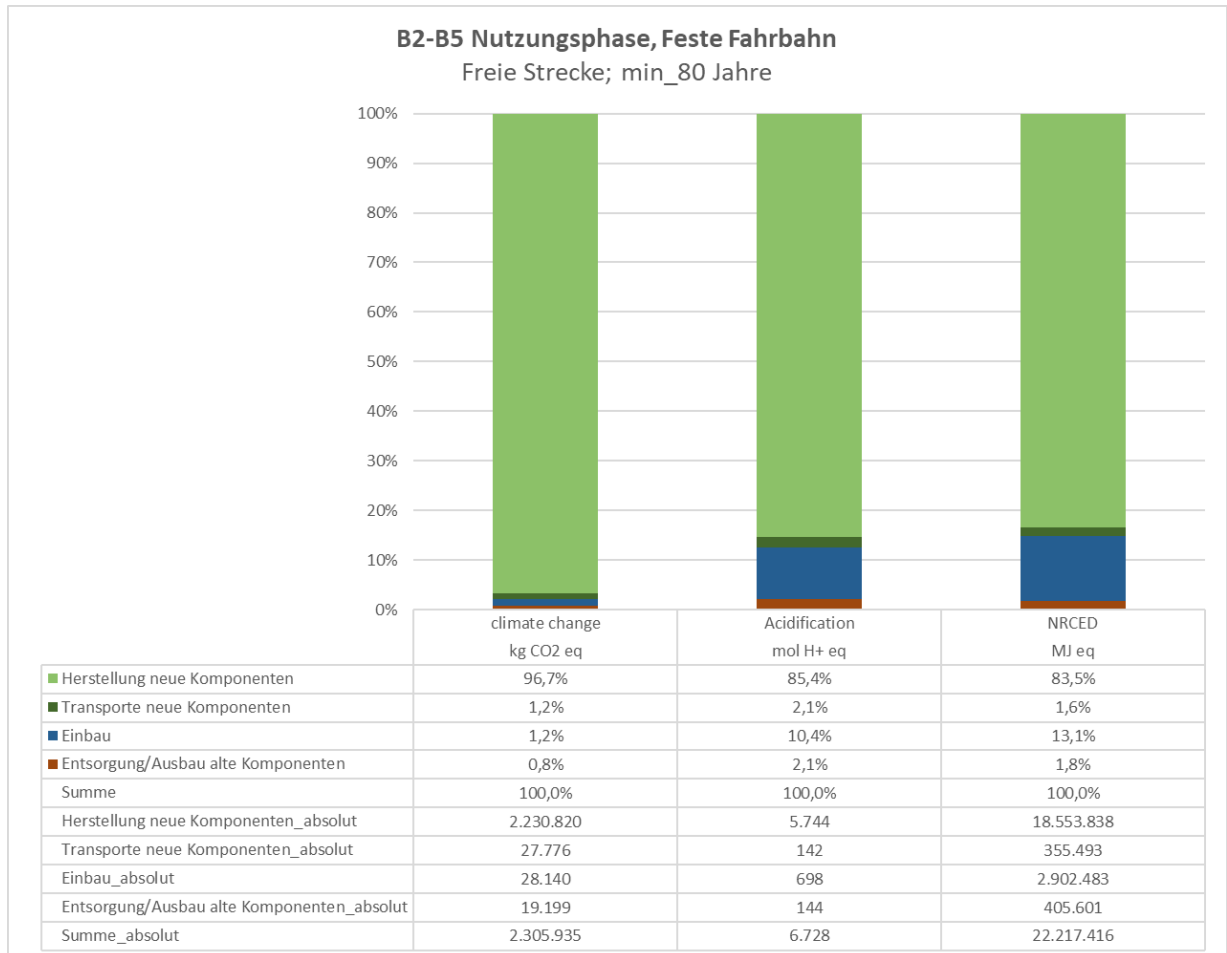


Abbildung 4-73: Analyse 4a, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 80 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

Für die maximale untersuchte Liegedauer gilt dasselbe, wie bei der minimalen. Sämtliche hier dargestellte Umwelteffekte entstehen durch den Tausch der Schienen. Aus diesem Grund steht und fällt die Verbesserung der Nutzungsphase der Festen Fahrbahn bei Betrachtung von 80 Jahren an der Optimierung der Liegedauer der Schienen. Weitere Verbesserungen sind, wie zuvor beschrieben, nicht wirklich zielführend.

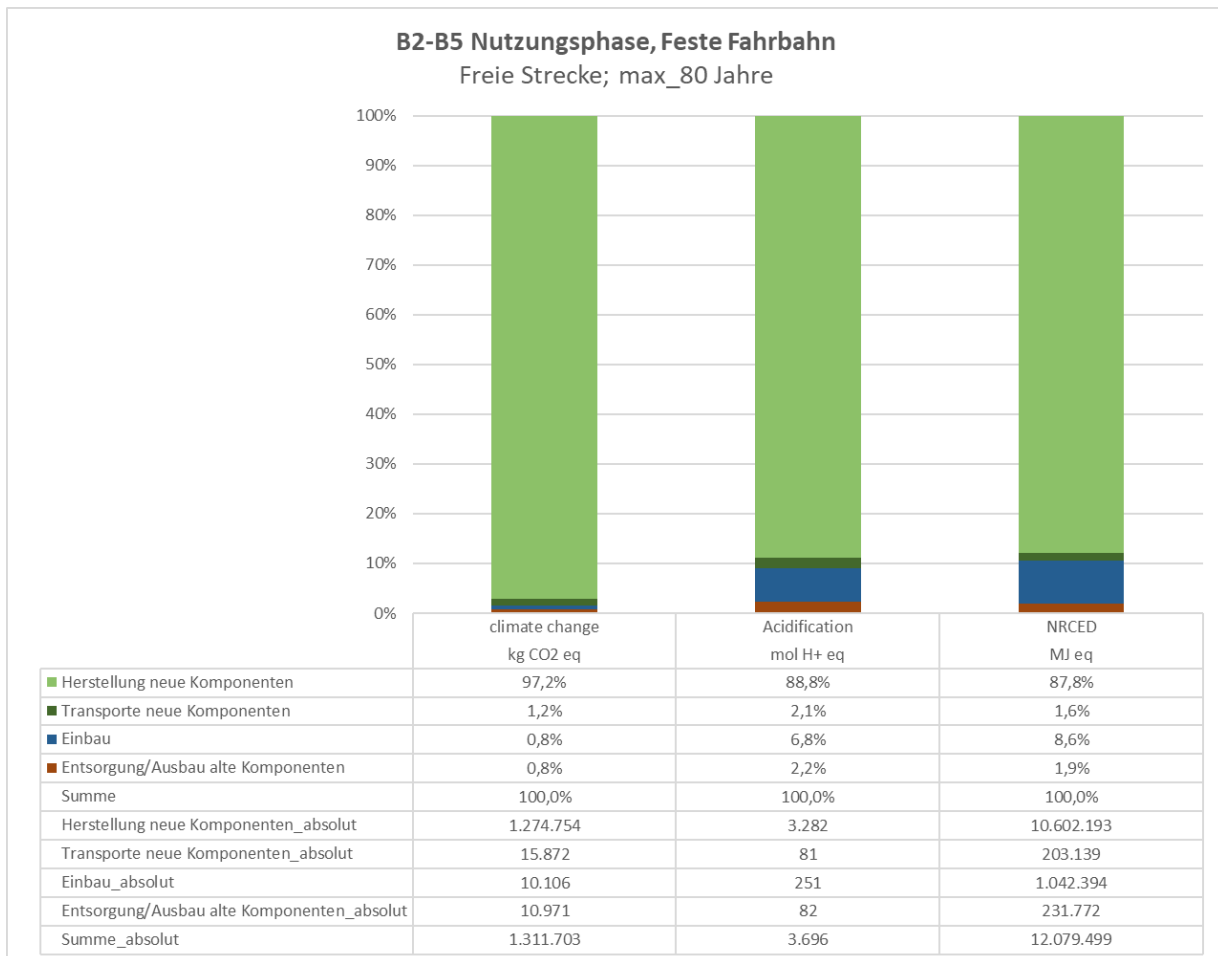


Abbildung 4-74: Analyse 4a, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 80 Jahre

Entsorgungsphase C1-C4

Die Entsorgungsphase ist geprägt durch die Entsorgung der Betonwerkstoffe. 65-87 % der Umweltwirkungen sind auf diese zurückzuführen. Ein relativer großer Teil fällt beim GWP auf die elastischen Zwischenlagen und die elastische Trennschicht der Gleistragplatte. Die Anteile aus dem Ausbau und der Verschrottung der Schienen sind vernachlässigbar klein.

Eine Besserung der Resultate dieser Lebenszyklusphase könnte durch die Steigerung der Betonrecyclingrate, welche in dieser Studie mit 60 % angenommen wurde, erreicht werden. Somit könnten Mengen in der Deponierung entfallen und negative Umweltausflüsse vermieden werden. Ein weiterer Schritt wäre eine Abfallbehandlungsalternative zur Verbrennung der

Erdölprodukte (Zwischenlagen, elastische Trennschicht) anzudenken. Diese Thematik wurde aber bereits bei der Schwelle K1 näher beschrieben. Deshalb wird in diesem Abschnitt nicht näher darauf eingegangen.

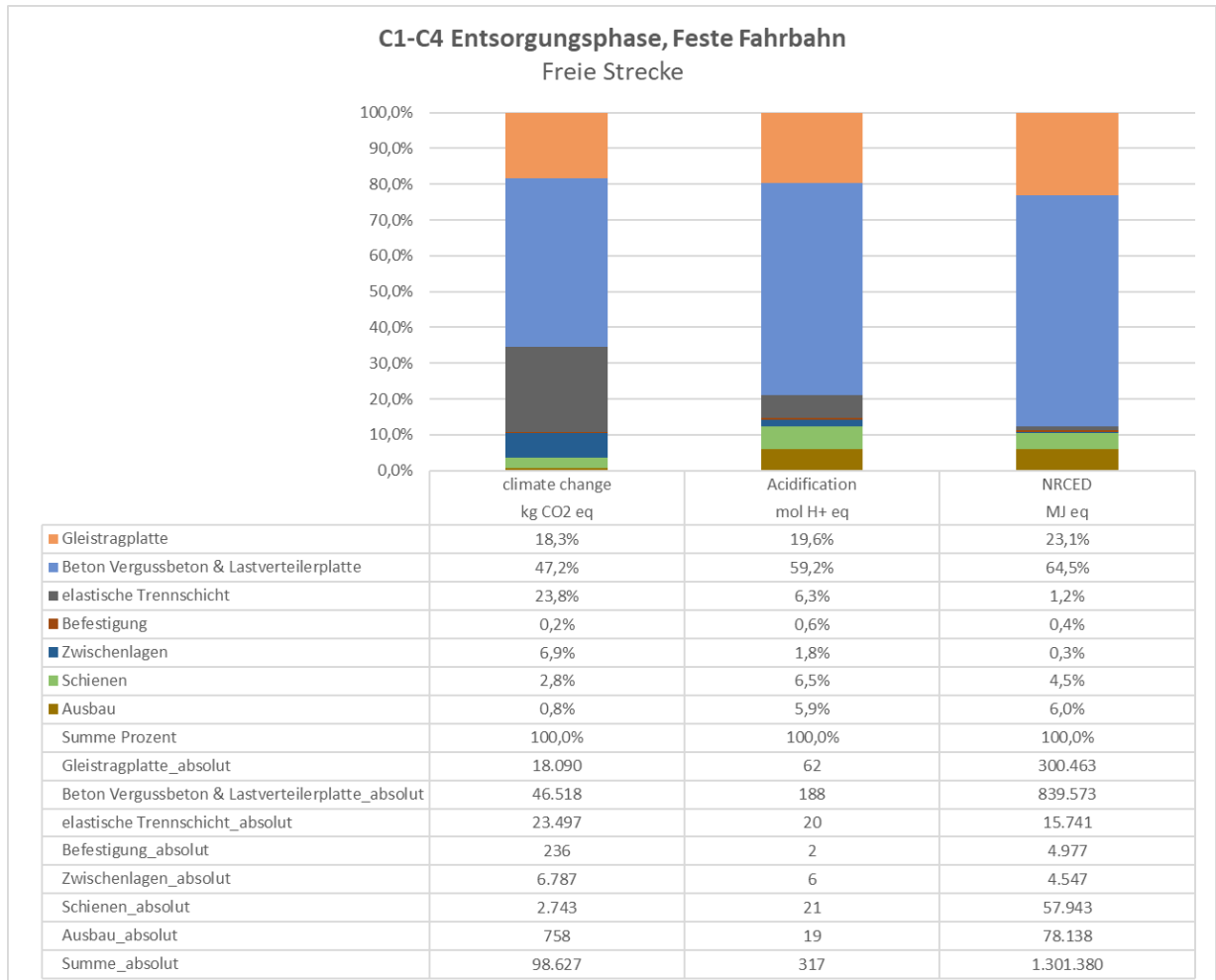


Abbildung 4-75: Analyse 4a, Entsorgungsphase C1-C4

4.6.4.2 Betrachtungszeitraum 200 Jahre

Bei Erweiterung des Analysezeitraums auf 200 Jahre verändern sich die Resultate dahingehend, dass die Nutzungsphase einem noch größeren Zuwachs erfährt und die Effekte aus der Herstellungsphase und der Entsorgungsphase beinahe verschwinden bzw. auf ein Minimum reduziert werden. Die Phasen B2-B5 nehmen somit knapp 90 % der Ausflüsse an die Umwelt ein und prägen somit den ganzen Lebenszyklus wegweisend.

Im Folgenden werden die Ergebnisse wiederholt bildlich dargestellt und die wesentlichen Resultate, welche sich vom Betrachtungszeitraum von 80 Jahren beachtenswert abheben, erläutert. Die Phasen A1-A3, A4-A5 und C1-C4 verändern sich durch die Verlängerung des begutachteten Zeitraums nicht. Dementsprechend werden im Folgenden nur mehr jene für die Phasen B1-B7 im Detail dargestellt.

Minimale Liegedauer (A1-C4)

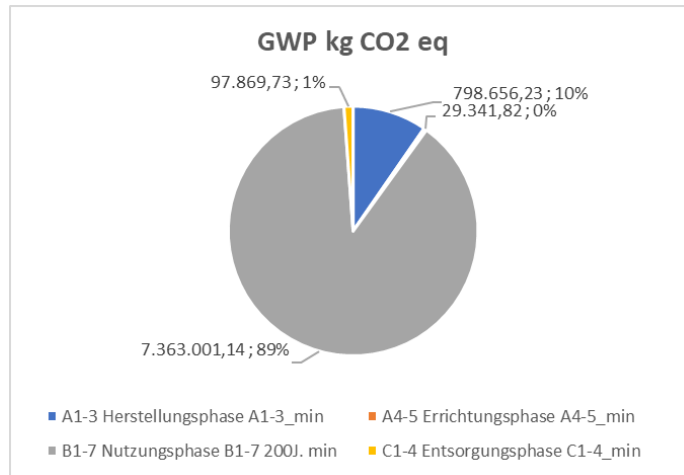


Abbildung 4-76: Analyse 4a-GWP, 200 Jahre_min

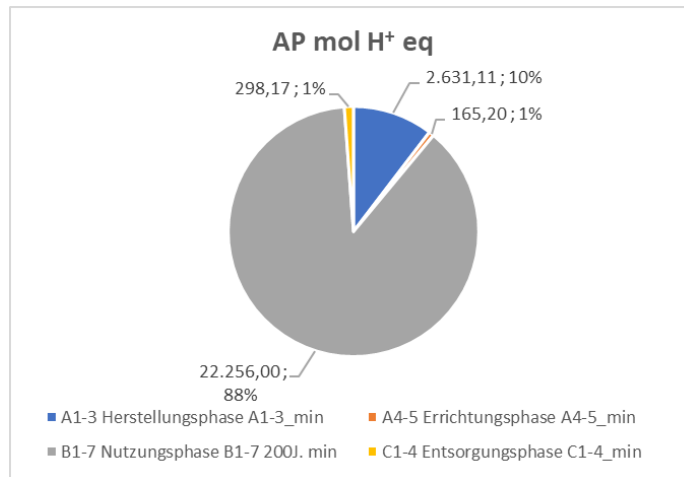


Abbildung 4-77: Analyse 4a-AP, 200 Jahre_min

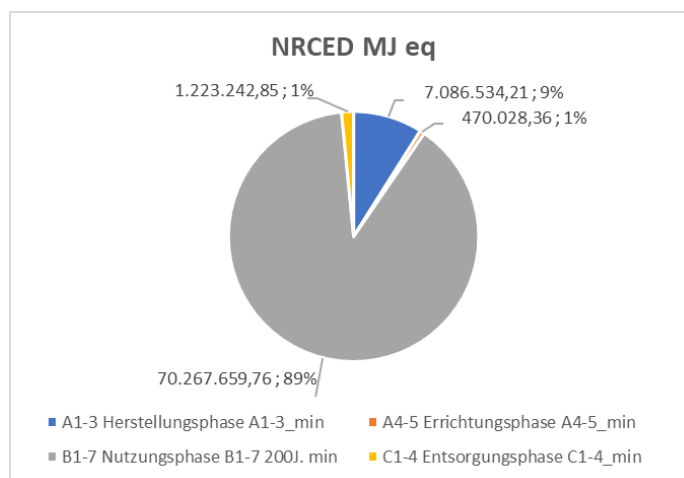


Abbildung 4-78: Analyse 4a-NRCED, 200 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

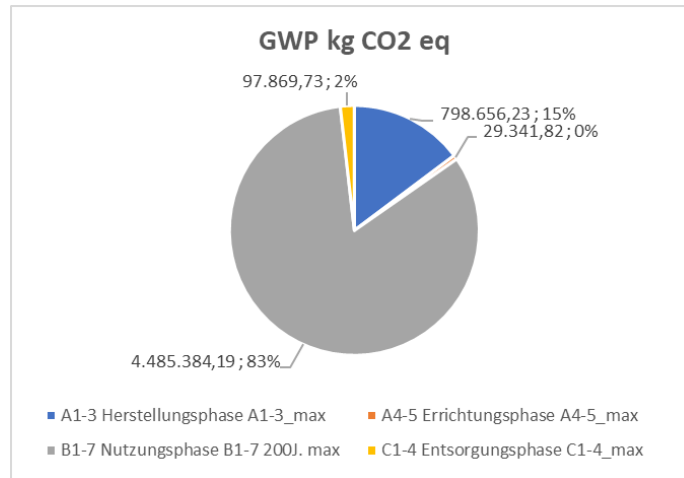


Abbildung 4-79: Analyse 4a-GWP, 200 Jahre_max

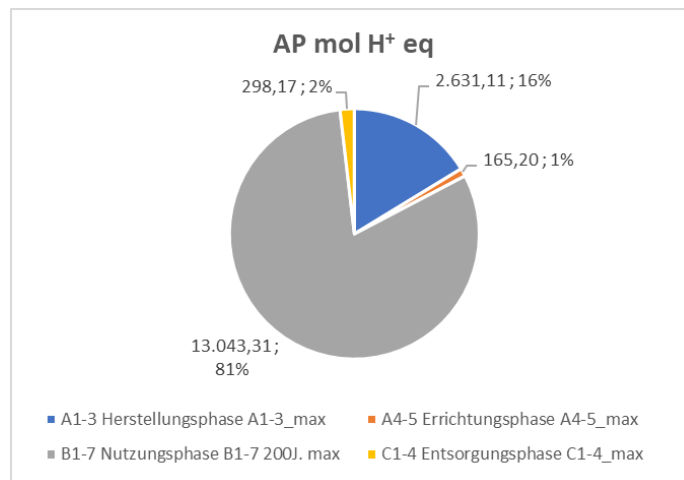


Abbildung 4-80: Analyse 4a-AP, 200 Jahre_max

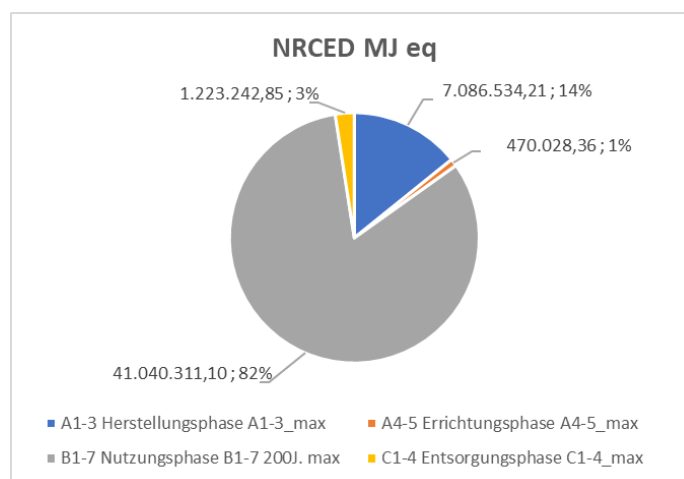


Abbildung 4-81: Analyse 4a-NRCED, 200 Jahre_max

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

Durch die Vergrößerung des Zeitraums ergeben sich in der Nutzungsphase wesentliche Unterschiede zur 80-Jahr-Variante. Die lange Zeitdauer Bedarf auch bei der Festen Fahrbahn zweier gänzlichen Auswechslungen der Oberbaukonstruktion samt Gleistragplatten, Vergussbeton und Lastverteilerplatte. Hinzu kommt eine nicht vernachlässigbare Anzahl von 19 Schienenwechsel.

Da die Fahrbahnkonstruktion bereits weitgehendst auf ein Maximum optimiert ist, sind keine zentralen Potentiale augenscheinlich zu erkennen. Natürlich gäbe es Optionen den Beton „grüner“ zu machen und Zement einzusparen, jedoch kann unter Vorgriff auf Abschnitt »4.6.7 GWP – Gegenüberstellung der Analysen« und der ermittelten Resultate, im konkreten Fall gesagt werden, dass diese zwar für die Herstellungsphase positive Auswirkungen hätten, doch über den langen Zeitraum nur einen geringen Beitrag an einer zukunftssicheren nachhaltig gebauten Umwelt leisten würden. Aus ökologischer Sicht ist abermals bei der Liegedauer der Schiene bzw. bei der Schienenherstellung Luft nach oben. Außerdem nimmt die Entsorgung der ausgebauten Komponenten in dieser Phase neben der Herstellung dieser, eine relativ große Reaktion an die Umwelt ein. Hierbei wäre wiederholend eine Steigerung der Rezyklierung der Betonwerkstoffe denkbar.

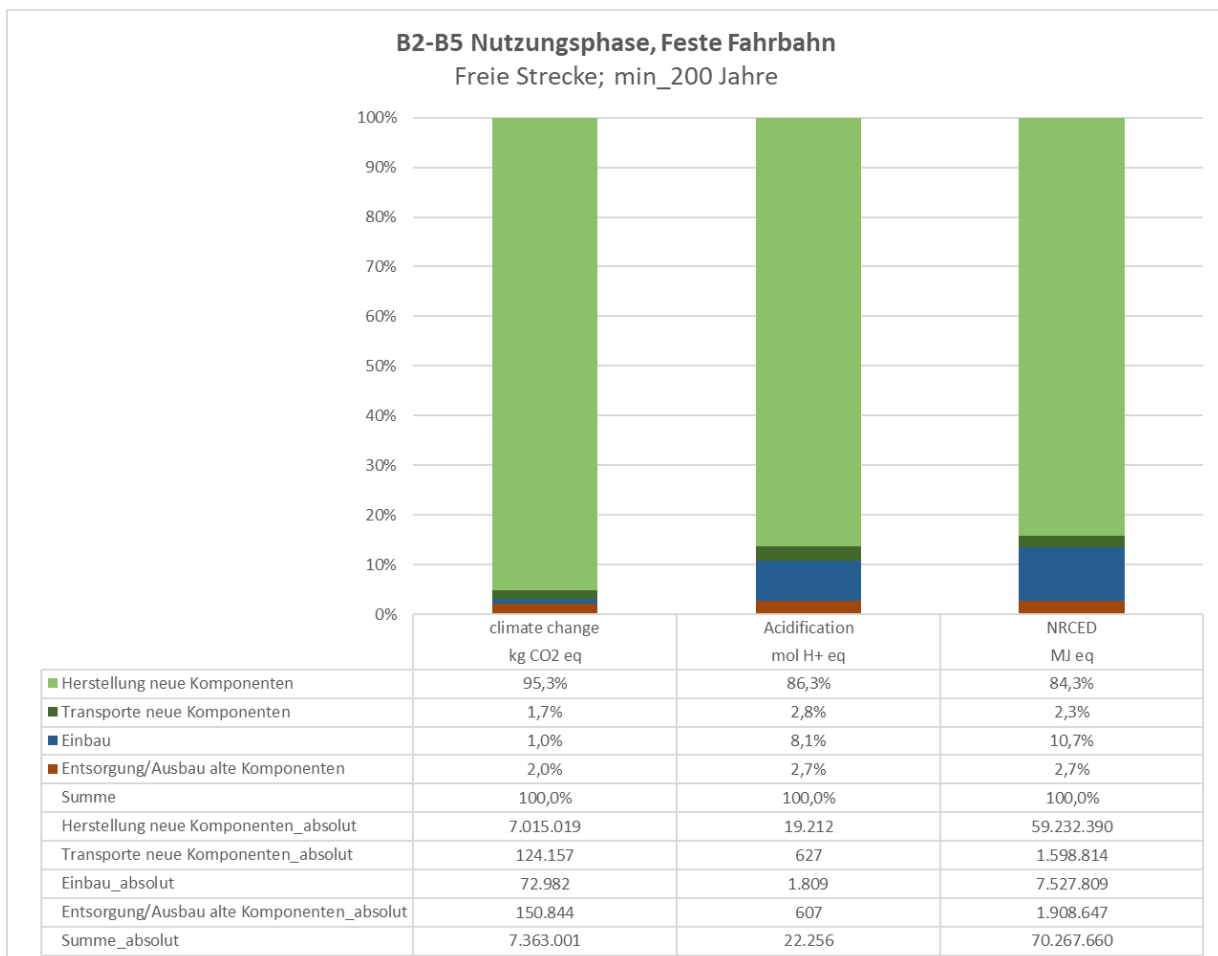


Abbildung 4-82: Analyse 4a, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 200 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

Beim maximalen Verbleib der einzelnen Komponenten im Oberbau ergibt sich auf 200 Jahre ein Wechsel der Gleistragplatten, der Unterkonstruktion und ein verringerter Schienenwechsel. Dadurch fallen die Umwelteffekte in absoluten Zahlen deutlich geringer aus als dem Pendant mit der minimalen Liegedauer.

Jedoch gelten selbe Voraussetzungen für die Optimierung der Konstruktion. Aus diesem Grund wird auf die vorhergehende Beschreibung verwiesen.

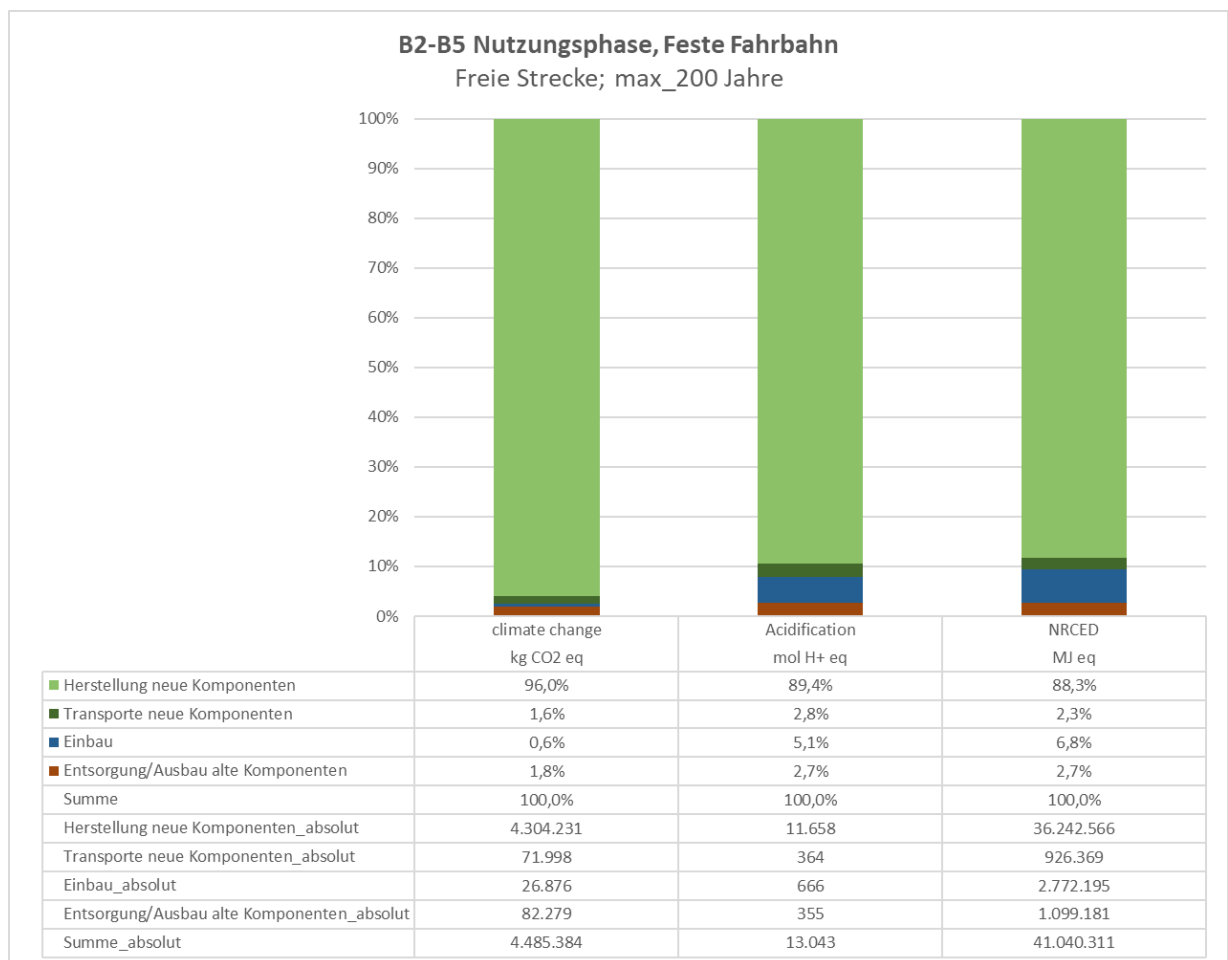


Abbildung 4-83: Analyse 4a, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 200 Jahre

4.6.5 Analyse 4b: Feste Fahrbahn – Slab Track Austria ÖBB-Porr

In diesem Abschnitt wird die Feste Fahrbahn im Tunnel auf ökologische Effekte begutachtet. Diese Analyse unterscheidet sich von jener auf der freien Strecke dahingehend, dass im Tunnel keine Lastverteilerplatte vorhanden ist, da bereits eine bewehrte Sohlplatte vorliegt und die Oberbaukonstruktion auf dieser „montiert“ wird.

4.6.5.1 Betrachtungszeitraum 80 Jahre

Zuerst werden abermals die Ergebnisse für die Zeitdauer von 80 Jahren präsentiert. Hierbei ergeben sich ähnliche Resultate, wie bei der Variante auf der freien Strecke. Die Herstellungsphase nimmt jedoch im Tunnel weniger Einfluss an den Umweltreaktionen ein und beläuft sich hier nur auf 20-22 % der gesamten Umweltbelastung. Wie auch bei den anderen Oberbauanalysen schreibt die Nutzungsphase samt den Instandhaltungszyklen für den Hauptausfluss an die Umwelt verantwortlich. Dieser kann prozentuell gesehen auf 74-77 % beziffert werden. Die Phasen der Errichtung und Entsorgung fallen unwesentlich ins Gewicht und sind für die Resultate mit 1-2% vernachlässigbar klein.

Da, wie bereits beschrieben, die „Tunnelanalyse“ ohne Lastverteilerplatte auskommt, entfallen die Umweltwirkungen dieser, und es kommt dadurch zu einer prozentuellen Verteilung an die jeweiligen anderen Komponenten. In absoluten Zahlen verringern sich daher die Summen aller Lebenszyklusphasen. Besonders ist ein merklicher Unterschied bei den Nutzungsphasen zu erkennen.

Weil sich die zentralen Aussagen und Erkenntnisse durch den Wegfall der Lastverteilerplatte jedoch nicht essentiell verändern oder dadurch gar andere Optimierungspotentiale ergeben, werden im Folgenden nur die Ergebnisse in bildlicher Form präsentiert und auf eine textliche Beschreibung verzichtet. Bezugnehmend auf die Verbesserungsmöglichkeiten und etwaigen Chancen die ökologischen Effekte zu mindern, wird auf die ausführliche Beschreibung der Analyse 4a verwiesen.

Minimale Liegedauer (A1-C4)

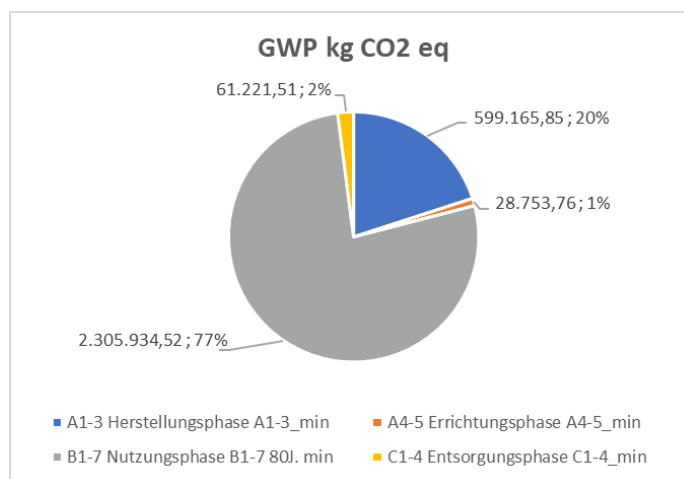


Abbildung 4-84: Analyse 4b-GWP, 80 Jahre_min

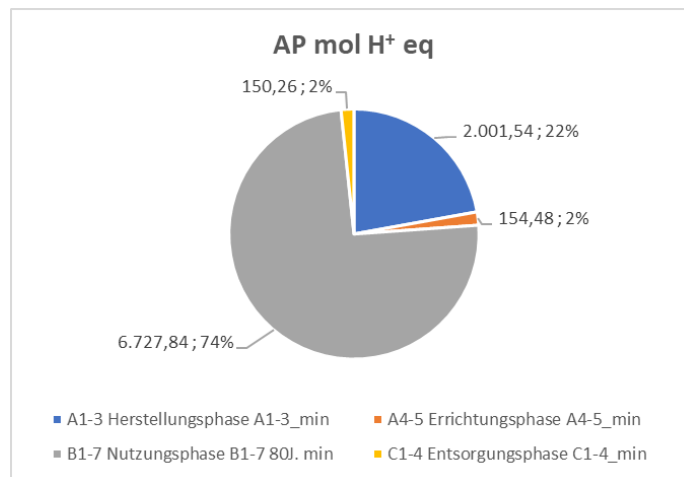


Abbildung 4-85: Analyse 4b-AP, 80 Jahre_min

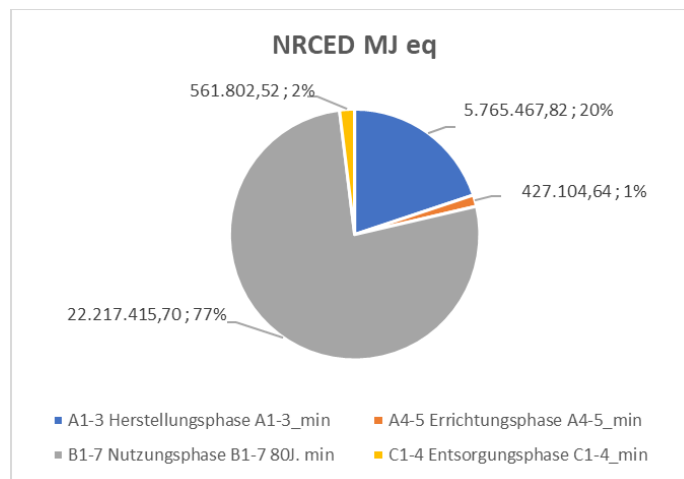


Abbildung 4-86: Analyse 4b-NRCED, 80 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

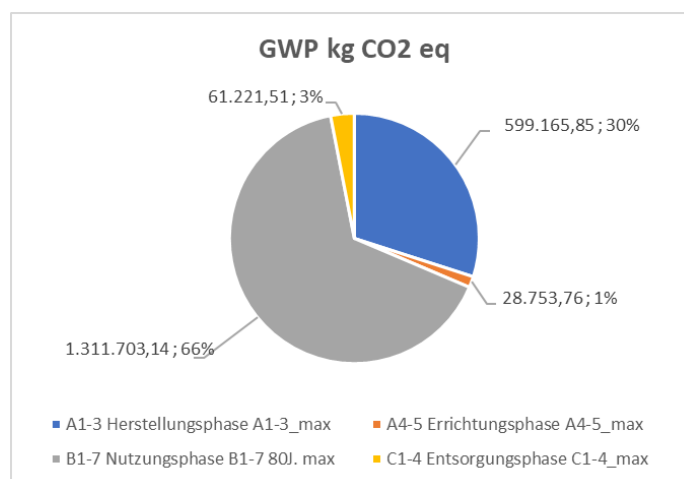


Abbildung 4-87: Analyse 4b-GWP, 80 Jahre_max

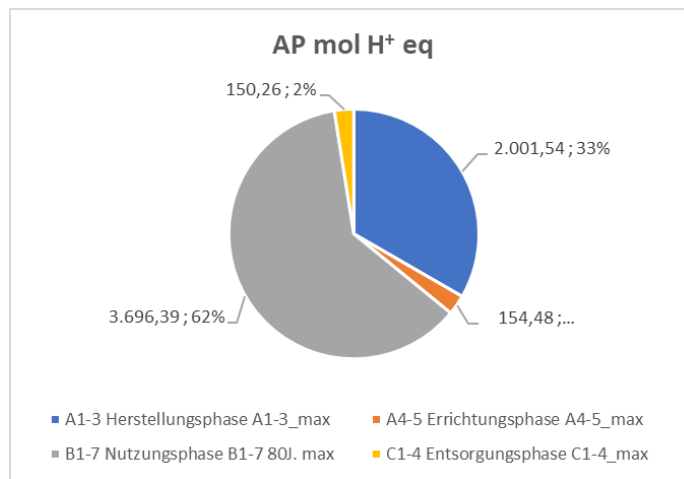


Abbildung 4-88: Analyse 4b-AP, 80 Jahre_max

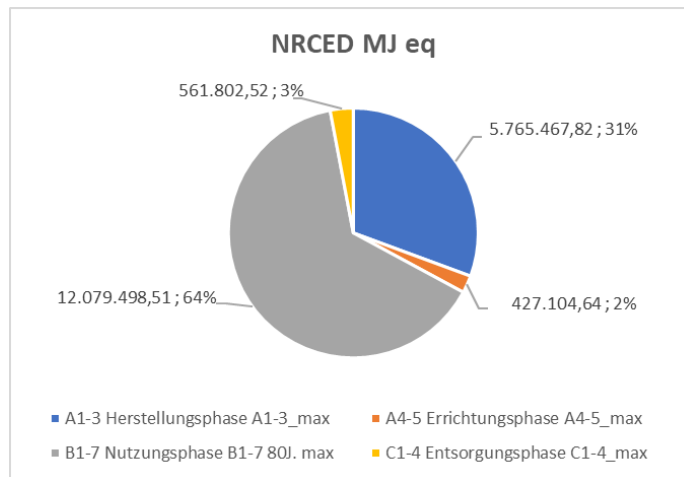


Abbildung 4-89: Analyse 4b-NRCED, 80 Jahre_max

Herstellungsphase A1-A3

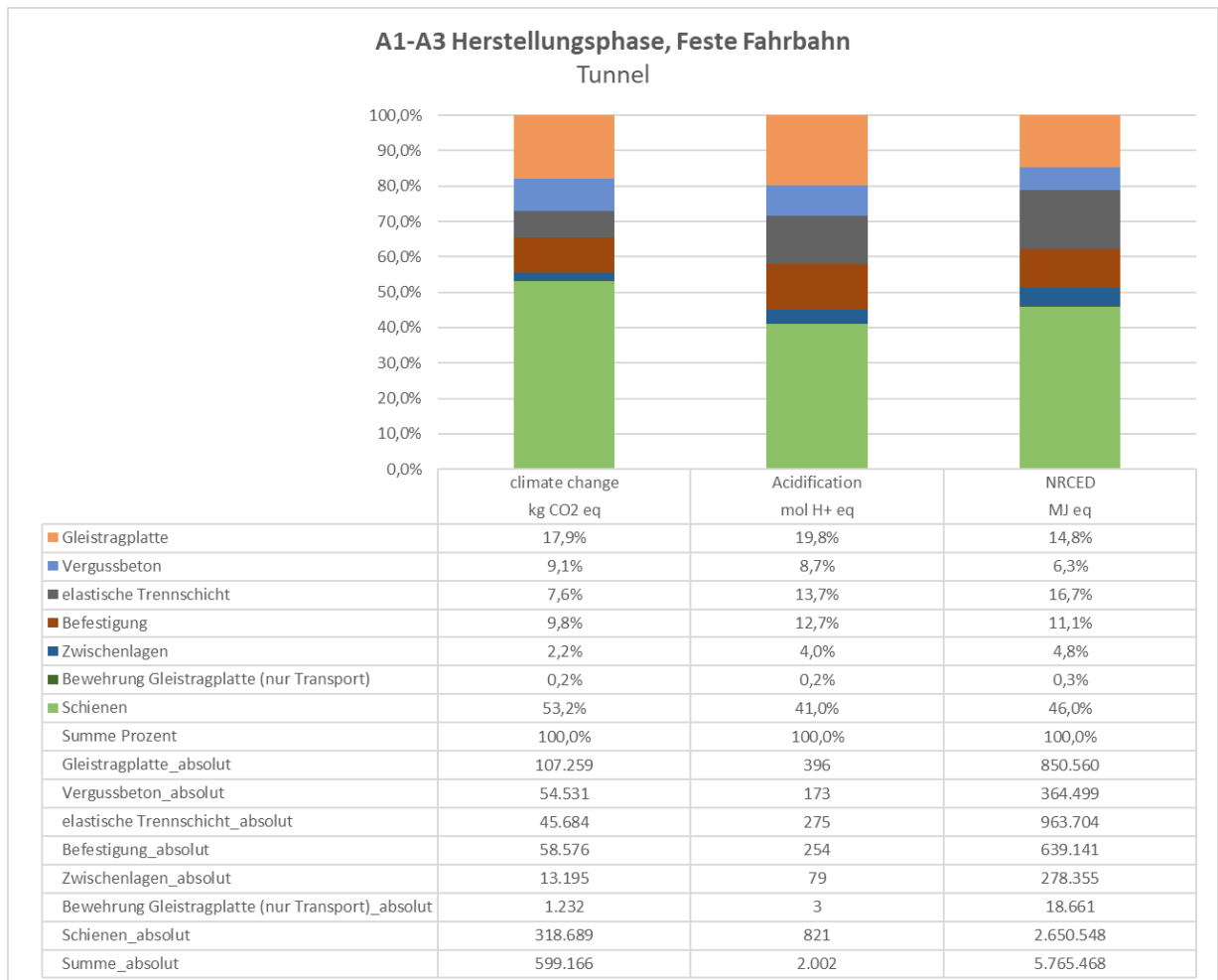


Abbildung 4-90: Analyse 4b, Herstellungsphase A1-A3

Errichtungsphase A4-A5

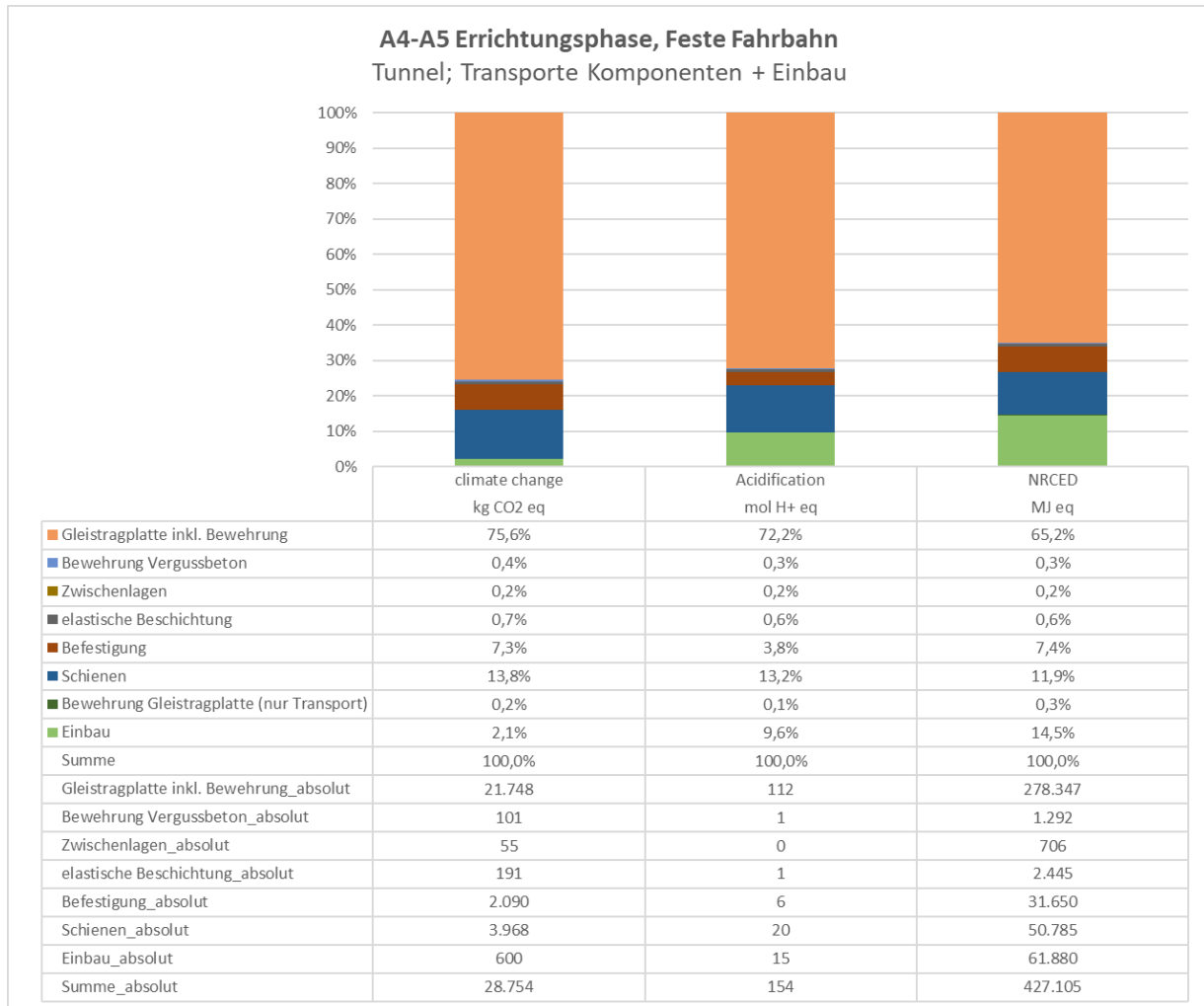


Abbildung 4-91: Analyse 4b, Errichtungsphase A4-A5

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

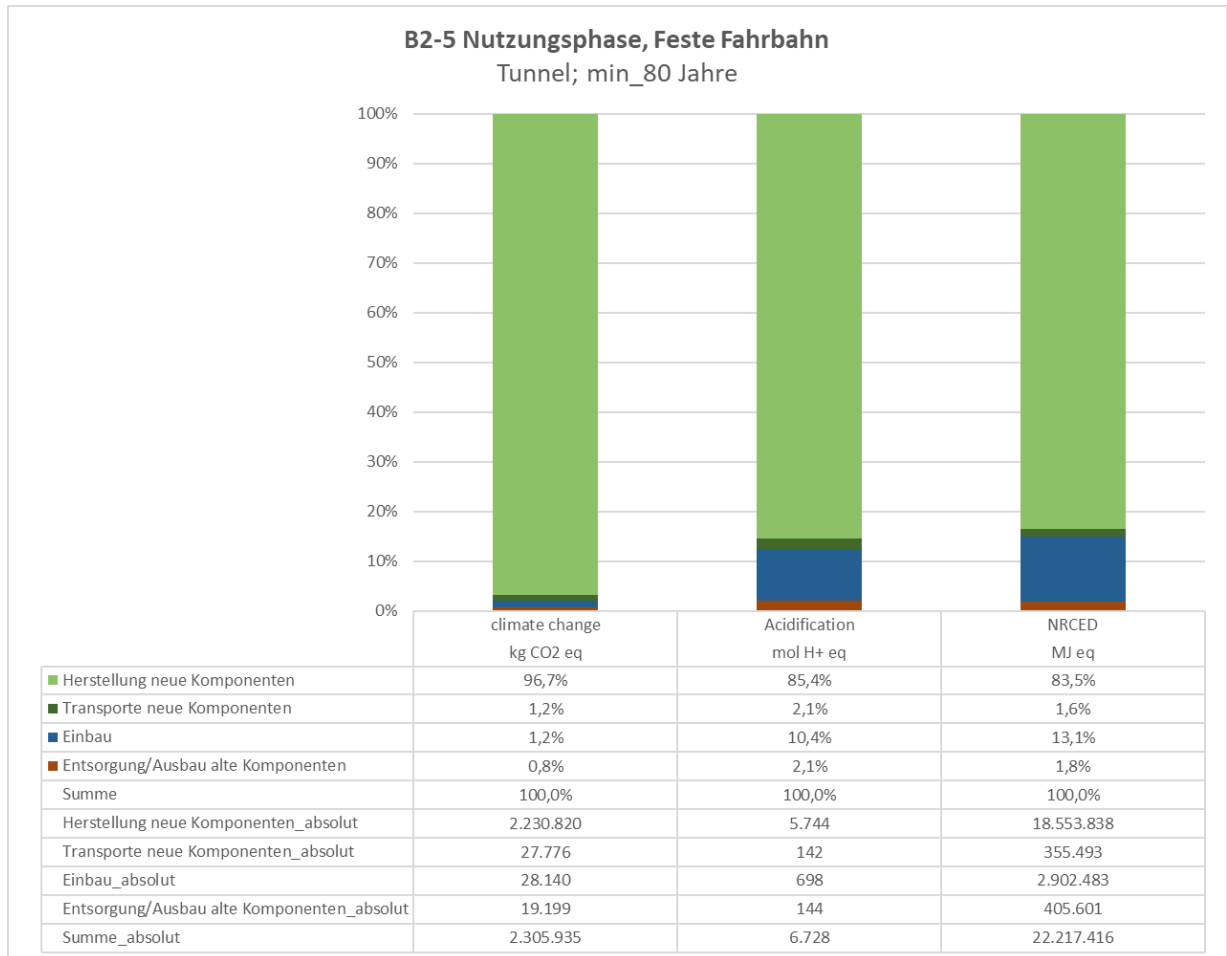


Abbildung 4-92: Analyse 4b, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 80 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

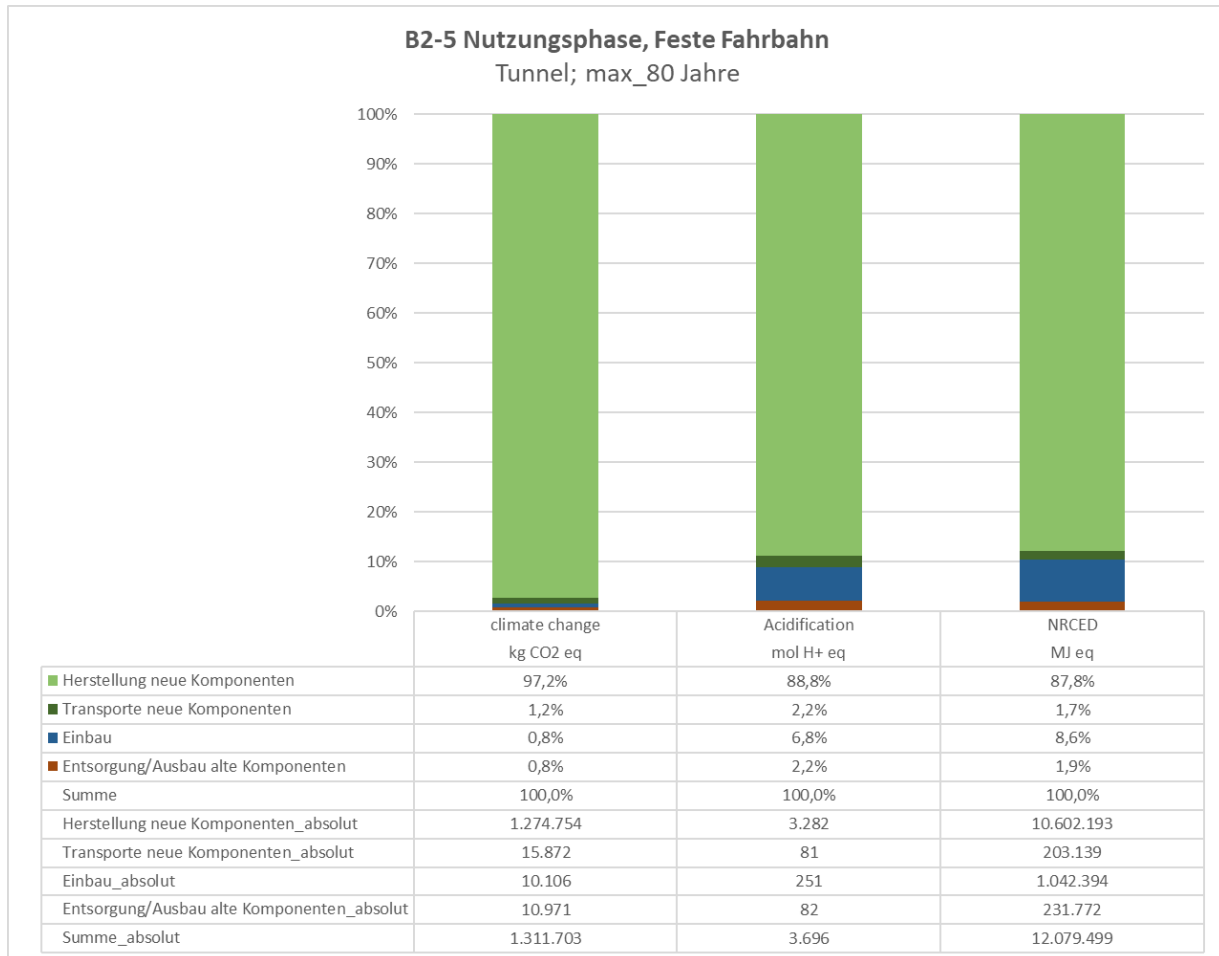


Abbildung 4-93: Analyse 4b, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 80 Jahre

Entsorgungsphase C1-C4

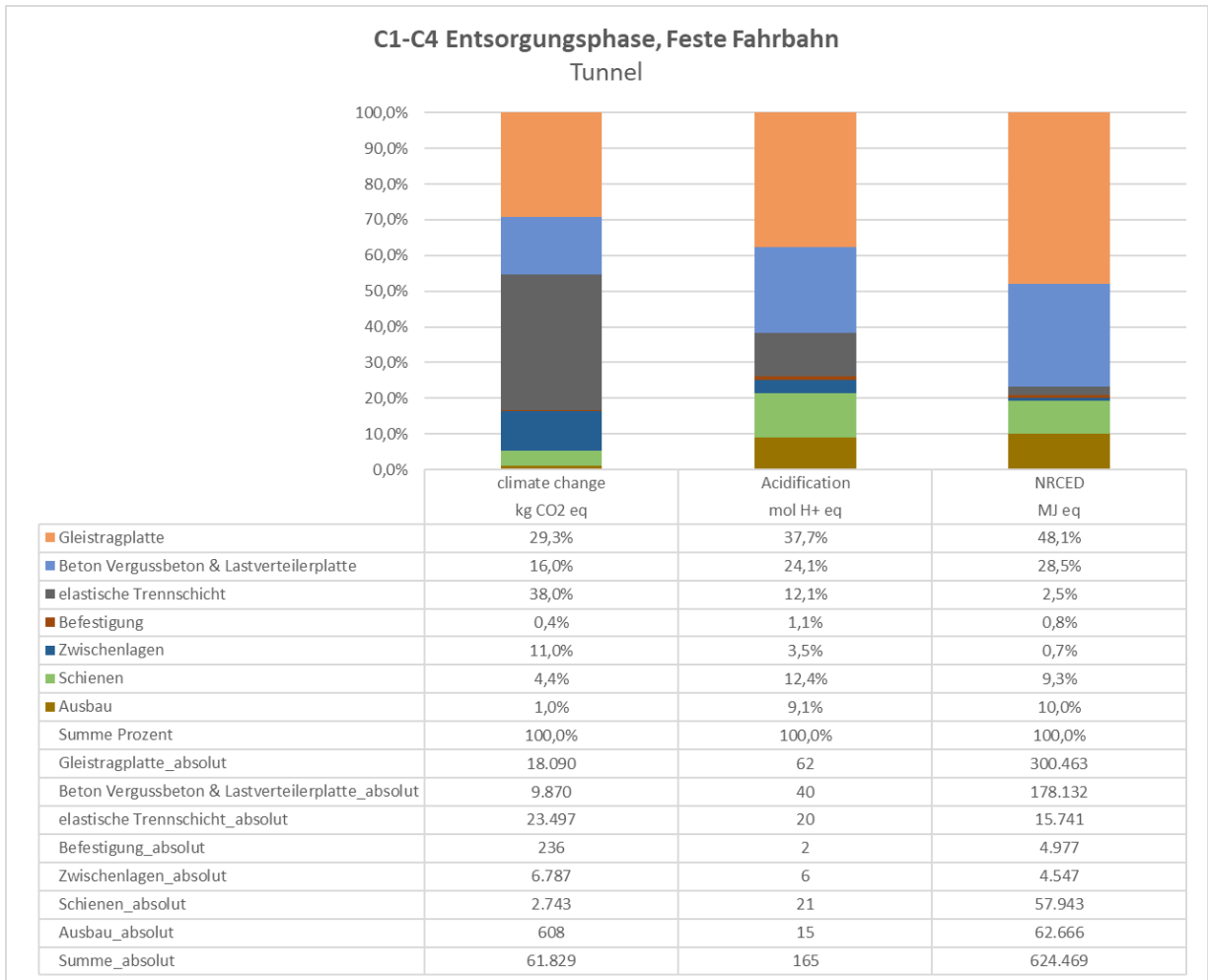


Abbildung 4-94: Analyse 4b, Entsorgungsphase C1-C4

4.6.5.2 Betrachtungszeitraum 200 Jahre

Minimale Liegedauer (A1-C4)

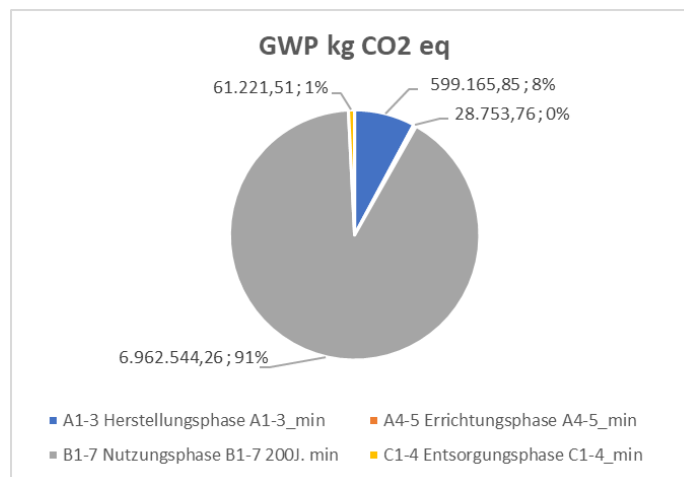


Abbildung 4-95: Analyse 4b-GWP, 200 Jahre_min

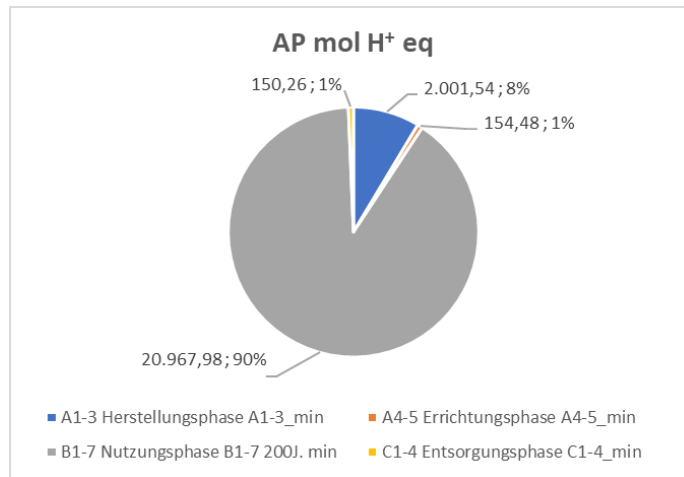


Abbildung 4-96: Analyse 4b-AP, 200 Jahre_min

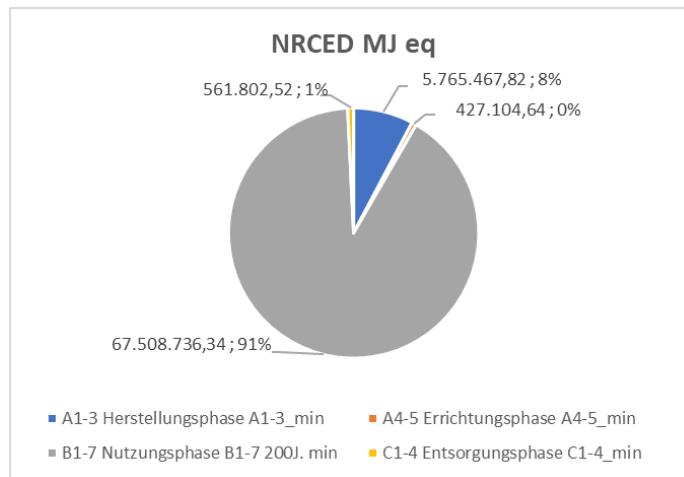


Abbildung 4-97: Analyse 4b-NRCED, 200 Jahre_min

Maximale Liegedauer (A1-C4)

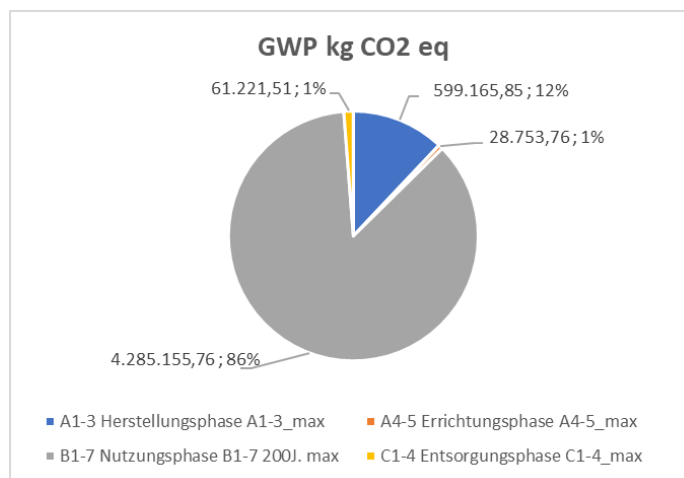


Abbildung 4-98: Analyse 4b-GWP, 200 Jahre_max

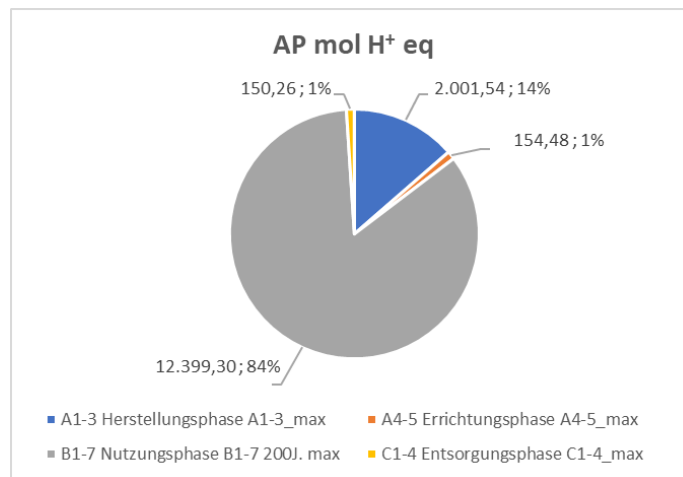


Abbildung 4-99: Analyse 4b-AP, 200 Jahre_max

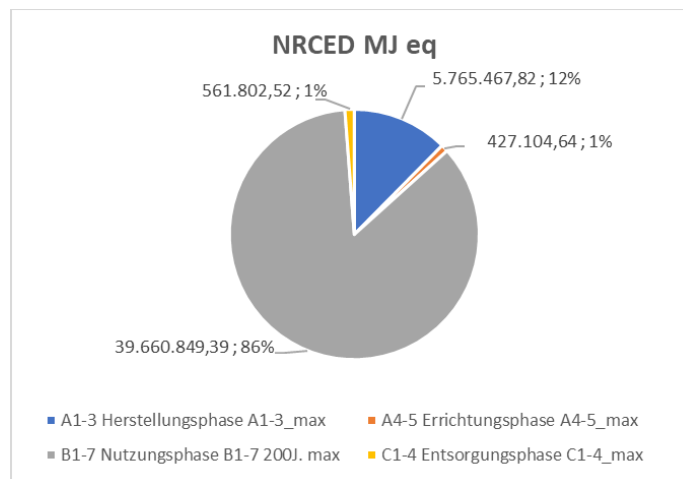


Abbildung 4-100: Analyse 4b-NRCED, 200 Jahre_max

Nutzungsphase B2-B5 – minimale Liegedauer

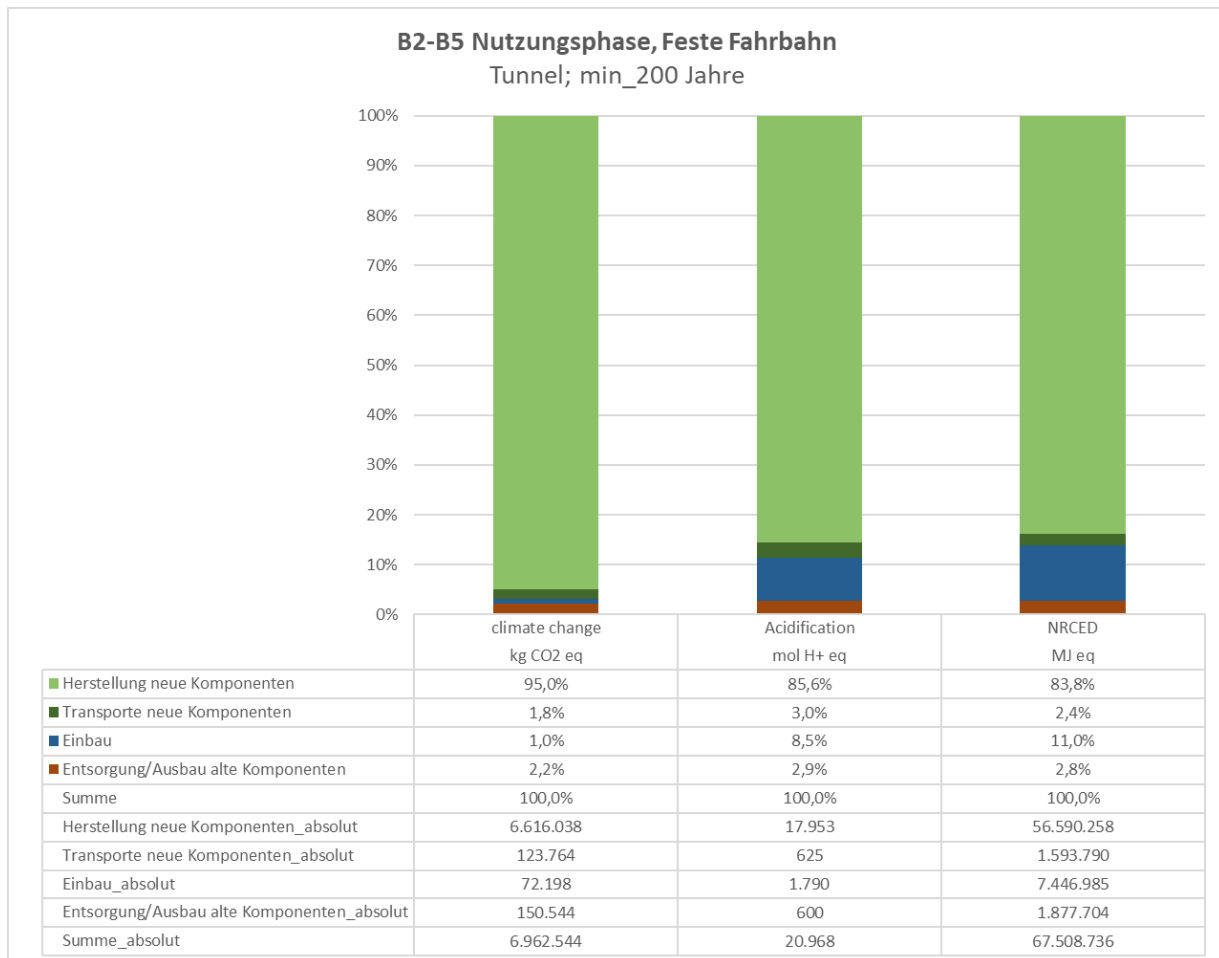


Abbildung 4-101: Analyse 4b, Nutzungsphase B2-B5, minimale Liegedauer 200 Jahre

Nutzungsphase B2-B5 - maximale Liegedauer

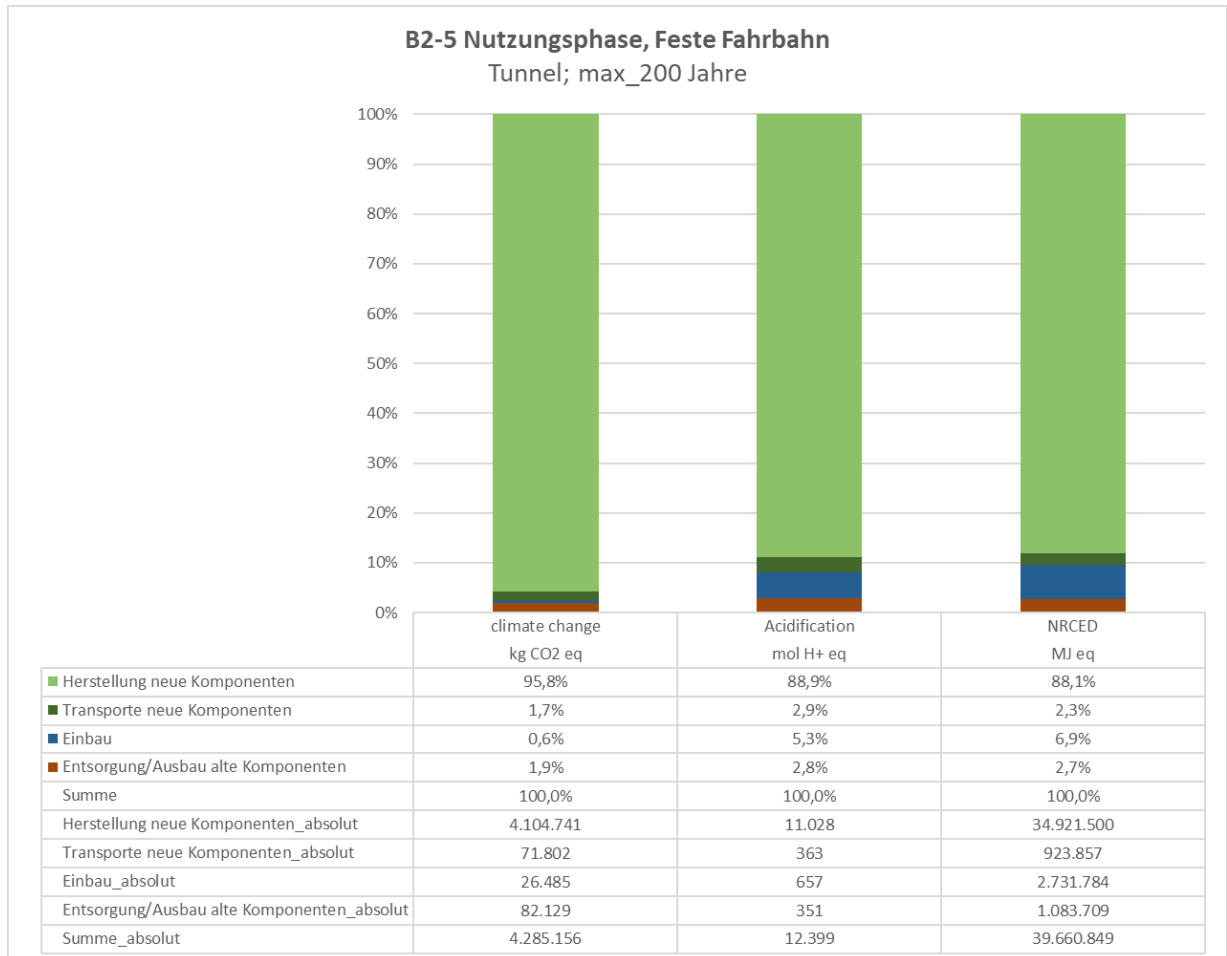


Abbildung 4-102: Analyse 4b, Nutzungsphase B2-B5, maximale Liegedauer 200 Jahre

4.6.6 Änderung des GWP bei Veränderung des Analysezeitraums

Angesichts der verschiedenen untersuchten Betrachtungszeiträume ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen auf die ökobilanziellen Ergebnisse. Demnach haben die Resultate wesentliche Abhängigkeit durch die Absteckung des Zeitraums mit den damit verbundenen Liegedauern. Aus diesem Grund wird die Zunahme der Umwelteffekte durch die Vergrößerung des Analysezeitraum anhand der Nutzungsphase für die minimale und maximale Liegedauer am Beispiel des GWPs kurz genauer beleuchtet.

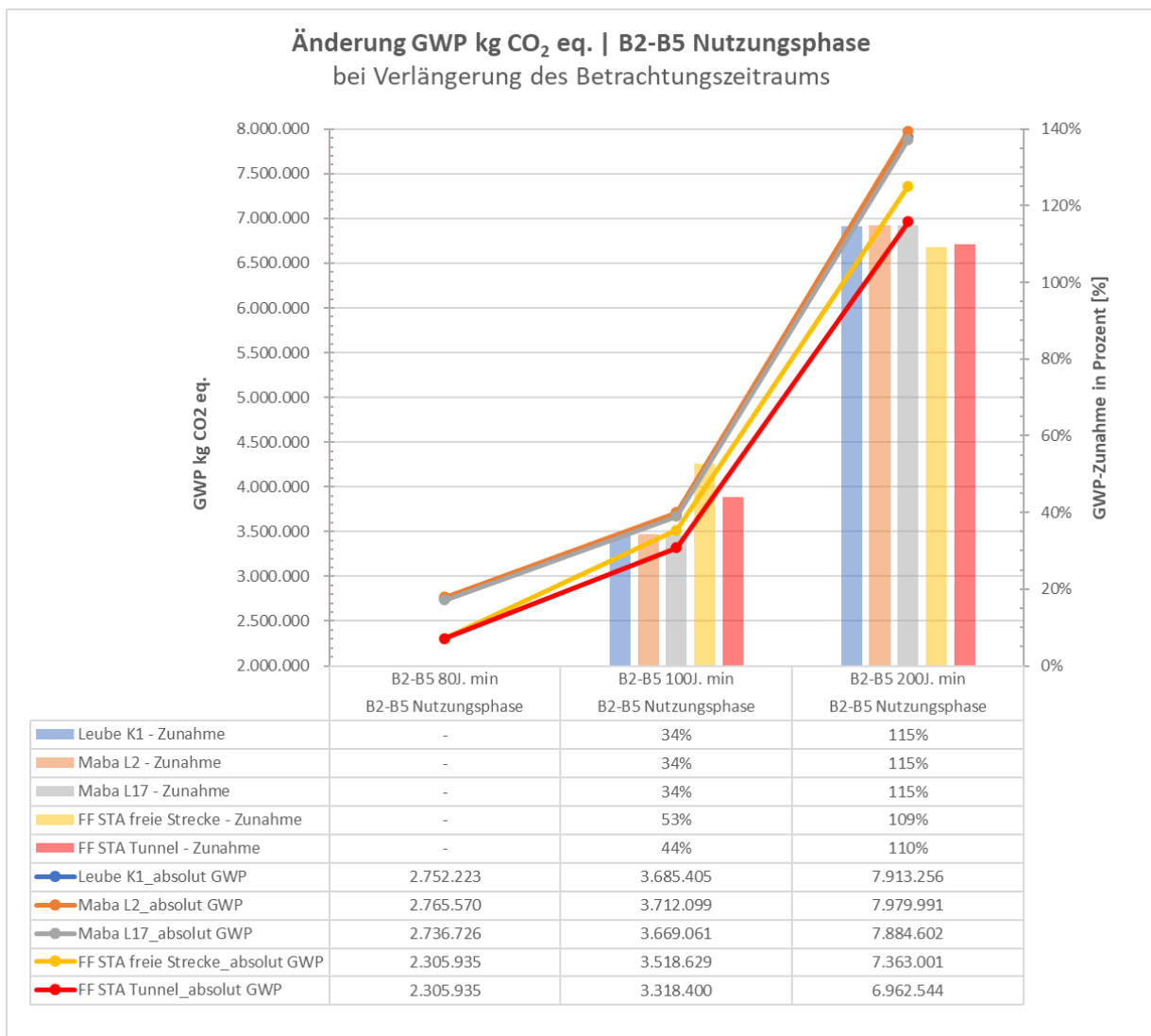


Abbildung 4-103: GWP-Änderung bei Veränderung des Betrachtungszeitraums, min

Die Abbildung 4-103 zeigt hierbei die unterschiedlichen Oberbauvarianten mit den Betrachtungszeiträumen 80, 100 und 200 Jahren. Es ist zu erkennen, dass bei 80 Jahren die Schotteroberbauten deutlich mehr zum GWP beitragen als es die Feste Fahrbahn tut. Das liegt daran, dass in diesem Zeitraum keine/ kaum Instandhaltungsarbeiten bei der Festen Fahrbahn getätigt werden müssen. Bei 100 Jahren nehmen beide Typen von Oberbauten adäquat zu. Jedoch ist augenscheinlich, dass die Feste Fahrbahn bei der minimalen Liegedauer stärker

zunimmt. Folglich liegt das daran, da mit der 20 Jahre längeren Dauer die minimale Lebensdauer der Gleistragplatte überschritten wird und getauscht werden muss. Beim Schotteroberbau ist die Auswirkung bzw. Zunahme um 10-19 % geringer, da die Zunahme hier linear mit der Anzahl der Gleisumbauten ansteigt. In diesem Zeitraum würde genau ein kompletter Gleisumbau hinzukommen.

Bei der 200-jährigen Untersuchung liegt das GWP der SchO absolut gesehen bei etwa 7.900.000 kg CO₂ eq. Der prozentuelle Zuwachs von der 100-jährigen zur 200-jährigen Analyse steigt auf etwa 115 % an.

Durch die geringen Instandhaltungsarbeiten bei der FF ergibt sich hier eine Zunahme von etwa 110 %.

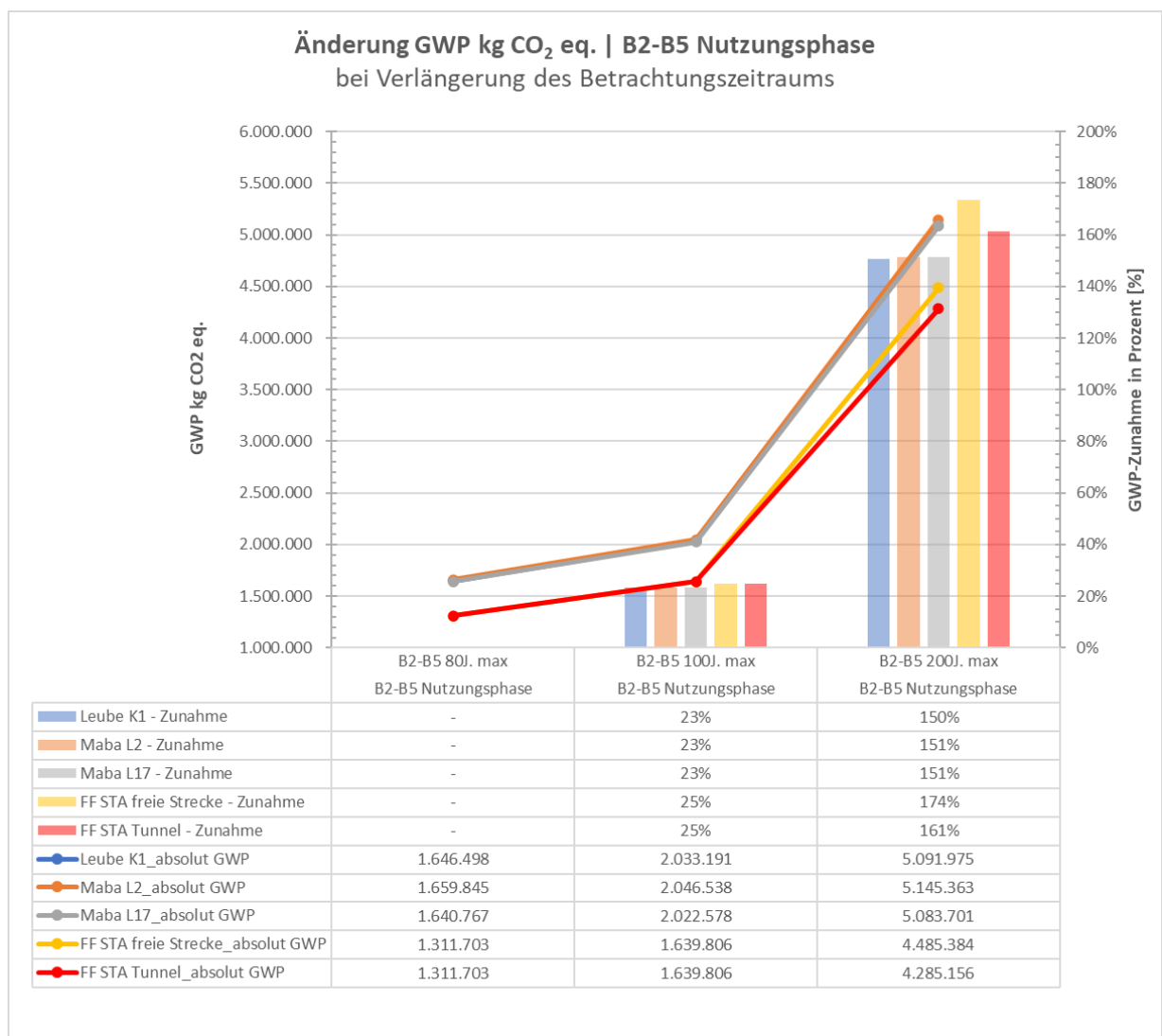


Abbildung 4-104: GWP-Änderung bei Veränderung des Betrachtungszeitraums, max

Beim Pendant mit der maximalen Liegedauer steigt das GWP bei Verlängerung um 20 Jahre flacher an und hat geringere Auswirkungen auf die Umwelt. Das liegt daran, dass bei der FF keine essentiellen Instandhaltungsarbeiten geschehen und beim SchO die Lebensdauer des eingebauten Oberbaus noch nicht zu Ende ist. Der Sprung von 100 auf 200 Jahren ist auch bei

der maximalen Liegedauer auffallend und ist auf die erhöhte Instandhaltungstätigkeit zurückzuführen. Jedoch fallen diese in Summe geringer aus als bei der vorigen minimalen Liegedauer. Hingegen wirkt der prozentuelle Zuwachs auf den ersten Blick weitaus schlechter, jedoch trägt der Schein, da die absoluten Zahlen im Vergleich der Zeiträume 80 und 100 noch relativ gering sind.

4.6.7 GWP – Gegenüberstellung der Analysen

In diesem Abschnitt wird abschließend eine Zusammenstellung der diversen Oberbauten anhand des Indikators des GWPs präsentiert. Es wird hier Bezug auf die unterschiedlichen Lebenszyklusphasen genommen und das Global Warming Potential je Version dargestellt. Zudem erfolgt eine differenzierte Betrachtung von verschiedenen Zeiträumen, sowie minimaler und maximaler Liegedauern. Abschließend werden die Ergebnisse noch ohne Betrachtung der Schienen gedeutet, da diese doch einen wegweisenden Anteil an den Umweltauswirkungen haben. Es scheint für die externen Partner (Schwellenhersteller und Gleistragplattenhersteller) die Sichtweise ohne Schienen als interessant.

4.6.7.1 Oberbauten gesamt

Die folgenden Abbildungen verdeutlichen die Erkenntnisse aus den Analysen. Die Herstellungs- und Nutzungsphase schreiben wesentlich für die Umweltwirkungen verantwortlich. Es zeigt sich, dass die FF durch ihre Konstruktion anfangs deutlich mehr CO₂ eq. emittiert als die SchO. Jedoch ist ersichtlich, dass gerade durch die Langlebigkeit des Produkts über die Dauer weniger Umweltwirkungen entstehen. Dies wird vor allem bei der Betrachtung der 200 Jahr-Analyse (Abbildung 4-107 und Abbildung 4-108) begreiflich.

Optimierungen der Oberbaukonstruktionen sollten daher das Ziel verfolgen, die Lebensdauer/Liegedauer der maßgebenden Elemente (Schiene, Schwelle, Gleistragplatte etc.) auf ein Maximum zu erhöhen, sodass während der Nutzungsphase, bspw. 200 Jahre für den Brenner Basistunnel, nur sehr wenige Komponenten getauscht werden müssen. Somit würden sich die Effekte auf die Umwelt mehr in die Herstellungsphase verschieben und in der Nutzungsphase beinahe gänzlich verschwinden. Natürlich wäre es nicht zielführend, die Produkte derart dauerhaft und massiv auszuführen, dass in Summe über den Lebenszyklus gar keine Einsparung erreicht wird. Es muss zukünftig ein Mittelweg zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase gefunden werden.

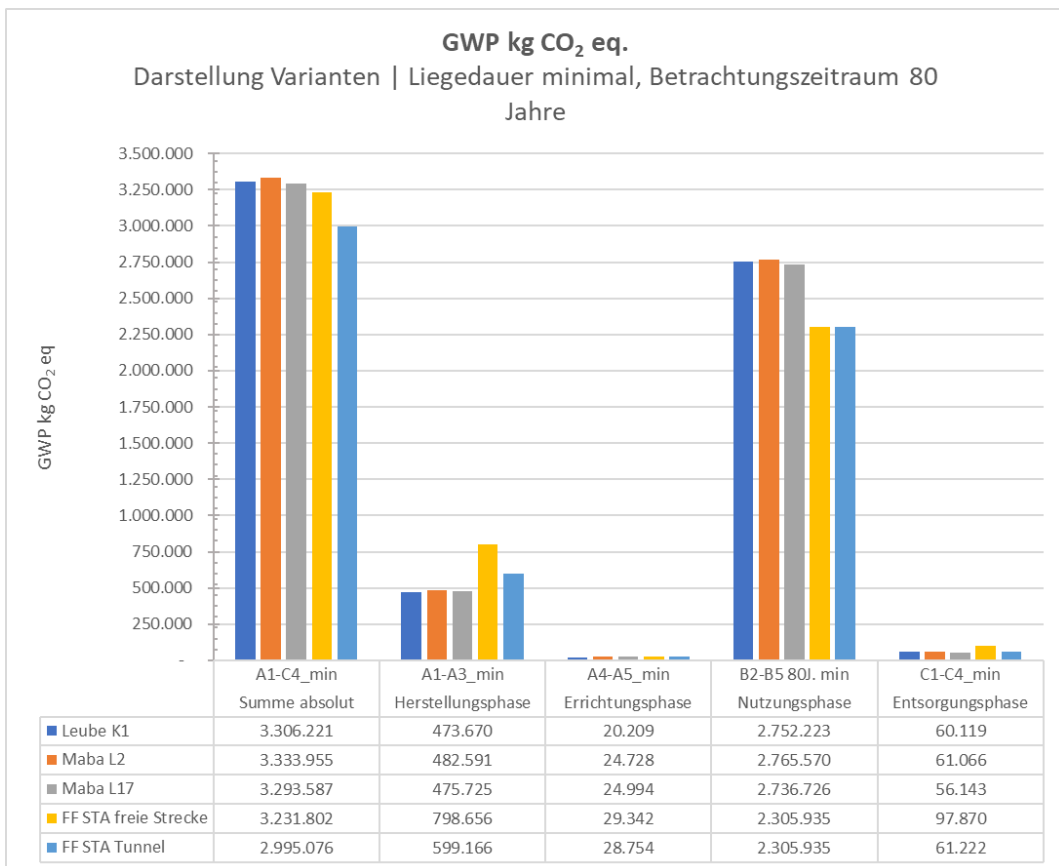


Abbildung 4-105: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, min 80J.

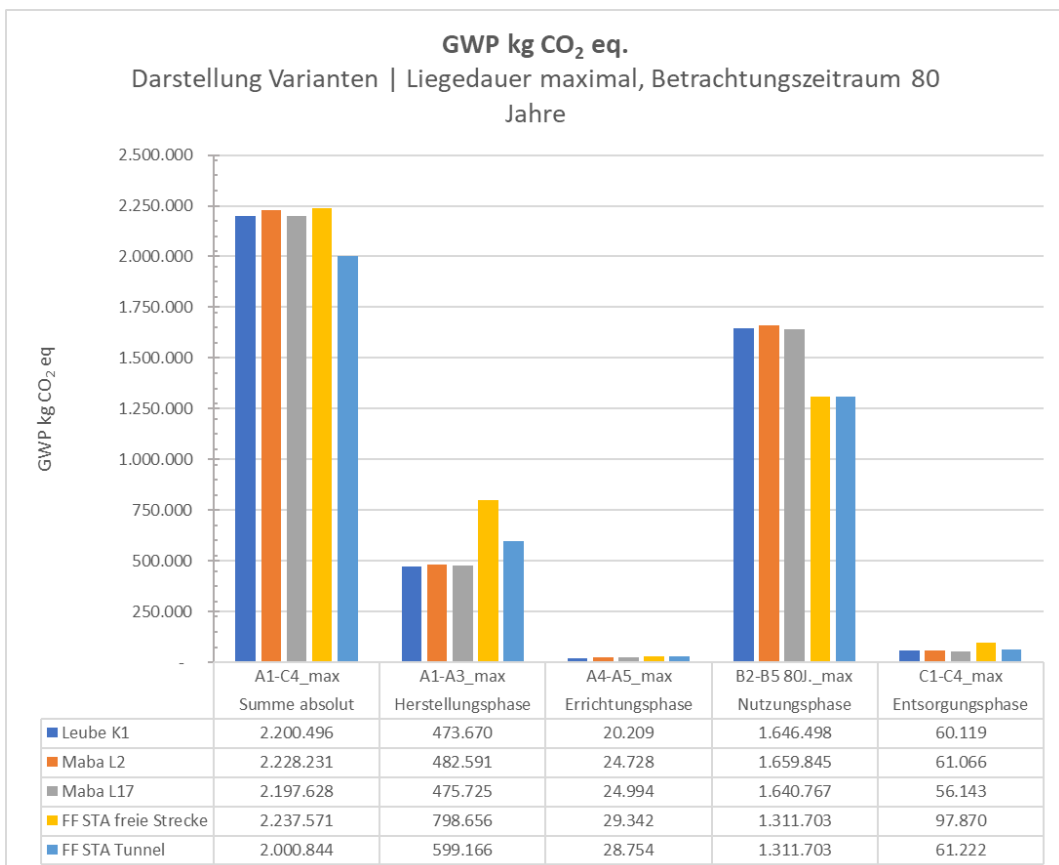


Abbildung 4-106: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, max 80J.

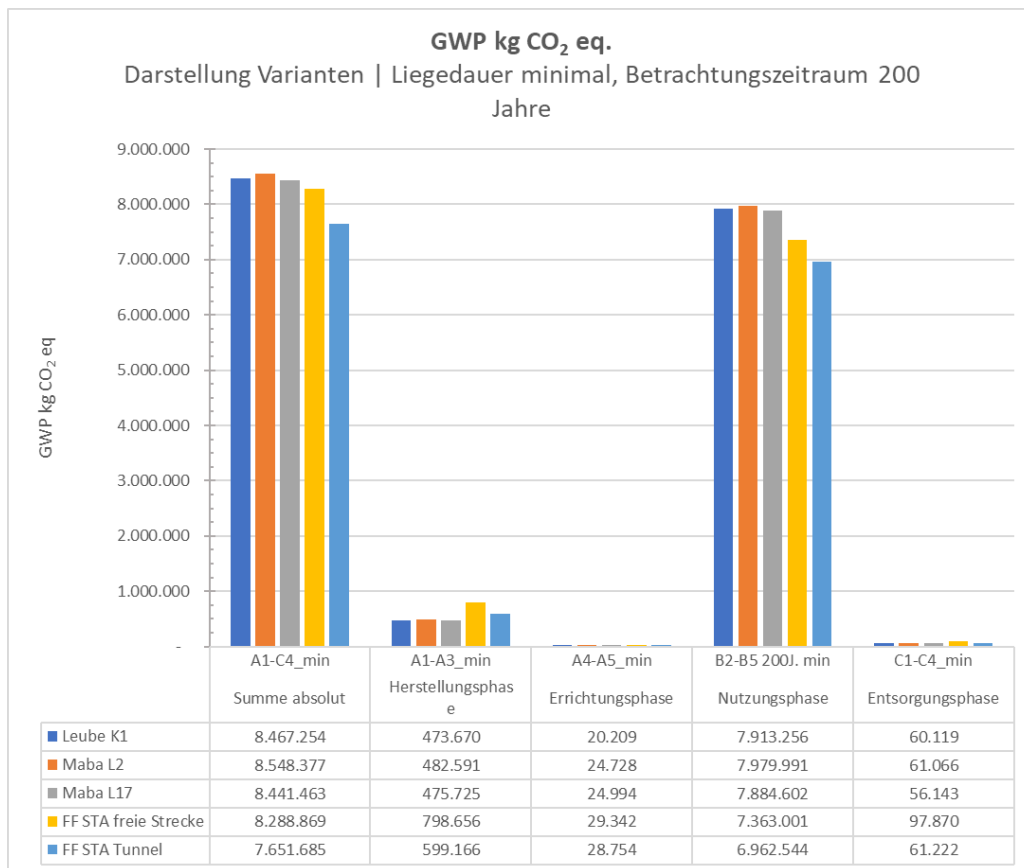


Abbildung 4-107: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, min 200J.

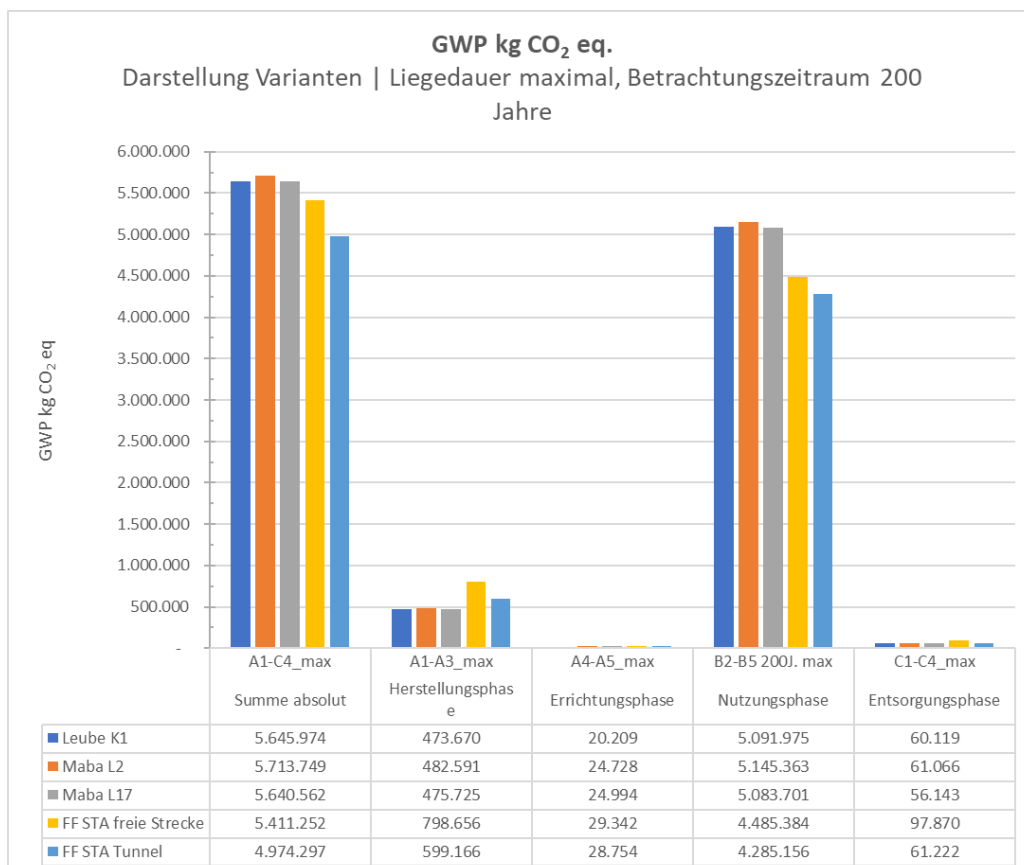


Abbildung 4-108: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, max 200J.

4.6.7.2 Oberbauten ohne Schienen

Nachfolgend wird, wie o.a., die Analyse ohne Schiene betrachtet. Die Schiene nimmt über den gesamten Lebenszyklus einen nicht unerheblichen Teil der gesamten Outputs an die Umwelt ein. Um die Beiträge der restlichen Konstruktionselemente besser gesamthaft interpretieren zu können, wird diese in dieser Betrachtung ausgeblendet.

Es ist in den nachstehenden Abbildungen auf den ersten Blick zu erkennen, dass die Gesamtsumme aller Auswirkungen um ein Vielfaches geringer ausfallen. Hierbei verdeutlichen sich nochmals die bereits mehrfach angesprochenen Unterschiede zwischen den Schotteroberbauten und der Festen Fahrbahn. Zudem ist bei der 80-Jahr-Untersuchung zu erkennen, dass von der Betonkonstruktion der FF während dieser Zeitspanne keine Beiträge zum GWP entstehen. Der oben angesprochene Optimierungsvorschlag zeigt sich hier deutlich. Die Anteile verschieben sich somit in die Herstellungsphase.

Verlängert man den begutachteten Zeitraum auf 200 Jahre (Abbildung 4-111 und Abbildung 4-112) zeigen sich auch hier die Vorteile einer langlebigen Konstruktion und dem damit verbundenen geringen Instandhaltungsaufwand.

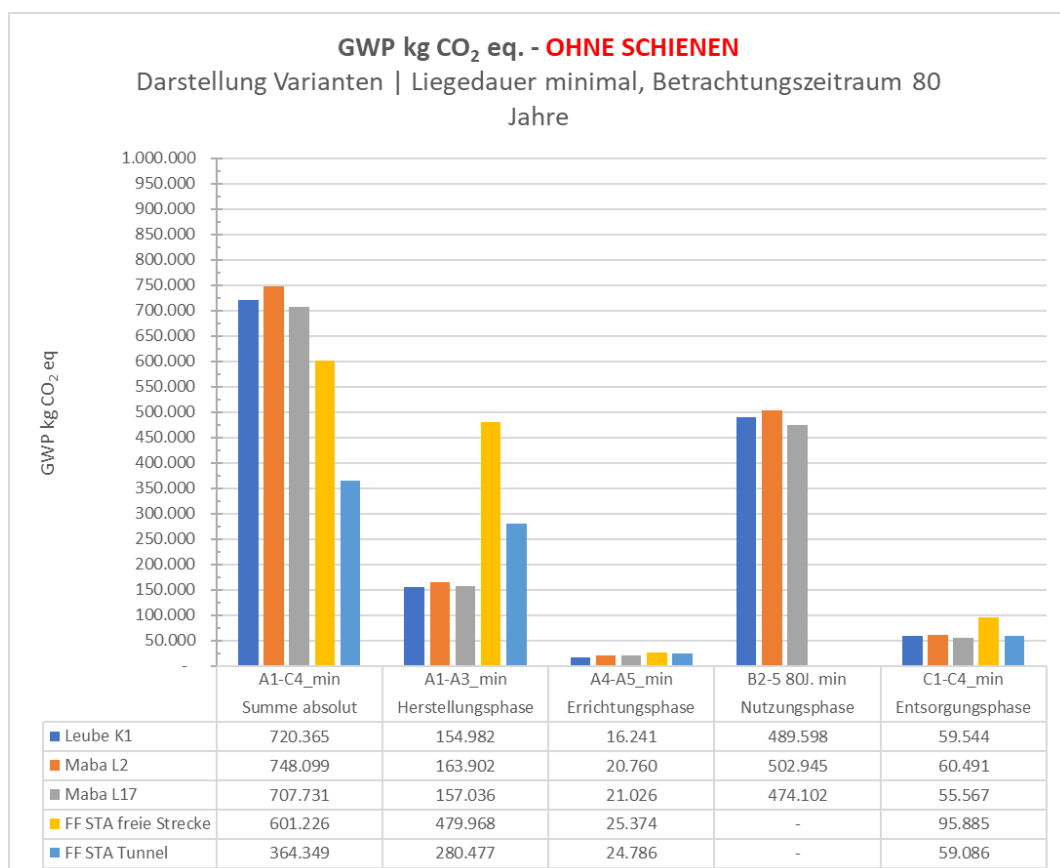


Abbildung 4-109: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, min 80J.

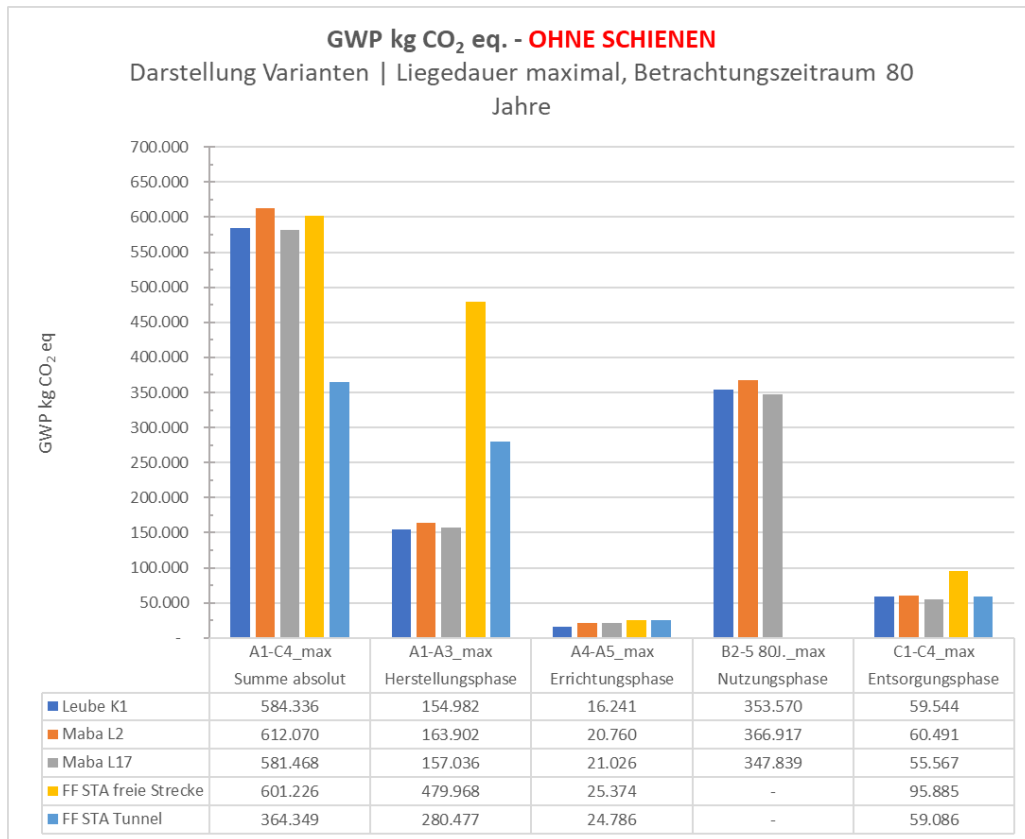


Abbildung 4-110: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, max 80J.

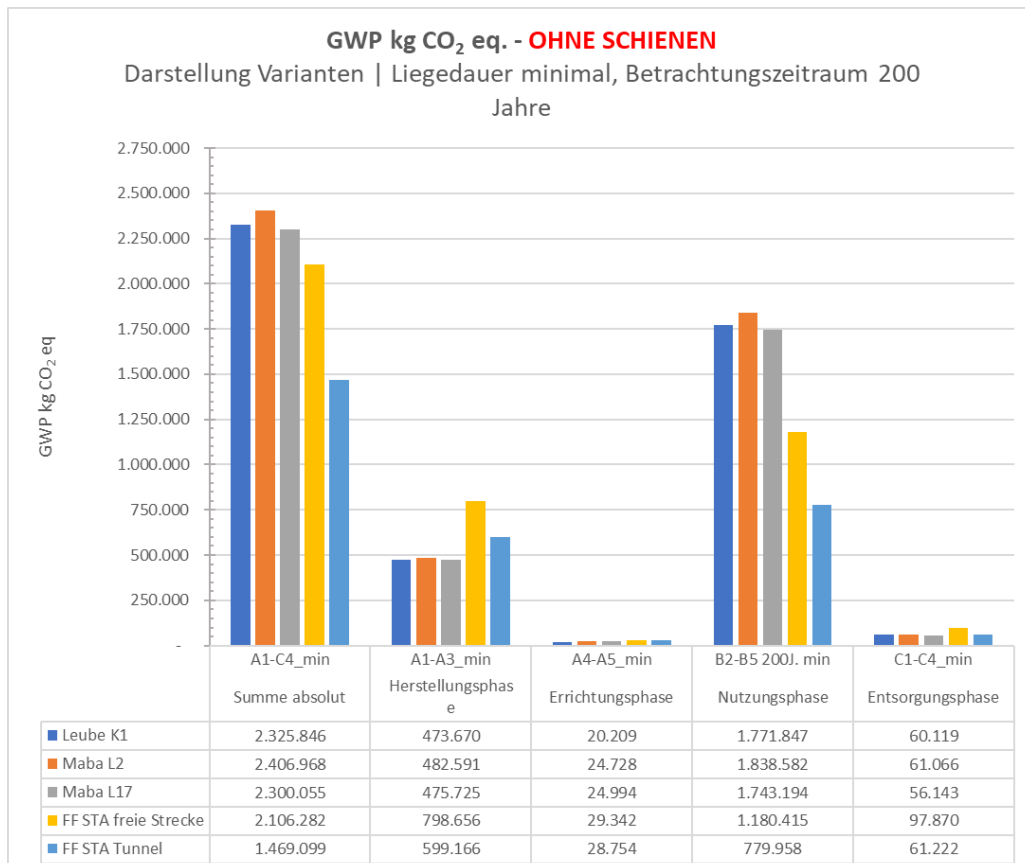


Abbildung 4-111: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, min 200J.

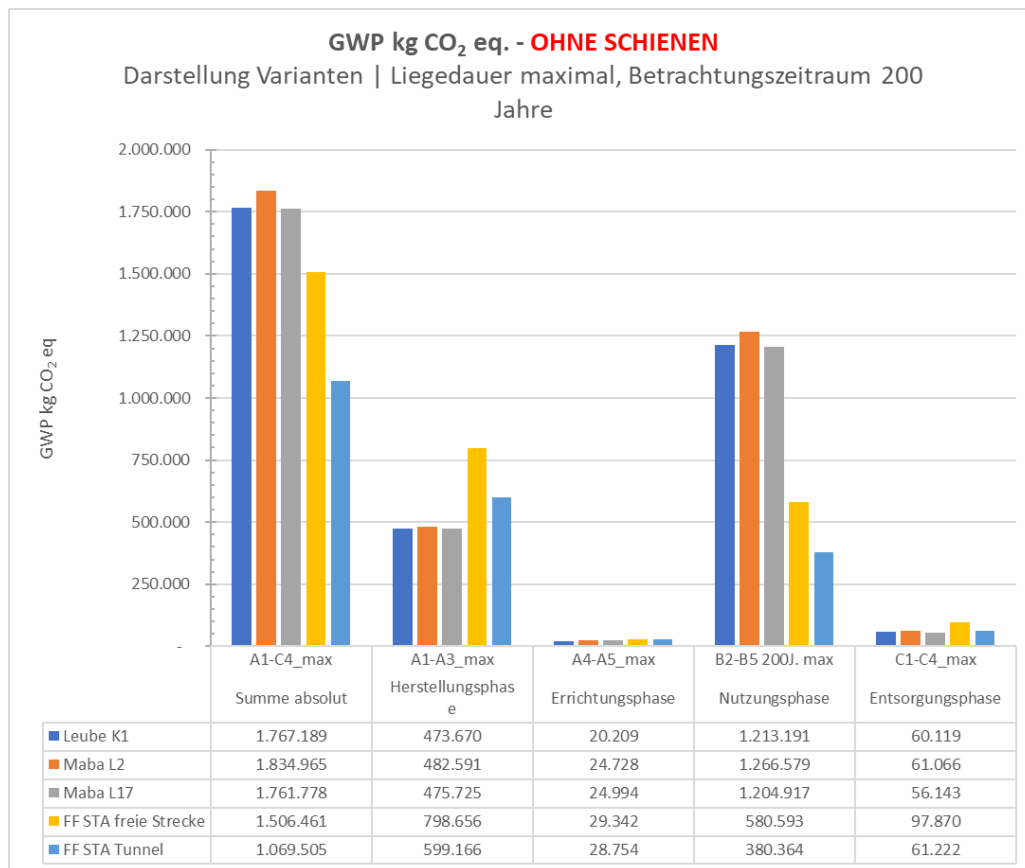


Abbildung 4-112: GWP der einzelnen Oberbauvarianten je Lebenszyklusphase, OHNE SCHIENEN, max 200J.

4.6.8 Ergebnisverifikation

Ausgehend der Ergebnisse der Masterarbeit „Ökobilanz Gleis“ von Klammbauer aus dem Jahr 2017 wurde eine Plausibilitätskontrolle der hier präsentierten Resultate durchgeführt.

Frau Klammbauer hat sich im Zuge ihrer Ökobilanzierung mit der grundsätzlichen Anwendbarkeit der Ökobilanzrechnung am Oberbau der Eisenbahn auseinandergesetzt. Hierbei wurde ebenfalls ein fiktiver Streckenkilometer einer zweigleisigen Strecke mit der Betonschwelle L2 untersucht. Die funktionelle Einheit wurde damals so definiert, dass 1 km Strecke über einen Zeitraum von einem Jahr untersucht wird. [40]

Vergleicht man die Ergebnisse der beiden Ökobilanzen, so geht hervor, dass die Umweltwirkungen dieser Untersuchung etwas höher ausfallen, jedoch in der Größenordnung nicht drastisch voneinander abweichen. Aus diesem Grund kann behauptet werden, dass die Ergebnisse der hier vorliegenden Masterarbeit bzw. Ökobilanz plausibel sind. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die Resultate stimmen.

Die Abweichungen zur Studie von Klammbauer resultieren vermutlich daraus, dass einerseits die funktionelle Einheit anders definiert wurde und sich die Betrachtung auf ein Jahr beschränkte. Durch die alleinige Betrachtung eines Jahres und der Berücksichtigung der Instandhaltung über entsprechende Faktoren ergab sich bei Klammbauer eine Betrachtung eines Lebenszyklus bspw. einer Schwelle [40]. Ein etwaiger Austausch in der Nutzungsphase fand hierbei keine Berücksichtigung [40].

Zudem geht aus der Arbeit von Klammbauer hervor, dass die Betonzusammensetzung der Schwelle L2 mit einem globalen Betonansatz und Mengenannahmen modelliert wurde [40]. Hierbei könnten ebenfalls etwaige Unschärfen liegen, da im vorliegenden Fall genaue Herstellerdaten für die Berechnung verwendet wurden.

5 Fazit

Die fortweilende Optimierung von Konstruktionen, Materialien, Bau- und Instandhaltungsprozessen stellt die Ingenieure*innen in jeglicher Hinsicht vor große Anforderungen. Eine Ingenieur*in muss alle möglichen Sichtweisen, angefangen von konstruktiven, gestalterischen und statischen Gesichtspunkten bis hin zu sozialen, ökonomischen und ökologischen Auswirkungen bei der Verbesserung von Konstruktionen und etwaigen Prozessen, in ihrer Tätigkeit vereinheitlichen und eine ideale Lösung finden. Die Ökobilanzierung beschränkt sich zwar auf die ökologische Sicht, stellt die Verbesserungsmöglichkeiten dennoch klar dar. Die vorliegende Ökobilanz an Eisenbahn-Hochleistungsinfrastrukturen zeigt, dass die komplexen Oberbausysteme verschiedenste Umweltwirkungen in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen hervorrufen. Die zentralen Erkenntnisse werden hier nochmals resümiert.

Grundlegend hat sich in den Ergebnissen herausgestellt, dass die Phasen der Herstellung und der Instandhaltung den größten Einfluss auf die Umwelt haben. Gerade die Nutzungsphase emittiert hierbei am meisten an das natürliche Umfeld. Diese Umweltwirkung geht hierbei nicht durch den Betrieb der Eisenbahn aus, sondern entsteht durch die beschränkte Lebensdauer der jeweiligen Produkte. Ist eine Lebensdauer bzw. die größtmögliche Liegedauer erreicht, bedarf es einer Auswechslung dieser Komponente. Die Zeitspanne zwischen den Instandhaltungsarbeiten bzw. Umbauten prägen die Effekte an die Umwelt, da diese immer mit Herstellungs-, Errichtungs-, Transport- und Entsorgungsvorgängen der neu einzubauenden und entfernten Komponenten des Oberbaus gekoppelt sind.

Je nach Oberbauausführung stellt sich dar, dass die prozentuellen Verteilungen der Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus einmal mehr in der Ersterstellung oder in der Nutzungsphase im Zuge von Modernisierungsprozessen anfallen. Beim Schotteroberbau ergab sich eine relativ geringe Umweltreaktion in der Herstellungsphase A1-A3, jedoch war durch das Mehr an Instandhaltungsaufwand diese in der Nutzungsphase B2-B5 höher. Beim Feste Fahrbahnssystem lagen die Outputs in der Phase A1-A3 deutlich über jenen des Schotteroberbaus, fielen dann aber in der Nutzungsphase geringer aus.

Diese Thematik wurde in der vorliegenden Untersuchung mittels minimalen und maximalen Liegedauern und verschiedenen Betrachtungszeiträumen analysiert. Es hat sich gezeigt, dass die Feste Fahrbahn auf der freien Strecke bei 80-jähriger Untersuchung in Summe ähnlich gut abschneidet wie die Schotteroberbauten. Bei Verlängerung der Dauer auf 200 Jahre fallen die Umweltwirkungen der festen Fahrbahn gar geringer aus.

Im Tunnel wurde nur ein Feste Fahrbahnssystem untersucht. Grundsätzlich kann diese Variante dennoch mit den Schotteroberbauten gegenübergestellt werden. Jedoch scheint der Einsatz der Festen Fahrbahn im Tunnel aus ökologischer Sicht absolut berechtigt und wird bei entsprechender Tunnellänge auch im ÖBB-Regelwerk dementsprechend festgelegt.

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass beide Oberbauformen ihre Berechtigung haben und die Feste Fahrbahn auf der freien Strecke rein aus ökologischer Sicht langfristig (Variante 200 Jahre) besser abschneidet, da ein geringerer Instandhaltungsaufwand nötig ist. Bei einem Betrachtungszeitraum von 80 Jahren sind die Effekte auf die Umwelt beim Schotteroberbau gar geringer. Zudem punktet der Schotteroberbau aus baubetrieblicher Sicht klar durch die einfache Herstellung und Instandhaltung. Deshalb fällt die Empfehlung für die freie Strecke für den Schotteroberbau aus. Einzig, bei reinen Hochgeschwindigkeitsstrecken ist ein Einsatz der Festen Fahrbahn für die freie Strecke sehr wohl denkbar und begründet.

Zudem müssten für einen Vergleich generell die finanziellen und betrieblichen Hintergründe mitberücksichtigt werden.

Bezugnehmend auf die Optimierung der Konstruktionen hat sich herausgestellt, dass die Produkte/ Konstruktionen aus ökologischer Sicht zukünftig längere Lebensdauern aufweisen sollten und dadurch länger im Gleiskörper verbleiben können. Dadurch soll die Anzahl der Auswechslungen/ Modernisierungen weitgehendst verringert werden und somit eine mehrfache Neuerstellung von Elementen verhindert werden. In Summe könnte sich somit die Konstruktion bei der Ersterstellung aus ökologischer Sicht verschlechtern, wenn diese später in der Nutzungsphase eine längere Liegedauer aufweist, da der Mehrwert des längeren Verbleibs im Gleiskörper klar kompensiert wird.

Die Lebenszyklusphasen der Errichtung und der Entsorgung nehmen in Hinblick auf den langen Betrachtungszeitraum nur einen marginalen Anteil an den Umweltwirkungen ein und liegen im Gesamten bei etwa 3 %. Obwohl die Summe der Effekte relativ gering ist, ist die ökologische Empfehlung, sämtliche Transporte, sofern möglich, mit der umweltfreundlichen Bahn an den Einbauort zu transportieren und somit Ressourcen zu schonen.

Auf der Komponentenebene haben sich ebenfalls ein paar Verbesserungspotentiale ergeben. Hierbei sind bspw. die Schienen zu nennen, die in der Herstellungsphase einen beträchtlichen Faktor an Umweltbelastungen einnimmt. Hierbei wären ökologische Verbesserungen in der Stahlproduktion denkbar.

Neben den Stahlschienen hat sich gezeigt, dass die Reduktion des Gleisschotters am Beispiel der Betonschwelle L17 auch einen Teil zu einer nachhaltigen gebauten Umwelt beitragen kann und in Summe etwa 8 % der Auswirkungen des gesamten Lebenszyklus eingespart werden können. Mitunter würde sich durch die Konstruktionsoptimierung einer Schwelle eine mögliche Schotterschonung ergeben, sodass als Nebeneffekt auch der Gleisschotter noch langlebiger wäre.

Bei den Betonkonstruktionen wären Optimierungen in Bezug auf den Zementgehalt bzw. Klinkeranteil denkbar, sofern dieselbe Festigkeit und Dauerhaftigkeit gewährleistet werden können.

Zusammenfassend kann behauptet werden, dass die vorliegende Untersuchung die grundlegenden Optimierungspotentiale aufzeigt und die verschiedensten Thematiken anreißt. Natürlich konnten im Zuge dieser Bearbeitung nicht alle Fragestellungen im Detail beantwortet bzw. alle möglichen relevanten Sachverhalte/ Erkenntnisse genauesten analysiert werden, da diese den Rahmen dieser Masterarbeit sprengen würden. Jedoch müssten diese Erkenntnisse zumindest in einer bzw. mehreren Folgeuntersuchungen weiters verifiziert werden. Zudem wäre eine Einbindung der monetären bzw. sozialen Auswirkungen in einer weiteren Analyse interessant, um eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsbewertung präsentieren zu können. Die soziale Komponente könnte hierbei einmal in ländlicher Umgebung und in urbanem Raum betrachtet werden.

Abschließend kann festgehalten werden, dass jegliche Änderung, welche einen Beitrag zu einer zukunftssicheren und nachhaltig gebauten Umwelt leistet, wertvoll für die zukünftigen Generationen und unseren Lebensraum ist. Die Eisenbahn als umweltfreundliches Verkehrsmittel nimmt diesbezüglich in einer nachhaltigen europäischen Verkehrsinfrastruktur bereits jetzt und in absehbarer Zukunft eine Hauptrolle ein.

6 Literaturverzeichnis

- [1] R. Frischknecht, *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [2] W. Klöpffer und B. Grahl, *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH, 2007. [Online]. Verfügbar unter: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10303941>
- [3] F. Gschösser, T. Cordes, D. Lumetzberger, A. Tautschnig und K. Bergmeister, „Railway transport systems’ contribution to sustainable development“, *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, Jg. 588, Nr. 5, S. 52024, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/588/5/052024.
- [4] United Nations, *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. [Online]. Verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/goals> (Zugriff am: 17. Februar 2022).
- [5] Beobachtungsstelle Brenner Basistunnel, *Der Brenner Basistunnel: Die längste unterirdische Eisenbahnverbindung der Welt*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bbtinfo.eu/brenner-basistunnel/> (Zugriff am: 17. Februar 2022).
- [6] Europäisches Parlament, *Transeuropäische Netze - Leitlinien*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/de/sheet/135/transeuropaische-netze-leitlinien> (Zugriff am: 17. Februar 2022).
- [7] Industrie- und Handelskammer (IHK) Ulm, *Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ulm.ihk24.de/international/kompetenzzentrum/transeuropaische-verkehrsnetze-ten-v--3473674> (Zugriff am: 17. Februar 2022).
- [8] Martin Randelhoff, *Geschichte der Eisenbahn - Teil 1: Anfang 17. Jahrhundert - 1835*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/1674/vergangenheit-verkehrsgeschichte/geschichte-der-eisenbahn-teil-i-anfang-17-jahrhundert-1835/> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [9] Martin Randelhoff, *Geschichte der Eisenbahn - Teil 2: 1835-1915*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zukunft-mobilitaet.net/1688/vergangenheit-verkehrsgeschichte/geschichte-der-eisenbahn-1835-1915/> (Zugriff am: 4. Januar 2021).
- [10] C. M. Merki, *Verkehrsgeschichte und Mobilität*, 1. Aufl. Stuttgart: Ulmer, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.utb-studi-e-book.de/9783838530253>
- [11] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Prager, „Güterverkehr: Studienblätter zur Vorlesung“, Universität Innsbruck, 2021.
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, *Transeuropäische Verkehrsnetze (TEN-V)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmk.gv.at/themen/verkehrsplanung.html> (Zugriff am: 22. Oktober 2020).

- [13] Umwelt Bundesamt, *Emissionsdaten*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/emissionsdaten#treibhausgas-emissionen-im-personenverkehr-grafik> (Zugriff am: 29. Oktober 2020).
- [14] VCÖ - Mobilität mit Zukunft, *Klima-Emissionen der Verkehrsmittel im Vergleich: Wie viel CO2 verursachen die verschiedenen Verkehrsmittel im Vergleich?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vcoe.at/service/fragen-und-antworten/klima-emissionen-der-verkehrsmittel-im-vergleich> (Zugriff am: 29. Oktober 2020).
- [15] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Prager, „Hochleistungsbahnen: Studienblätter zur Vorlesung“, Universität Innsbruck, 2021.
- [16] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Prager, „Infrastruktur Schiene: Studienblätter zur Vorlesung“, Universität Innsbruck, 2021.
- [17] Corbat Holding, „Geschichte und Entwicklung der Holzschwelle“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bahnschwellen-holz.ch/files/4/Holzschwelle-Geschichte_und_Entwicklung.pdf
- [18] Deutsche Bahn AG und Markus Kehnen, *Bauarbeiten auf der SFS Mannheim-Stuttgart*. [Online]. Verfügbar unter: www.mediaportal.deutschebahn.com.
- [19] Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Günter Prager, „Eisenbahnbau: Studienblätter zur Vorlesung“, Universität Innsbruck, 2020.
- [20] ÖBB und Hanno Thurnher, *Schnellumbauzug SUZ 14, St. Margrethen Lustenau Rheinbrücke*. [Online]. Verfügbar unter: www.presse.oebb.at (Zugriff am: 29. März 2022).
- [21] *Schotteroberbau - Gleise: Planung und konstruktive Ausführung*, 07.02.01, ÖBB Infra, Nov. 2020.
- [22] E. Darr und W. Fiebig, *Feste Fahrbahn: Konstruktion und Bauarten für Eisenbahn und Straßenbahn*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjajqDmkP_2AhWS2qQKHdQ2BrsQFnoECEUQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.pmc-media.com%2Fmedia%2Fpdf%2F4c%2F35%2F3f%2F978-3-96245-035-9_Feste_Fahrbahn_Leseprobe5979c637a6a9f.pdf&usg=AOvVaw3f9hjRRCoJwmkoZ-3uJZur (Zugriff am: 6. April 2022).
- [23] DB Netze AG, *System ÖBB-Porr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde8.de/de/vde-82-neubau/feste-fahrbahn-oebb-porr> (Zugriff am: 6. April 2022).
- [24] J. Huss und F. Von Gadow, *Einführung in das Faksimile der Erstausgabe Sylvicultura Oeconomica von H. C. von Carlowitz 1713: Hauswirthliche Nachricht und Naturgemäße Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.forstbuch.de/wp-content/uploads/2018/04/Carlowitz_1713_Einleitung.pdf (Zugriff am: 8. April 2022).
- [25] S. C. Schulz, „Drei Säulen der Nachhaltigkeit: Ökologie, Wirtschaft und Soziales“, *Utopia*, 28. Jan. 2022, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://utopia.de/ratgeber/drei-saeulen-der-nachhaltigkeit-modell/>. Zugriff am: 8. April 2022.

- [26] S. Friedrichsen, *Nachhaltiges Planen, Bauen und Wohnen: Kriterien für Neubau und Bauen im Bestand*, 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.springer.com/>
- [27] *ÖNORM EN 15978-1: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*, 15978-1, Austrian Standard International.
- [28] P. Indinger, „Nachhaltiges Bauen: Die grüne Revolution“, *Redshift*, 13. Mai 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://redshift.autodesk.de/nachhaltiges-bauen/>. Zugriff am: 12. April 2022.
- [29] IBU - Institut Bauen und Umwelt e.V., *Nachhaltiges Bauen | Nachhaltigkeit im Bauwesen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ibu-epd.com/nachhaltiges-bauen/> (Zugriff am: 12. April 2022).
- [30] Austrian Standard International, *Building Information Modeling (BIM)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.austrian-standards.at/de/themengebiete/bau-immobilien/building-information-modeling/alles-zu-bim> (Zugriff am: 12. April 2022).
- [31] Autodesk GmbH, *Was ist BIM? | Building Information Modeling*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autodesk.de/solutions/bim> (Zugriff am: 12. April 2022).
- [32] NGS Global, *Infrastruktur und Nachhaltigkeit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ngs-global.com/index.php/de/expertise/branchen/infrastruktur-und-nachhaltigkeit?dt=1649763540427> (Zugriff am: 12. April 2022).
- [33] S. Langsdorf, M. Hinzmann, A. Araujo, M. Hirschnitz-Garbers und I. Merbold, „Transformation hin zu nachhaltigen, resilienten Infrastrukturen (TRAFIS II)“, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ecologic.eu/de/17171>
- [34] T. Zinke, „Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken“. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften; Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- [35] CEN CENELEC Management Centre, *Welcome to CEN - European Committee for Standardization*. [Online]. Verfügbar unter: <https://standards.cen.eu/index.html> (Zugriff am: 23. Dezember 2020).
- [36] CEN CENELEC Management Centre, *CEN-Technical Bodies - CEN/TC 350: Sustainability of construction works*. [Online]. Verfügbar unter: https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:7:0:::FSP_ORG_ID:481830&cs=181BD0E0E925FA84EC4B8BCCC284577F8 (Zugriff am: 23. Dezember 2020).
- [37] *ÖNORM EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken*, 15643, Austrian Standard International.
- [38] *ÖNORM EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen*, 14040, Austrian Standard International.
- [39] *ÖNORM EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*, 14044, Austrian Standard International.
- [40] Lena Klammbauer, „Ökobilanz Gleis“. Masterarbeit, TU Graz, Graz, 2017.

- [41] Leube Betonschwellen GmbH, „Produktdatenblatt Schwelle K1“. [Online]. Verfügbar unter:
https://www.leube.eu/fileadmin/user_upload/downloads/betonschwellen/produktdatenblatt_a%CC%88tter/produktdatenblatt_leube_schwelle_k1.pdf
- [42] Kirchdorfer Concrete Solutions, *Streckenschwellen - Produktdatenblatt Betonschwelle L2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.concrete-solutions.eu/pog3/streckenschwellen/> (Zugriff am: 12. Mai 2022).
- [43] *Regelzeichnung RZ 17208/11: Schwelle L2*, ÖBB Infra.
- [44] Gerhard Rinnhofer, "Betonschwellen Maba", Jan. 2022.
- [45] Roland Fischer ÖBB, "Betonschwelle L17", Jan. 2022.
- [46] Porr Technobau und Umwelt AG, „Feste Fahrbahn: System ÖBB-Porr Elastisch gelagerte Gleistragplatte“, *DocPlayer*, 5. Aug. 2016, 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/amp/20771619-Feste-fahrbahn-system-oebb-porr-elastisch-gelagerte-gleistragplatte.html>. Zugriff am: 12. Mai 2022.
- [47] voestalpine Schienen GmbH, „Schiene 60E1“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/argentina/app/uploads/sites/23/2019/02/voestalpine-60E1.pdf>
- [48] Vossloh AG, *System W 14*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vossloh.com/de/produkte-und-loesungen/produktfinder/produkt_11018.php (Zugriff am: 12. Mai 2022).
- [49] Vossloh AG, *System 300*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.vossloh.com/de/produkte-und-loesungen/produktfinder/produkt_9996.php (Zugriff am: 12. Mai 2022).
- [50] Getzner Werkstoffe GmbH, *Schwellensohlen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.getzner.com/de/produkte/bahn/schwellensohlen> (Zugriff am: 12. Mai 2022).
- [51] GALLERIA DI BASE DEL BRENNERO - BRENNER BASISTUNNEL BBT SE, *Regelprofil Haupttunnel*.
- [52] Roland Fischer ÖBB, "Feste Fahrbahn", Mrz. 2022.
- [53] *Regelzeichnung RZ 6958/11: Schwellenschraube Ss 33*, ÖBB Infra.
- [54] *Regelzeichnung RZ 6964_06_01: Spannklemme Skl 14*, ÖBB Infra.
- [55] *Regelzeichnung RZ 17206/5: Winkelführungsplatte Wfp 14*, ÖBB Infra.
- [56] *Schotteroberbau - Gleise: Schienenbefestigung - Kleineisen*, 07.02.05, ÖBB Infra, Mai. 2016.
- [57] Getzner Werkstoffe GmbH, *Sylodyn*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.getzner.com/de/produkte/sylodyn> (Zugriff am: 13. Mai 2022).
- [58] Heimo Berger, "Betonschwellen Leube", Jan. 2022.
- [59] *ÖNORM EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, 15804, Austrian Standard International. [Online]. Verfügbar unter: https://lesesaal.austrian-standards.at/action/de/private/details/671384/OENORM_EN_15804_2020_02_15

- [60] voestalpine AG, *voestalpine Wire technology*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.voestalpine.com/wiretechnology/de/> (Zugriff am: 15. Mai 2022).
- [61] *Streckenquerschnitte*, 01.05, ÖBB Infra, Jan. 2020.
- [62] Kieskaufen.at, *Gleisschotter 32/63*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kieskaufen.at/shop/menge-rechner.asp?groupid=25&productid=1012> (Zugriff am: 15. Mai 2022).
- [63] *Feste Fahrbahn*, 07.05.01, ÖBB Infra, Sep. 2018.
- [64] Wirtschaftskammer Österreich, „Argumentarium Pro Diesel“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wko.at/branchen/k/handel/fahrzeughandel/Argumentarium-DIESEL-final-31-5-2017.pdf>
- [65] Strabag Rail GmbH, *Strabag Rail Machines*. [Online]. Verfügbar unter: <https://docplayer.org/175157917-Machines-strabag-rail-gmbh.html> (Zugriff am: 11. Mai 2022).
- [66] Liebherr, *Autobetonpumpen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/betontechnik/betonpumpen/aut-obetonpumpen/autobetonpumpen.html> (Zugriff am: 29. Mai 2022).
- [67] Liebherr, *Fahrmischer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/betontechnik/fahrmischer/fahrmischer-htm/fahrmischer-htm.html> (Zugriff am: 29. Mai 2022).
- [68] Liebherr, *Raupenbagger / Kettenbagger*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.liebherr.com/de/aut/produkte/baumaschinen/erdbewegung/raupenbagger/raupenbagger.html> (Zugriff am: 29. Mai 2022).
- [69] ETC Miettrucks, *Kippsattelzug komplett 40t Hydrodrive*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.miettrucks.de/vermietung/kippsattelzug-komplett-40t-hydrodrive/> (Zugriff am: 29. Mai 2022).
- [70] Plasser & Theurer, *Machine - Technologie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plassertheurer.com/de/machine/technologie/uebersicht> (Zugriff am: 29. Mai 2022).
- [71] Swietelsky AG, *Bahnbau*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.swietelsky.at/bahnbau/> (Zugriff am: 16. Mai 2022).
- [72] V. Kumar, D. Ranjan und K. Verma, *Global climate change*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/global-warming-potential>
- [73] Dr. Niels Jungbluth, *Bewertungsmethoden in der Ökobilanzierung*. [Online]. Verfügbar unter: <http://esu-services.ch/fileadmin/download/tender/ESU-Beschreibung-Bewertungsmethoden.pdf> (Zugriff am: 28. April 2021).
- [74] D. Jepsen, E. Schönheit, S. Volz, O. Dr. Wirth und T. Zimmermann, „A1.2 Versauerung von Ökosystemen: Grundlagen, Ausgewählte Umweltwirkungsbereiche“, *ECO DESIGN KIT*. [Online]. Verfügbar unter:

https://www.ecodesignkit.de/fileadmin/user_upload/Dateien/PDFs_Themenpapiere/EcodesignKit_A1_2_Versauerung_von_Oekosystemen.pdf

- [75] Sarah Brockhaus, *Bodenversauerung: Ursachen und Folgen des sauren Bodens*. [Online]. Verfügbar unter: <https://utopia.de/ratgeber/bodenversauerung-ursachen-und-folgen-des-sauren-bodens/> (Zugriff am: 28. April 2021).
- [76] J. Seppälä, M. Posch, M. Johansson und J.-P. Hettelingh, „Country-dependent Characterisation Factors for Acidification and Terrestrial Eutrophication Based on Accumulated Exceedance as an Impact Category Indicator (14 pp)“ (En;en), *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 11, Nr. 6, S. 403–416, 2006, doi: 10.1065/lca2005.06.215.
- [77] M. Posch, J. Seppälä, J.-P. Hettelingh, M. Johansson, M. Margni und O. Jolliet, „The role of atmospheric dispersion models and ecosystem sensitivity in the determination of characterisation factors for acidifying and eutrophying emissions in LCIA“ (En;en), *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 13, Nr. 6, S. 477–486, 2008, doi: 10.1007/s11367-008-0025-9.
- [78] R. Arvidsson und M. Svanström, „A framework for energy use indicators and their reporting in life cycle assessment“ (eng), *Integrated Environmental Assessment and Management*, Jg. 12, Nr. 3, S. 429–436, 2016, doi: 10.1002/ieam.1735.

7 Anhang

Nachfolgend werden die verwendeten Sachbilanzdaten detailliert aufgelistet.

| Beschreibung | Menge | EH | Bemerkung | Quelle |
|---|----------------|----|--|--|
| Beton C50/60 | 1 kg | | Schwelle K1, Zusammensetzung vertraulich | [41, 58] |
| Beton C60/75 | 1 kg | | Schwelle L2 & L17, Zusammensetzung vertraulich | [42, 44] |
| Beton C30/37 | 1 kg | | STA ÖBB-PORR, Zusammensetzung vertraulich | Porrbau GmbH |
| Beton C25/30 | 1 kg | | Vergussbeton, Lastverteilerplatte, Zusammensetzung vertraulich | Porrbau GmbH |
| elastische Trennschicht | 1 kg | | Material vertraulich | Porrbau GmbH |
| Schienen | 1 kg | | aus EPD von 2019 | voestalpine Rail technology GmbH |
| market for diesel, burned in building machine GLO | 1 kg | | Dieserverbrauch durch Baumaschinen etc. | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| *Diesel {AT} market for Cut-off, U | 1 kg | | | |
| Emissions to air | | | | |
| Particulates, unspecified | 0,3 g | | | |
| Nitrogen oxides, AT | 20 g | | | |
| *Gravel, crushed {AT} market for gravel, crushed Cut-off, U | 1 kg | | Gleisschotter | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| *Gravel, crushed {AT} production Cut-off, U | 1 kg | | | |
| *Transport, freight train {AT} processing Cut-off, U | 0,00372 tkm | | | |
| *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U | 0,02026 tkm | | | |
| *Inert waste, for final disposal {AT} market for inert waste, for final disposal Cut-off, U | 1 kg | | Deponierung von Stoffen | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| *Transport, freight train {AT} processing Cut-off, U | 0,0036 tkm | | | |
| *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U | 0,0258 tkm | | | |
| Waste to treatment | | | | |
| Inert waste, for final disposal {CH} treatment of inert waste, inert material landfill Cut-off, U | 1 kg | | | |
| *Polyurethane, rigid foam {RER} market for polyurethane, rigid foam Cut-off, U | 1 kg | | Zwischenlagen/Besohlung, Annahme: Dichte = 1200kg/m³ | ecoinvent, [40] |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Polyurethane, rigid foam {RER} production Cut-off, U | 1 kg | | | |
| Transport, freight train {RER} market group for transport, freight train Cut-off, U | 0,0438 tkm | | | |
| Transport, freight, inland waterways, barge {RER} market for transport, freight, inland waterways, barge Cut-off, U | 0,0219 tkm | | | |
| Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U | 0,1713 tkm | | | |
| *Scrap steel {Europe without Switzerland} treatment of scrap steel, inert material landfill Cut-off, U | 1 kg | | Stahlschrott | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Inert material landfill {GLO} market for Cut-off, U | 1,48E-09 p | | | |
| Process-specific burdens, inert material landfill {RoW} market for process-specific burdens, inert material landfill Cut-off, U | 1 kg | | | |
| *Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U | 1 kg | | Stahl für Befestigung | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Steel, low-alloyed, hot rolled {RER} production Cut-off, U | 0,210186728 kg | | | |
| Steel, low-alloyed, hot rolled {RoW} production Cut-off, U | 0,789813272 kg | | | |
| *Transport, freight train {AT} processing Cut-off, U | 1 tkm | | Transport per Bahn, angepasst auf Österreich | ecoinvent |

| | | | | |
|---|-------------|-------|-------------------|-----------|
| | | | | |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Diesel {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 0,0013856 | kg | | |
| Goods wagon {GLO} market for Cut-off, U | 4,59E-08 | p | | |
| Locomotive {GLO} market for Cut-off, U | 7,11E-10 | p | | |
| Maintenance, goods wagon {RER} processing Cut-off, U | 4,59E-08 | p | | |
| Maintenance, locomotive {RER} processing Cut-off, U | 7,11E-10 | p | | |
| Railway track {GLO} market for Cut-off, U | 0,000086325 | my | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Electricity, high voltage {AT} market for Cut-off, U | 0,06224 | kWh | | |
| Emissions to air | | | | |
| Ammonia | 2,7631E-08 | kg | | |
| Benzene | 1,3856E-07 | kg | | |
| Cadmium | 1,3856E-11 | kg | | |
| Carbon dioxide, fossil | 0,0043596 | kg | | |
| Carbon monoxide, fossil | 0,0000219 | kg | | |
| Chromium | 6,9385E-11 | kg | | |
| Copper | 2,3538E-09 | kg | | |
| Dinitrogen monoxide | 1,3856E-07 | kg | | |
| Lead | 1,5248E-13 | kg | | |
| Mercury | 2,7631E-14 | kg | | |
| Methane, fossil | 1,8011E-07 | kg | | |
| Nickel | 9,7016E-11 | kg | | |
| Nitrogen oxides | 0,000076139 | kg | | |
| NMVOc, non-methane volatile organic compounds | 7,0203E-06 | kg | | |
| Particulates, < 2,5 um | 1,7777E-06 | kg | | |
| Particulates, > 10 um | 0,00001584 | kg | | |
| Particulates, > 2,5 um, and < 10um | 6,9451E-06 | kg | | |
| Selenium | 1,3856E-11 | kg | | |
| Sulfur dioxide | 8,3098E-07 | kg | | |
| Sulfur hexafluoride | 2,7386E-09 | kg | | |
| Toluene | 5,5467E-08 | kg | | |
| Xylene | 5,5467E-08 | kg | | |
| Zinc | 1,3856E-09 | kg | | |
| Emissions to soil | | | | |
| Iron | 0,000017786 | kg | | |
| | | | | |
| *Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 {RER} transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 Cut-off, U | | 1 tkm | Transport per LKW | ecoinvent |
| | | | | |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Diesel, low-sulfur {RER} market group for Cut-off, U | 0,036646054 | kg | | |
| Lorry, 16 metric ton {RER} market for lorry, 16 metric ton Cut-off, U | 0,00000032 | p | | |
| Maintenance, lorry 16 metric ton {RER} market for maintenance, lorry 16 metric ton Cut-off, U | 0,00000032 | p | | |
| Road {GLO} market for Cut-off, U | 0,00105 | my | | |
| Road maintenance {RER} market for road maintenance Cut-off, U | 0,000223185 | my | | |
| Emissions to air | | | | |
| Acetaldehyde | 1,50635E-07 | kg | | |
| Acrolein | 5,83423E-08 | kg | | |
| Ammonia | 5,18457E-07 | kg | | |
| Arsenic | 3,66461E-12 | kg | | |
| Benzaldehyde | 4,51576E-08 | kg | | |
| Benzene | 2,30732E-09 | kg | | |
| Butane | 4,94426E-09 | kg | | |
| Cadmium | 3,18821E-10 | kg | | |
| Carbon dioxide, fossil | 0,114797235 | kg | | |
| Carbon monoxide, fossil | 0,000112649 | kg | | |
| Chromium | 1,09938E-09 | kg | | |
| Chromium VI | 2,19876E-12 | kg | | |
| Copper | 7,76896E-10 | kg | | |
| Dinitrogen monoxide | 6,13869E-06 | kg | | |
| Ethane | 9,88852E-10 | kg | | |
| Formaldehyde | 2,76879E-07 | kg | | |
| Heptane | 9,88852E-09 | kg | | |
| Lead | 1,90926E-09 | kg | | |
| m-Xylene | 3,23025E-08 | kg | | |
| Mercury | 1,94224E-10 | kg | | |
| Methane, fossil | 8,10535E-08 | kg | | |
| Nickel | 3,22485E-10 | kg | | |
| Nitrogen oxides | 5,22432E-05 | kg | | |
| NMVOc, non-methane volatile organic compounds | 2,67748E-06 | kg | | |
| o-Xylene | 1,31847E-08 | kg | | |
| PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons | 2,86572E-09 | kg | | |
| Particulates, < 2,5 um | 4,941E-07 | kg | | |
| Pentane | 1,9777E-09 | kg | | |
| Propane | 3,29617E-09 | kg | | |
| Selenium | 3,66461E-12 | kg | | |
| Styrene | 1,84586E-08 | kg | | |
| Sulfur dioxide | 5,66668E-07 | kg | | |
| Toluene | 3,29617E-10 | kg | | |
| Zinc | 6,36908E-08 | kg | | |

| | | | | |
|---|-------------|-----|-------------------------------------|-----------|
| Waste to treatment | | | | |
| Brake wear emissions, lorry {GLO} market for Cut-off, U | 2,21658E-05 | kg | | |
| Road wear emissions, lorry {GLO} market for Cut-off, U | 1,9085E-05 | kg | | |
| | | | | |
| Tyre wear emissions, lorry {GLO} market for Cut-off, U | 0,000219614 | kg | | |
| | | | | |
| *Waste polyurethane {Europe without Switzerland} treatment of waste polyurethane, municipal incineration Cut-off, U | 1 | kg | Verbrennung Zwischenlagen/Besohlung | ecoinvent |
| | | | | |
| Avoided products | | | | |
| Resources | | | | |
| Oxygen, in air | 2,5269 | kg | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Ammonia, anhydrous, liquid {RER} market for ammonia, anhydrous, liquid Cut-off, U | 0,0074043 | kg | | |
| Cement, unspecified {Europe without Switzerland} market for cement, unspecified Cut-off, U | 0,0070918 | kg | | |
| Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U | 0,00075645 | kg | | |
| Chemical, organic {GLO} market for Cut-off, U | 0,000035906 | kg | | |
| Chromium oxide, flakes {GLO} market for Cut-off, U | 9,4673E-06 | kg | | |
| Heat, district or industrial, natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, district or industrial, natural gas Cut-off, U | 1,3846 | MJ | | |
| Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER} market for Cut-off, U | 0,00019883 | kg | | |
| Iron (III) chloride, without water, in 40% solution state {GLO} market for Cut-off, U | 0,00009823 | kg | | |
| Municipal waste incineration facility {RoW} market for municipal waste incineration facility Cut-off, U | 2,5E-10 | p | | |
| Process-specific burdens, residual material landfill {Europe without Switzerland} market for process-specific burdens, residual material landfill Cut-off, U | 0,017729 | kg | | |
| Process-specific burdens, slag landfill {Europe without Switzerland} market for process-specific burdens, slag landfill Cut-off, U | 0,023029 | kg | | |
| Quicklime, milled, packed {GLO} market for Cut-off, U | 0,013097 | kg | | |
| Residual material landfill {RoW} market for residual material landfill Cut-off, U | 3,6936E-11 | p | | |
| Slag landfill {RoW} market for slag landfill Cut-off, U | 4,094E-11 | p | | |
| Sodium hydroxide, without water, in 50% solution state {GLO} market for Cut-off, U | 0,0025736 | kg | | |
| Titanium dioxide {RER} market for Cut-off, U | 0,0004639 | kg | | |
| Transport, freight, lorry, unspecified {GLO} market for Cut-off, U | 0,0016303 | tkm | | |
| Water, decarbonised, at user {GLO} market for Cut-off, U | 4,8232 | kg | | |
| Emissions to air | | | | |
| Aluminium | 1,6524E-10 | kg | high. pop. | |
| Ammonia | 8,7056E-06 | kg | high. pop. | |
| Antimony | 3,4878E-11 | kg | high. pop. | |
| Arsenic | 1,5082E-08 | kg | high. pop. | |
| Barium | 7,4179E-07 | kg | high. pop. | |
| Benzene | 1,725E-08 | kg | high. pop. | |
| Benzene, hexachloro- | 3,607E-11 | kg | high. pop. | |
| Benzene, pentachloro- | 9,1139E-11 | kg | high. pop. | |
| Benzo(a)pyrene | 3,8388E-13 | kg | high. pop. | |
| Bromine | 3,5431E-08 | kg | high. pop. | |
| Cadmium | 4,1949E-08 | kg | high. pop. | |
| Carbon dioxide, fossil | 2,335 | kg | high. pop. | |
| Carbon monoxide, fossil | 0,000029324 | kg | high. pop. | |
| Chromium | 3,616E-08 | kg | high. pop. | |
| Cobalt | 5,8218E-08 | kg | high. pop. | |
| Copper | 2,9482E-08 | kg | high. pop. | |
| Cyanide | 0,00019521 | kg | high. pop. | |
| Dinitrogen monoxide | 0,00090863 | kg | high. pop. | |
| Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p- | 3,4498E-14 | kg | high. pop. | |
| Heat, waste | 22,69 | MJ | high. pop. | |
| Hydrogen chloride | 0,000013906 | kg | high. pop. | |
| Hydrogen fluoride | 1,005E-07 | kg | high. pop. | |
| Iron | 6,766E-09 | kg | high. pop. | |
| Lead | 3,8991E-08 | kg | high. pop. | |
| Manganese | 1,5466E-08 | kg | high. pop. | |
| Mercury | 2,4397E-08 | kg | high. pop. | |
| Methane, fossil | 2,5876E-07 | kg | high. pop. | |
| Nickel | 2,6222E-08 | kg | high. pop. | |
| Nitrogen oxides | 0,0027568 | kg | high. pop. | |
| NMVOC, non-methane volatile organic compounds | 7,8506E-07 | kg | high. pop. | |
| Particulates, < 2.5 um | 2,0596E-06 | kg | high. pop. | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 1,0349E-08 | kg | high. pop. | |
| Phenol, pentachloro- | 7,5123E-12 | kg | high. pop. | |
| Selenium | 2,5387E-08 | kg | high. pop. | |
| Sodium | 0,000012192 | kg | high. pop. | |
| Strontium | 8,968E-09 | kg | high. pop. | |
| Sulfur dioxide | 2,1596E-06 | kg | high. pop. | |
| Thallium | 4,0534E-10 | kg | high. pop. | |
| Tin | 1,7346E-11 | kg | high. pop. | |
| Titanium | 8,4072E-07 | kg | high. pop. | |
| Toluene | 3,4501E-08 | kg | high. pop. | |

| | | | | |
|--|-------------|----|------------------------|-----------|
| Vanadium | 6,1929E-06 | kg | high. pop. | |
| Water/m3 | 0,0015869 | m3 | high. pop. | |
| Zinc | 3,7973E-07 | kg | high. pop. | |
| Emissions to water | | | | |
| Aluminium | 0,00014656 | kg | groundwater, long-term | |
| Aluminium | 2,1933E-08 | kg | river | |
| Antimony | 0,000015007 | kg | river | |
| Antimony | 0,000027688 | kg | groundwater, long-term | |
| Arsenic | 5,7655E-07 | kg | groundwater, long-term | |
| Arsenic | 1,3337E-06 | kg | river | |
| Barium | 2,5436E-08 | kg | river | |
| Barium | 0,000095178 | kg | groundwater, long-term | |
| Beryllium | 4,6306E-07 | kg | groundwater, long-term | |
| Beryllium | 3,1734E-10 | kg | river | |
| BOD5 (Biological Oxygen Demand) | 0,0015738 | kg | groundwater, long-term | |
| BOD5 (Biological Oxygen Demand) | 0,00073985 | kg | river | |
| Bromine | 6,8369E-06 | kg | groundwater, long-term | |
| Bromine | 0,000064061 | kg | river | |
| Cadmium | 6,0055E-06 | kg | groundwater, long-term | |
| Cadmium | 7,8881E-09 | kg | river | |
| Chloride | 0,018708 | kg | river | |
| Chloride | 0,0056469 | kg | groundwater, long-term | |
| Chromium | 3,2154E-09 | kg | river | |
| Chromium VI | 1,1573E-06 | kg | river | |
| Chromium VI | 3,7987E-06 | kg | groundwater, long-term | |
| Cobalt | 0,000026076 | kg | groundwater, long-term | |
| Cobalt | 5,7997E-09 | kg | river | |
| COD (Chemical Oxygen Demand) | 0,0048114 | kg | groundwater, long-term | |
| COD (Chemical Oxygen Demand) | 0,00074948 | kg | river | |
| Copper | 0,00028752 | kg | groundwater, long-term | |
| Copper | 4,171E-08 | kg | river | |
| DOC, Dissolved Organic Carbon | 0,0003273 | kg | river | |
| DOC, Dissolved Organic Carbon | 0,0019039 | kg | groundwater, long-term | |
| Fluoride | 0,000013355 | kg | groundwater, long-term | |
| Fluoride | 0,000001139 | kg | river | |
| Heat, waste | 5,1954 | MJ | river | |
| Iron | 0,0019046 | kg | groundwater, long-term | |
| Iron | 9,9249E-08 | kg | river | |
| Lead | 0,00022882 | kg | groundwater, long-term | |
| Lead | 4,5272E-08 | kg | river | |
| Manganese | 1,2606E-08 | kg | river | |
| Manganese | 0,00004996 | kg | groundwater, long-term | |
| Mercury | 9,3447E-10 | kg | river | |
| Mercury | 5,4803E-08 | kg | groundwater, long-term | |
| Nickel | 1,4025E-08 | kg | river | |
| Nickel | 0,000020036 | kg | groundwater, long-term | |
| Nitrate | 0,0021912 | kg | groundwater, long-term | |
| Nitrate | 0,0007766 | kg | river | |
| Selenium | 1,3821E-06 | kg | groundwater, long-term | |
| Selenium | 7,1888E-07 | kg | river | |
| Sodium | 0,0010694 | kg | groundwater, long-term | |
| Sodium | 0,00040349 | kg | river | |
| Strontium | 5,6466E-08 | kg | river | |
| Strontium | 0,000089564 | kg | groundwater, long-term | |
| Sulfate | 0,00010302 | kg | river | |
| Sulfate | 0,00050296 | kg | groundwater, long-term | |
| Thallium | 2,4831E-10 | kg | river | |
| Thallium | 2,3652E-07 | kg | groundwater, long-term | |
| Tin | 0,000010163 | kg | groundwater, long-term | |
| Tin | 7,0253E-10 | kg | river | |
| Titanium | 3,7782E-07 | kg | river | |
| Titanium | 0,00030293 | kg | groundwater, long-term | |
| TOC, Total Organic Carbon | 0,0003273 | kg | river | |
| TOC, Total Organic Carbon | 0,0019039 | kg | groundwater, long-term | |
| Vanadium | 0,00013611 | kg | groundwater, long-term | |
| Vanadium | 4,662E-07 | kg | river | |
| Water, Europe without Switzerland | 0,00047517 | m3 | river | |
| Zinc | 5,1114E-08 | kg | river | |
| Zinc | 0,00017228 | kg | groundwater, long-term | |
| Waste to treatment | | | | |
| Waste cement, hydrated {Europe without Switzerland} market for waste cement, hydrated Cut-off, U | 0,017729 | kg | | |
| *Waste reinforced concrete {Europe without Switzerland} treatment of waste reinforced concrete, recycling Cut-off, U | | | | |
| | 1 | kg | Betonabfälle | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U | 0,0612 | MJ | | |
| Emissions to air | | | | |
| Particulates, < 2.5 um | 0,0000166 | kg | high. pop. | |
| Particulates, > 10 um | 0,0000835 | kg | high. pop. | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 0,0000634 | kg | high. pop. | |

| Vorprozesse | | | |
|--|-------------------|--|-----------------|
| *Cement, alternative constituents 6-20% {AT} production Cut-off, U | 1 kg | Zement, angepasst auf Österreich, zur Veranschaulichung, Zemente wurden je Herstellerangaben angepasst, genaue Zusammensetzung vertraulich | ecoinvent |
| Avoided products | | | |
| Materials/fuels | | | |
| Cement factory {CH} construction Cut-off, U | 2,73E-11 p | | |
| *Clinker {AT} production Cut-off, U | 0,788 kg | | |
| Ethylene glycol {GLO} market for Cut-off, U | 0,000212 kg | | |
| Ground granulated blast furnace slag {RoW} market for ground granulated blast furnace slag Cut-off, U | 0,0018 kg | | |
| Gypsum, mineral {RER} market for gypsum, mineral Cut-off, U | 0,0464 kg | | |
| Limestone, crushed, for mill {CH} market for limestone, crushed, for mill Cut-off, U | 0,161 kg | | |
| Steel, low-alloyed {GLO} market for Cut-off, U | 0,0000404 kg | | |
| Electricity/heat | | | |
| Electricity, medium voltage {CH} market for Cut-off, U | 0,0313 kWh | | |
| Heat, district or industrial, other than natural gas {CH} heat production, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW Cut-off, U | 0,00121 MJ | | |
| Fließmittel | 1 kg | aus EPD von 2021 | IBU |
| Flugasche | 1 kg | aus EPD von 2017 | Baumineral GmbH |
| *Clinker {AT} production Cut-off, U | 1 kg | Klinker, angepasst auf Österreich, Entfernung von CO2 biogenic | ecoinvent |
| Avoided products | | | |
| Water, unspecified natural origin, CH, in water | 0,00162 m3 | | |
| Materials/fuels | | | |
| Ammonia, anhydrous, liquid {RER} market for ammonia, anhydrous, liquid Cut-off, U | 0,00188 kg | | |
| Bauxite {GLO} market for bauxite Cut-off, U | 0,0027 kg | | |
| Calcareous marl {RER} market for calcareous marl Cut-off, U | 0,386 kg | | |
| Hard coal {Europe, without Russia and Turkey} market for hard coal Cut-off, U | 0,037 kg | | |
| Heavy fuel oil {CH} market for Cut-off, U | 0,000758 kg | | |
| Industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for industrial machine, heavy, unspecified Cut-off, U | 0,0000376 kg | | |
| Light fuel oil {CH} market for Cut-off, U | 0,0002 kg | | |
| Limestone, crushed, for mill {CH} market for limestone, crushed, for mill Cut-off, U | 1,16 kg | | |
| Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U | 0,0000471 kg | | |
| Meat and bone meal {CH} market for meat and bone meal Cut-off, U | 0,00961 kg | | |
| Natural gas, high pressure {CH} market for Cut-off, U | 0,0001 m3 | | |
| Petroleum coke {GLO} market for Cut-off, U | 0,00891 kg | | |
| Pulverised lignite {GLO} market for Cut-off, U | 0,156426 MJ | | |
| Refractory, basic, packed {GLO} market for Cut-off, U | 0,00019 kg | | |
| Refractory, fireclay, packed {GLO} market for Cut-off, U | 0,0000821 kg | | |
| Refractory, high aluminium oxide, packed {GLO} market for Cut-off, U | 0,000137 kg | | |
| Steel, chromium steel 18/8, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U | 0,0000586 kg | | |
| Tap water {CH} market for Cut-off, U | 0,34 kg | | |
| Urea {RER} market for urea Cut-off, U | 0,000300132 kg | | |
| Electricity/heat | | | |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U | 0,0134 MJ | | |
| Electricity, medium voltage {AT} market for Cut-off, U | 0,121 kWh | | |
| Emissions to air | | | |
| Ammonia | 0,0000221 kg | | |
| Antimony | 2,41E-08 kg | | |
| Arsenic | 4,33E-08 kg | | |
| Cadmium | 2,13E-09 kg | | |
| Carbon dioxide, fossil | 0,525+0,088112 kg | | |
| Carbon monoxide, fossil | 0,00163 kg | | |
| Chromium | 5,91E-09 kg | | |
| Cobalt | 2,25E-09 kg | | |
| Copper | 4,18E-08 kg | | |
| Dioxin, 2,3,7,8 Tetrachlorodibenzo-p- | 2,78E-14 kg | | |
| Hydrogen chloride | 0,00000294 kg | | |
| Lead | 2,97E-08 kg | | |
| Mercury | 1,18E-08 kg | | |
| Nickel | 9,16E-09 kg | | |
| Nitrogen oxides | 0,00089 kg | | |
| NMVOC, non-methane volatile organic compounds | 0,0000605 kg | | |
| Particulates, < 2.5 um | 0,00000396 kg | low. pop. | |
| Particulates, > 10 um | 0,000000929 kg | low. pop. | |

| | | | | |
|--|-------------|-------|---------------------------|-----------|
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 0,0000013 | kg | low. pop. | |
| Sulfur dioxide | 0,00041 | kg | | |
| Thallium | 1,46E-08 | kg | | |
| Tin | 1,34E-08 | kg | | |
| Vanadium | 1,84E-09 | kg | | |
| Water/m3 | 0,000294 | m3 | | |
| Zinc | 6,11E-08 | kg | | |
| Emissions to water | | | | |
| Water, CH | 0,001666 | m3 | | |
| *Diesel {AT} market for Cut-off, U | | 1 kg | Diesel für Maschinen | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Diesel {Europe without Switzerland} diesel production, petroleum refinery operation Cut-off, U | | 1 kg | | |
| Infrastructure, for regional distribution of oil product {RER} construction Cut-off, U | 2,48E-10 | p | | |
| Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 0,000689 | kg | | |
| Transport, freight train {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 0,044 | tkm | | |
| Transport, freight, inland waterways, barge tanker {RER} market for transport, freight, inland waterways, barge tanker Cut-off, U | 0,0323 | tkm | | |
| Transport, freight, light commercial vehicle {Europe without Switzerland} market for transport, freight, light commercial vehicle Cut-off, U | 0,0018 | tkm | | |
| Transport, freight, lorry, unspecified {RER} market for transport, freight, lorry, unspecified Cut-off, U | 0,0567 | tkm | | |
| Transport, pipeline, onshore, petroleum {RER} market for transport, pipeline, onshore, petroleum Cut-off, U | 0,559 | tkm | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Electricity, low voltage {AT} market for Cut-off, U | 0,0067 | kWh | | |
| Heat, central or small-scale, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U | 0,00058374 | MJ | | |
| Emissions to air | | | | |
| Water/m3 | 1,0335E-07 | m3 | | |
| Emissions to water | | | | |
| Water, AT | 5,8565E-07 | m3 | | |
| Waste to treatment | | | | |
| Fly ash and scrubber sludge {Europe without Switzerland} market for fly ash and scrubber sludge Cut-off, U | 0,000168 | kg | | |
| Municipal solid waste {Europe without Switzerland} market group for municipal solid waste Cut-off, U | 0,00000627 | kg | | |
| Rainwater mineral oil storage {Europe without Switzerland} market for rainwater mineral oil storage Cut-off, U | 0,000075 | m3 | | |
| Wastewater, average {Europe without Switzerland} market for wastewater, average Cut-off, U | 0,000000689 | m3 | | |
| *Electricity, high voltage {AT} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, U | | 1 kWh | Strommix für Österreich | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Resources | | | | |
| Energy, potential (in hydropower reservoir), converted | 3,79 | MJ | in water | |
| Water, turbine use, unspecified natural origin, AT | 45 | m3 | in water | |
| Occupation, water bodies, artificial | 0,004496 | m2a | land | |
| Transformation, from pasture, man made | 0,0000281 | m2 | land | |
| Transformation, from shrub land, sclerophyllous | 0,0000281 | m2 | land | |
| Transformation, to industrial area | 0,00000563 | m2 | land | |
| Transformation, to water bodies, artificial | 0,0000557 | m2 | land | |
| Materials/fuels | | | | |
| Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U | 0,00000756 | kg | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Hydropower plant, run-of-river {Europe without Switzerland} construction Cut-off, U | 8,07285E-13 | p | | |
| Emissions to water | | | | |
| Water, AT | 45 | m3 | | |
| Waste to treatment | | | | |
| Waste mineral oil {Europe without Switzerland} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,00000756 | kg | | |
| *Gravel, crushed {AT} production Cut-off, U | | 1 kg | Herstellung Gleisschotter | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Resources | | | | |
| Gravel | 1,04 | kg | in ground | |
| Water, unspecified natural origin, AT | 0,001111945 | m3 | in water | |
| Occupation, mineral extraction site | 0,000288 | m2a | land | |
| Occupation, water bodies, artificial | 0,0000627 | m2a | land | |
| Transformation, from unspecified | 0,0000351 | m2 | land | |
| Transformation, to mineral extraction site | 0,0000288 | m2 | land | |
| Transformation, to water bodies, artificial | 0,00000627 | m2 | land | |
| Materials/fuels | | | | |

| | | | | |
|---|------------------|-----|---|-----------|
| Building, hall, steel construction {CH} building construction, hall, steel construction Cut-off, U | 0,00000285 | m2 | | |
| Conveyor belt {GLO} market for Cut-off, U | 9,51E-08 | m | | |
| Gravel/sand quarry infrastructure {CH} gravel/sand quarry construction Cut-off, U | 4,75E-11 | p | | |
| Industrial machine, heavy, unspecified {RER} market for industrial machine, heavy, unspecified Cut-off, U | 0,0000951 | kg | | |
| Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U | 0,0000025 | kg | | |
| Recultivation, limestone mine {CH} processing Cut-off, U | 0,00000127 | m2 | | |
| Steel, low-alloyed, hot rolled {GLO} market for Cut-off, U | 0,000051 | kg | | |
| Synthetic rubber {GLO} market for Cut-off, U | 0,000004 | kg | | |
| Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 0,0122 | kg | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Diesel, burned in building machine {GLO} market for Cut-off, U | 0,0143 | MJ | | |
| Electricity, medium voltage {AT} market for Cut-off, U | 0,00398 | kWh | | |
| Heat, central or small-scale, other than natural gas {Europe without Switzerland} market for heat, central or small-scale, other than natural gas Cut-off, U | 0,00491 | MJ | | |
| Emissions to air | | | | |
| Particulates, < 2.5 um | 4E-10 | kg | low. pop. | |
| Particulates, > 10 um | 5,6E-09 | kg | low. pop. | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 0,00000002 | kg | low. pop. | |
| Water/m3 | 0,000306585 | m3 | | |
| Emissions to water | | | | |
| Water, AT | 0,00081756 | m3 | | |
| Waste to treatment | | | | |
| Municipal solid waste {AT} market for municipal solid waste Cut-off, | 0,00000212 | kg | | |
| Waste mineral oil {CH} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,0000025 | kg | | |
| | | | | |
| *Reinforcing steel {AT} reinforcing steel production Cut-off, U | 1 | kg | Bewehrung | ecoinvent |
| | | | | |
| Avoided products | | | | |
| Materials/fuels | | | | |
| Hot rolling, steel {AT} hot rolling, steel Cut-off, U | 1 | kg | | |
| | | | | |
| Steel, low-alloyed {AT} steel production, electric, low-alloyed Cut- | 1 | kg | | |
| | | | | |
| *Spannstahl_genau, voestalpine Wire Austria, {AT} processing Cut-off, U | 1 | kg | Spannstahl-Herstellung bei voestalpine AG, Eigenmodellierung nach Umwelterklärung | [60] |
| | | | | |
| Avoided products | | | | |
| Resources | | | | |
| Water, cooling, unspecified natural origin, RER | 14,54828597/1000 | m3 | in water | |
| Materials/fuels | | | | |
| Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U | 23,533893/1000 | kg | | |
| Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U | 0,245887/1000 | kg | | |
| *Wire drawing, steel {AT} processing Cut-off, U | 1,01094195 | kg | | |
| Paper, woodfree, uncoated {RER} market for Cut-off, U | 0,000061472 | kg | | |
| Natural gas, high pressure {AT} market for Cut-off, U | 35,7851931/1000 | m3 | | |
| *Diesel {AT} market for Cut-off, U | 0,450688035/1000 | kg | | |
| Kerosene {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 0,000947042/1000 | kg | | |
| Tap water {Europe without Switzerland} market for Cut-off, U | 61,68678155/1000 | kg | | |
| Nitrogen, liquid {RER} market for Cut-off, U | 17,05414708/1000 | kg | | |
| Propane {GLO} market for Cut-off, U | 0,000317683/1000 | kg | | |
| Zinc {GLO} market for Cut-off, U | 0,235641252/1000 | kg | | |
| Lead {GLO} market for Cut-off, U | 0,235641252/1000 | kg | | |
| Acetylene {GLO} market for Cut-off, U | 0,015367908/1000 | kg | | |
| Oxygen, liquid {RER} market for Cut-off, U | 0,015367908/1000 | kg | | |
| Hydrogen, liquid {RER} market for Cut-off, U | 1,184874271/1000 | kg | | |
| *Transport, freight train {AT} processing Cut-off, U | 1/1000*20 | tkm | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Electricity, high voltage {AT} market for Cut-off, U | 207,9062763/1000 | kWh | | |
| *Electricity, high voltage {AT} electricity production, hydro, run-of-river Cut-off, U | 75,10603856/1000 | kWh | | |
| Emissions to air | | | | |
| Carbon monoxide, fossil | 6,618445587/1000 | g | | |
| Hydrogen | 1,184467068/1000 | kg | | |
| Hydrogen chloride | 3,852222199/1000 | g | | |
| Lead | 0,081962174/1000 | g | | |
| NMVOG, non-methane volatile organic compounds | 3,80099584/1000 | g | | |
| Particulates, > 10 um | 5,4772E-08 | kg | | |
| Particulates, > 2.5 um, and < 10um | 1,3693E-07 | kg | | |
| Sulfate | 7,3166E-08 | kg | | |
| Sulfur dioxide | 6,6815E-07 | kg | | |
| Water/m3 | 0,0135625 | m3 | | |
| Carbon dioxide, fossil | 65,69268283/1000 | kg | | |
| Nitrogen dioxide | 41,65727517/1000 | g | | |
| Particulates, unspecified | 1,18845153/1000 | g | | |
| Nitrogen, total | 17,05414708/1000 | kg | | |
| Copper | 0,081962174/1000 | g | | |
| TOC, Total Organic Carbon | 2,335921972/1000 | g | | |

| | | | | |
|---|--------------------------------|------|-----------|-----------|
| Emissions to water | | | | |
| COD (Chemical Oxygen Demand) | 15312,58324/1000 | g | | |
| Copper | 6,147163084/1000 | g | | |
| Hydrocarbons, unspecified | 98,35460935/1000 | g | | |
| Iron | 178,2677294/1000 | g | | |
| Lead | 0,409810872/1000 | g | | |
| Zinc | 50,20183185/1000 | g | | |
| Ammonium, ion | 3012,109911/1000 | g | | |
| AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl | 217,1997623/1000 | g | | |
| Phosphorus, total | 356,5354589/1000 | g | | |
| Chromium | 1,024527181/1000 | g | | |
| Final waste flows | | | | |
| Hazardous waste, unspecified treatment | 38,10933754/1000 | kg | | |
| Non-hazardous waste, unspecified treatment | 5,820338914/1000 | kg | | |
| Packaging waste, paper and board | (0,034629019+0,433374997)/1000 | kg | | |
| Iron waste | 0,001229433/1000 | kg | | |
| Plastic waste | 0,095895744/1000 | kg | | |
| Glass waste | 0,002663771/1000 | kg | | |
| Construction waste | 0,201626949/1000 | kg | | |
| Waste to treatment | | | | |
| Basic oxygen furnace waste {GLO} market for Cut-off, U | 0,0031623 | kg | | |
| Electric arc furnace dust {RER} market for electric arc furnace dust | 0,0012845 | kg | | |
| Municipal solid waste {RER} market group for municipal solid waste Cut-off, U | 7,078E-11 | kg | | |
| Sludge from steel rolling {GLO} market for Cut-off, U | 0,035 | kg | | |
| Waste mineral oil {CH} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,001517386 | kg | | |
| Waste mineral oil {Europe without Switzerland} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,061293614 | kg | | |
| | | | | |
| *Wire drawing, steel {AT} processing Cut-off, U | | 1 kg | Walzdraht | ecoinvent |
| Avoided products | | | | |
| Resources | | | | |
| Water, cooling, unspecified natural origin, RER | 0,035 | m3 | in water | |
| Materials/fuels | | | | |
| Chemical, inorganic {GLO} market for chemical, inorganic Cut-off, U | 1,8407E-08 | kg | | |
| Chemical, organic {GLO} market for Cut-off, U | 0,000031623 | kg | | |
| Corrugated board box {RER} market for corrugated board box Cut-off, U | 4,7181E-12 | kg | | |
| Hydrochloric acid, without water, in 30% solution state {RER} market for Cut-off, U | 0,020009 | kg | | |
| Lead {GLO} market for Cut-off, U | 0,0012845 | kg | | |
| Lime, hydrated, loose weight {CH} market for lime, hydrated, loose weight Cut-off, U | 0,000063233 | kg | | |
| Lubricating oil {RER} market for lubricating oil Cut-off, U | 0,0025811 | kg | | |
| Packaging film, low density polyethylene {GLO} market for Cut-off, U | 1,8872E-11 | kg | | |
| Rolling mill {RER} production Cut-off, U | 1,6234E-09 | p | | |
| Sheet rolling, steel {RER} processing Cut-off, U | 2,359E-11 | kg | | |
| Soap {GLO} market for Cut-off, U | 0,0025811 | kg | | |
| Steel, unalloyed {GLO} market for Cut-off, U | 0,042762 | kg | | |
| Sulfuric acid {RER} market for sulfuric acid Cut-off, U | 0,0088388 | kg | | |
| Electricity/heat | | | | |
| Electricity, medium voltage {AT} electricity voltage transformation from high to medium voltage Cut-off, U | 0,14142 | kWh | | |
| Heat, district or industrial, natural gas {RER} market group for Cut-off, U | 0,392217 | MJ | | |
| Heat, district or industrial, other than natural gas {RER} market group for Cut-off, U | 6,67803E-05 | MJ | | |
| Emissions to air | | | | |
| Carbon monoxide, fossil | 5,4772E-06 | kg | | |
| Hydrogen | 1,5355E-09 | kg | | |
| Hydrogen chloride | 3,9341E-06 | kg | | |
| Lead | 9,3199E-09 | kg | | |
| NM VOC, non-methane volatile organic compounds | 2,2097E-07 | kg | | |
| Particulates, > 10 um | 5,4772E-08 | kg | | |
| Particulates, > 2,5 um, and < 10um | 1,3693E-07 | kg | | |
| Sulfate | 7,3166E-08 | kg | | |
| Sulfur dioxide | 6,6815E-07 | kg | | |
| Water/m3 | 0,0135625 | m3 | | |
| Emissions to water | | | | |
| Aluminium | 1,6565E-06 | kg | | |
| BOD5 (Biological Oxygen Demand) | 0,000048129 | kg | | |
| Cadmium | 0,000000175 | kg | | |
| Chloride | 0,0011469 | kg | | |
| Chromium | 0,00000063 | kg | | |
| Chromium VI | 0,000000035 | kg | | |
| COD (Chemical Oxygen Demand) | 0,000048129 | kg | | |
| Copper | 3,3861E-07 | kg | | |
| DOC, Dissolved Organic Carbon | 0,0000153 | kg | | |
| Hydrocarbons, unspecified | 2,2044E-06 | kg | | |
| Iron | 0,00049889 | kg | | |
| Lead | 0,00000035 | kg | | |
| Manganese | 7,1386E-07 | kg | | |
| Mercury | 0,000000035 | kg | | |
| Nickel | 9,8995E-07 | kg | | |

| | | | |
|---|-------------|----|--|
| Sulfate | 7,3458E-06 | kg | |
| Suspended solids, unspecified | 0,00018575 | kg | |
| TOC, Total Organic Carbon | 0,0000153 | kg | |
| Water, RER | 0,0214375 | m3 | |
| Zinc | 2,6192E-07 | kg | |
| Waste to treatment | | | |
| Basic oxygen furnace waste {GLO} market for Cut-off, U | 0,0031623 | kg | |
| Electric arc furnace dust {RER} market for electric arc furnace dust Cut-off, U | 0,0012845 | kg | |
| Municipal solid waste {RER} market group for municipal solid waste Cut-off, U | 7,078E-11 | kg | |
| Sludge from steel rolling {GLO} market for Cut-off, U | 0,035 | kg | |
| Waste mineral oil {CH} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,001517386 | kg | |
| Waste mineral oil {Europe without Switzerland} market for waste mineral oil Cut-off, U | 0,061293614 | kg | |

Verpflichtungs- und Einverständniserklärung

Ich erkläre, dass ich meine Masterarbeit selbständig verfasst und alle in ihr verwendeten Unterlagen, Hilfsmittel und die zugrunde gelegte Literatur genannt habe.

Ich nehme zur Kenntnis, dass auch bei auszugsweiser Veröffentlichung meiner Masterarbeit die Universität, das/die Institut/e und der/die Arbeitsbereich/e, an dem/denen die Masterarbeit ausgearbeitet wurde, und die Betreuerin/nen bzw. der/die Betreuer zu nennen sind.

Ich nehme zur Kenntnis, dass meine Masterarbeit zur internen Dokumentation und Archivierung sowie zur Abgleichung mit der Plagiatssoftware elektronisch im Dateiformat pdf ohne Kennwortschutz bei der/dem Betreuer/in einzureichen ist, wobei auf die elektronisch archivierte Masterarbeit nur die/der Betreuerin/Betreuer der Masterarbeit und das studienrechtliche Organ Zugriff haben.

Innsbruck, am

.....

Lukas Hausberger, BSc