



Ökobilanz Weiche

Masterarbeit

Abgabedatum 25.03.2019

Philipp Koller
BSc.
01330145
pkoller@student.tugraz.at

Betreuer:
Matthias Landgraf
Dipl.-Ing. Dr.techn.
m.landgraf@tugraz.at

Betreuer:
Stefan Marschnig
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
stefan.marschnig@tugraz.at



Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008 Genehmigung des Senats am 01.12.2008

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtliche und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit/Diplomarbeit identisch.

Graz, _____

Philipp Koller, BSc.

Statutory Declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. This document is identical with the electronic version uploaded via TUGRAZonline.

Graz, _____

Philipp Koller, BSc.

Kurzfassung

Infrastrukturanlagen sind komplexe Systeme, welche sich durch Kosten- und Ressourcenintensität auszeichnen. Die Errichtung dieser Anlagen ist jedoch essenziell, um das Bedürfnis nach Mobilität zu befriedigen. Neben Kosten verursachen Erstellung, Betrieb und Abbau der Anlagen auch wesentliche Umweltwirkungen. Deshalb ist es essenziell, Infrastrukturanlagen hinsichtlich ihrer negativen Umweltwirkungen zu optimieren, um dadurch den Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch und Emissionen in Luft, Wasser und Boden zu reduzieren. Die Ökobilanz ist das passende Werkzeug, um die Umweltwirkungen der einzelnen Produkte und Lebensphasen zu bewerten und dementsprechend eine Optimierung derselben voranzutreiben.

Die Weiche, als eine der maßgebenden Komponenten des Eisenbahnfahrwegs, ist ein Teil der Eisenbahninfrastruktur und stellt bereits selbst ein komplexes und aufwendiges Produktsystem dar. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, mit Hilfe einer Ökobilanz unterschiedliche Oberbautypen und Belastungsklassen der Weiche hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu untersuchen. Darauf basierend sollten Empfehlungen für die Minimierung der Umwelteinflüsse bereitgestellt werden.

Um dies erreichen zu können, wurde ein Ökobilanzmodell erstellt und ausgewertet. Die notwendigen Inputdaten für das Modell lieferten dabei Weichenstücklisten, die seitens der voestalpine VAE GmbH zur Verfügung gestellt wurden. Die Auswertung erfolgte dabei mit unterschiedlichen Bewertungsmethoden, deren Vor- und Nachteile innerhalb dieser Arbeit diskutiert werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass Weichenoberbautypen mit hoher Nutzungsdauer zu den geringsten jährlichen Umweltwirkungen führen. Dies bedeutet, dass eine Erhöhung der Lebensdauer einer Weiche durch qualitativ hochwertige Komponenten eine nachhaltige Reduktion der negativen Umwelteinflüsse ermöglicht.

Abstract

Infrastructure facilities are complex systems that are cost- and resource-intensive. However, they are essential for society as they satisfy the need for mobility. Installation, usage and disposal cause environmental impacts, which should be optimized in order to mitigate emissions on all levels. Therefore, it is very important to evaluate infrastructure assets with regard to their negative environmental effects in order to reduce energy consumption, resource consumption and emissions in air, water and soil. Life Cycle Assessment is the right tool for assessing the environmental impacts of individual products and their different stages of life for driving an optimization.

The turnout, as one of the decisive components of the railway track, is part of the railway infrastructure and already constitutes a complex, energy and resource intensive product system. The aim of this research is to investigate different types of turnout superstructure and load classes with regard to their environmental impacts throughout the life cycle. Based on this, recommendations for minimizing these environmental impacts should be provided.

In order to achieve this, a life cycle assessment model was created and evaluated. For the necessary input data, Bills of materials were provided by voestalpine VAE GmbH. The evaluation was done with different evaluation methods whose advantages and disadvantages are discussed within this thesis.

The results show that turnout superstructures with a long service life lead to the lowest annual environmental impacts. This means that increasing the service life of a turnout with high-quality components enables a sustainable reduction of negative environmental influences.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| INHALTSVERZEICHNIS | I |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | III |
| TABELLENVERZEICHNIS | V |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS..... | VII |
| 1 EINLEITUNG..... | 1 |
| 1.1 PROBLEMSTELLUNG | 1 |
| 1.2 AUFGABENSTELLUNG | 2 |
| 2 DIE WEICHE | 3 |
| 3 GRUNDLAGEN DER ÖKOBILANZ..... | 6 |
| 3.1 NORMEN..... | 6 |
| 3.2 PHASEN EINER ÖKOBILANZ..... | 7 |
| 3.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen | 7 |
| 3.2.1.1 Ziel | 8 |
| 3.2.1.2 Untersuchungsrahmen | 8 |
| 3.2.1.3 Funktionelle Einheit..... | 9 |
| 3.2.2 Sachbilanz..... | 9 |
| 3.2.3 Wirkungsabschätzung..... | 10 |
| 3.2.4 Auswertung | 11 |
| 4 ZIEL UND UNTERSUCHUNGSRAHMEN | 12 |
| 4.1 ZIEL..... | 12 |
| 4.2 UNTERSUCHUNGSRAHMEN..... | 13 |
| 4.3 FUNKTIONELLE EINHEIT | 14 |
| 5 SACHBILANZ | 16 |
| 5.1 HERSTELLUNG..... | 17 |
| 5.1.1 Holzschwellenweiche..... | 20 |
| 5.1.2 Betonschwellenweiche | 24 |
| 5.1.3 Besohlte Betonschwellenweiche | 28 |
| 5.1.4 Schotter | 30 |
| 5.2 TRANSPORT..... | 31 |
| 5.2.1 Holzschwellenweiche..... | 31 |
| 5.2.2 Betonschwellenweiche | 33 |
| 5.3 EINBAU | 36 |
| 5.4 INSTANDHALTUNG | 43 |
| 5.5 END OF LIFE (EOL)..... | 46 |
| 5.5.1 Holzschwellenweiche..... | 47 |
| 5.5.2 Betonschwellenweiche | 48 |
| 5.5.3 Besohlte Betonschwellenweiche | 49 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.5.4 | Schotter | 50 |
| 6 | WIRKUNGSABSCHÄTZUNG | 51 |
| 6.1 | BEWERTUNGSMETHODEN | 52 |
| 6.1.1 | CML-IA baseline | 52 |
| 6.1.2 | Ökologische Knappheit | 53 |
| 6.1.3 | Ökologischer Fußabdruck | 53 |
| 6.1.1 | Methodenvergleich | 53 |
| 6.2 | IMPLEMENTIERUNG IN SIMAPRO | 55 |
| 6.2.1 | Cradle-to-Gate | 55 |
| 6.2.2 | Lifecycle Impact Assessment (LCIA) | 60 |
| 7 | AUSWERTUNG | 65 |
| 7.1 | CML-IA BASELINE | 66 |
| 7.1.1 | Cradle-to-Gate | 66 |
| 7.1.2 | Lifecycle Impact Assessment (LCIA) | 69 |
| 7.2 | ÖKOLOGISCHE KNAPPHEIT | 77 |
| 7.2.1 | Cradle-to-Gate | 77 |
| 7.2.2 | Lifecycle Impact Assessment (LCIA) | 80 |
| 7.3 | ÖKOLOGISCHER FUßABDRUCK | 88 |
| 7.3.1 | Cradle-to-Gate | 88 |
| 7.3.2 | Lifecycle Impact Assessment (LCIA) | 91 |
| 7.4 | ERGEBNISZUSAMMENFASSUNG | 99 |
| 8 | ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 104 |
| 9 | LITERATURVERZEICHNIS | 107 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Weichenaufbau [4]..... | 4 |
| Abbildung 2: Lebensweg eines Produktes..... | 6 |
| Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz [1] | 7 |
| Abbildung 4: Aufbau eines Produktsystems [1]..... | 9 |
| Abbildung 5: Prozessmodul eines Produktsystems [7] | 10 |
| Abbildung 6: Wirkungsabschätzung [1] | 11 |
| Abbildung 7: Materialgruppierung der Weichen | 17 |
| Abbildung 8: Unterklassifizierung der Materialgruppen..... | 18 |
| Abbildung 9: Baugruppen - SimaPro..... | 57 |
| Abbildung 10: Baugruppen - SimaPro..... | 57 |
| Abbildung 11: Baugruppe besohlte Betonschwellenweiche - SimaPro | 58 |
| Abbildung 12: Berechnungssetup Cradle-to-Gate - SimaPro | 59 |
| Abbildung 13: Berechnungssetups CML-IA - SimaPro | 59 |
| Abbildung 14: Berechnungssetup Einstellungen Cradle-to-Gate - SimaPro | 59 |
| Abbildung 15: Lebenszyklen Strukturübersicht - SimaPro | 61 |
| Abbildung 16: Lebenszyklen besohlte Betonschwellenweiche Variantenübersicht - SimaPro..... | 61 |
| Abbildung 17: Lebenszyklus besohlte Betonschwellenweiche_33.000 GesBT/Tag - SimaPro..... | 62 |
| Abbildung 18: Berechnungssetup Lebenszyklen - SimaPro | 63 |
| Abbildung 19: Berechnungssetup CML-IA Lebenszyklen-Varianten - SimaPro | 64 |
| Abbildung 20: Berechnungssetup Lebenszyklus besohlte Betonschwellenweiche 33.000 GesBT/Tag - SimaPro | 64 |
| Abbildung 21: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung | 66 |
| Abbildung 22: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis | 70 |
| Abbildung 23: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis | 71 |
| Abbildung 24: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis | 72 |
| Abbildung 25: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen | 74 |
| Abbildung 26: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen | 75 |

| | |
|---|------------|
| <i>Abbildung 27: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr der beschlten Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>76</i> |
| <i>Abbildung 28: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung</i> | <i>77</i> |
| <i>Abbildung 29: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>81</i> |
| <i>Abbildung 30: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>82</i> |
| <i>Abbildung 31: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>83</i> |
| <i>Abbildung 32: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>85</i> |
| <i>Abbildung 33: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>86</i> |
| <i>Abbildung 34: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der beschlten Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>87</i> |
| <i>Abbildung 35: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung</i> | <i>88</i> |
| <i>Abbildung 36: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>92</i> |
| <i>Abbildung 37: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>93</i> |
| <i>Abbildung 38: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis</i> | <i>94</i> |
| <i>Abbildung 39: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>96</i> |
| <i>Abbildung 40: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>97</i> |
| <i>Abbildung 41: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der beschlten Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen</i> | <i>98</i> |
| <i>Abbildung 42: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | <i>99</i> |
| <i>Abbildung 43: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | <i>101</i> |
| <i>Abbildung 44: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | <i>102</i> |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| <i>Tabelle 1: Oberbauvarianten</i> | 13 |
| <i>Tabelle 2: Sachbilanz Zungenvorrichtung – Holzschwellenweiche [9]</i> | 20 |
| <i>Tabelle 3: Sachbilanz Fahrschienen und Radlenker – Holzschwellenweiche [9]</i> | 21 |
| <i>Tabelle 4: Sachbilanz Herzstück – Holzschwellenweiche [9]</i> | 21 |
| <i>Tabelle 5: Sachbilanz Rippenplatten – Holzschwellenweiche [9]</i> | 21 |
| <i>Tabelle 6: Sachbilanz Befestigungsmaterial – Holzschwellenweiche [9]</i> | 22 |
| <i>Tabelle 7: Sachbilanz Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb – Holzschwellenweiche [9]</i> | 22 |
| <i>Tabelle 8: Sachbilanz Zwischenlagen – Holzschwellenweiche [9]</i> | 22 |
| <i>Tabelle 9: Sachbilanz Holzschwellen – Holzschwellenweiche [8][9]</i> | 23 |
| <i>Tabelle 10: Sachbilanz Holzschwellenweiche [9]</i> | 23 |
| <i>Tabelle 11: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Wörth – Holzschwellenweiche [10]</i> | 23 |
| <i>Tabelle 12: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – Holzschwellenweiche [10]</i> . | 24 |
| <i>Tabelle 13: Sachbilanz Zungenvorrichtung – Betonschwellenweiche [11]</i> | 24 |
| <i>Tabelle 14: Sachbilanz Fahrschienen und Radlenker – Betonschwellenweiche [11]</i> | 25 |
| <i>Tabelle 15: Sachbilanz Herzstück – Betonschwellenweiche [11]</i> | 25 |
| <i>Tabelle 16: Sachbilanz Rippenplatten – Betonschwellenweiche [11]</i> | 25 |
| <i>Tabelle 17: Sachbilanz Befestigungsmaterial – Betonschwellenweiche [11]</i> | 26 |
| <i>Tabelle 18: Sachbilanz Zwischenlagen – Betonschwellenweiche [11]</i> | 26 |
| <i>Tabelle 19: Sachbilanz Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb – Betonschwellenweiche [11]</i> | 26 |
| <i>Tabelle 20: Sachbilanz Betonschwellen – Betonschwellenweiche [12]</i> | 27 |
| <i>Tabelle 21: Sachbilanz Betonschwellenweiche [11][12]</i> | 27 |
| <i>Tabelle 22: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – Betonschwellenweiche [13]</i> .. | 28 |
| | |
| <i>Tabelle 23: Sachbilanz Schwellenbesohlung – besohlte Betonschwellenweiche</i> | 28 |
| <i>Tabelle 24: Sachbilanz besohlte Betonschwellenweiche [11][12]</i> | 29 |
| <i>Tabelle 25: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – besohlte Betonschwellenweiche [13]</i> | 29 |
| <i>Tabelle 26: Sachbilanz Schotter</i> | 30 |
| <i>Tabelle 27: Sachbilanz Transport - Holzschwellenweiche</i> | 32 |
| <i>Tabelle 28: Sachbilanz Transportwege der Holzschwellen – Holzschwellenweiche [8]</i> ... | 32 |
| <i>Tabelle 29: Sachbilanz Transportwege Herzstück - Holzschwellenweiche</i> | 33 |
| <i>Tabelle 30: Sachbilanz Transportwege - Betonschwellenweiche</i> | 34 |
| <i>Tabelle 31: Sachbilanz Transportwege Herzstück - Betonschwellenweiche</i> | 35 |
| <i>Tabelle 32: Ablauf Weicheneinbau</i> | 36 |

| | |
|---|-----|
| <i>Tabelle 33: Abtransport alte Weiche – Ablauf Weicheneinbau</i> | 37 |
| <i>Tabelle 34: Altschotter entfernen – Ablauf Weicheneinbau</i> | 37 |
| <i>Tabelle 35: Planumsverbesserung – Ablauf Weicheneinbau</i> | 38 |
| <i>Tabelle 36: 1. Schotterlage – Ablauf Weicheneinbau</i> | 38 |
| <i>Tabelle 37: Weichenverlegung – Ablauf Weicheneinbau</i> | 39 |
| <i>Tabelle 38: Ergänzungsschotter – Ablauf Weicheneinbau</i> | 39 |
| <i>Tabelle 39: Stopfen Einbau – Ablauf Weicheneinbau</i> | 39 |
| <i>Tabelle 40: DGS – Ablauf Weicheneinbau</i> | 39 |
| <i>Tabelle 41: Schweißen – Ablauf Weicheneinbau</i> | 40 |
| <i>Tabelle 42: Schleifen – Ablauf Weicheneinbau</i> | 40 |
| <i>Tabelle 43: Treibstoffverbrauch Maschinen – Weicheneinbau</i> | 40 |
| <i>Tabelle 44: Maschinenleistungen - Weicheneinbau</i> | 41 |
| <i>Tabelle 45: Schadstoffemissionen Maschinen – Weicheneinbau</i> | 41 |
| <i>Tabelle 46: Sachbilanz Weicheneinbau</i> | 42 |
| <i>Tabelle 47: Ablauf Weicheninstandhaltung</i> | 43 |
| <i>Tabelle 48: Zeitaufwand Weicheninstandhaltung [21]</i> | 45 |
| <i>Tabelle 49: Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen je Oberbautyp und Belastungsklasse [22]</i> | 45 |
| <i>Tabelle 50: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe</i> | 46 |
| <i>Tabelle 51: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe - Holzschwellenweiche</i> | 47 |
| <i>Tabelle 52: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Wörth – Holzschwellenweiche [10]</i> | 47 |
| <i>Tabelle 53: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – Holzschwellenweiche [13]</i> | 48 |
| <i>Tabelle 54: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe - Betonschwellenweiche</i> | 48 |
| <i>Tabelle 55: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – Betonschwellenweiche [13]</i> | 49 |
| <i>Tabelle 56: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe – besohlte Betonschwellenweiche</i> | 49 |
| <i>Tabelle 57: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – besohlte Betonschwellenweiche[13]</i> | 50 |
| <i>Tabelle 58: Sachbilanz Schotter - EOL</i> | 50 |
| <i>Tabelle 59: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – CML-IA Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | 100 |
| <i>Tabelle 60: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – Ecological Scarcity Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | 102 |
| <i>Tabelle 61: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – Ecological footprint Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA</i> | 103 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|--------|--|
| CML-IA | Centrum voor Milieukunde - Impact Assessment |
| CtG | Cradle-to-Gate |
| EF | Ecological footprint |
| EOL | End Of Life |
| ES | Ecological Scarcity |
| FAS | Fahrschiene |
| GesBT | Gesamtbruttotonnen |
| HZ | Herzstück |
| HZV | halbe Zungenvorrichtung |
| LCA | Life Cycle Assessment |
| LCI | Life Cycle Impact |
| LCIA | Life Cycle Impact Assessment |
| ND | Nutzungsdauer |
| RADL | Radlenker |
| UBP | Umweltbelastungspunkte |
| UE | Umwelterklärung |
| USP | Under Sleeper Pads |
| ZV | Zungenvorrichtung |

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Ziel dieser Masterarbeit ist es, eine Methodik der Ökobilanz für Eisenbahnweichen auszu- arbeiten. Es soll damit ermöglicht werden, Weichen mit verschiedenen Oberbautypen sowie unterschiedlichen Belastungsklassen hinsichtlich ihrer Ökobilanz zu vergleichen und die maßgebenden Emissionsauslöser innerhalb des gesamten Lebenszyklus zu bestimmen.

Aufgrund des immer stärker werdenden Bewusstseins zum Thema Umweltschutz und des Zusammenhanges der Umweltwirkungen mit der Produktion sowie Anwendungen von Pro- dukten, steigt das Interesse, Methoden für eine bessere Nachvollziehbarkeit und die Be- rücksichtigung dieser Einwirkungen auf die Umwelt zu entwickeln. Aus einer dieser Ent- wicklungen ging die Ökobilanz hervor. Mit ihr ist es unter anderem möglich, die Umweltei- genschaften eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus zu bewerten, wichtige In- formationen für strategische Entscheidungen zur Verfügung zu stellen, relevante Indikato- ren und Messverfahren der Umwelteigenschaften zu bestimmen und Umweltkennzeichnun- gen aus marketingtechnischen Gründen zu etablieren. Die Ökobilanz berücksichtigt dabei jeweils den gesamten Lebenszyklus eines Produktes, angefangen bei der Rohstoffgewin- nung, gefolgt von der Produktion und Anwendung bis hin zum Recycling und der endgül- tigen Beseitigung. [1]

Besonders bei sehr komplexen Produkten, die über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg für einen hohen Energie- und Ressourcenverbrauch verantwortlich sind, ist eine Umwelt- betrachtung in Form einer Ökobilanz sinnvoll. Die Eisenbahninfrastruktur mit all ihren Ein- zelkomponenten und Wechselwirkungen erfüllt genau diese Kriterien. Ohne die Weiche würde ein solche Eisenbahninfrastruktur nicht funktionieren [2]. Die hohe Weichendichte im Streckennetz der ÖBB und die damit gebundenen Rohstoffe sowie die hohen Umwelt- wirkungen aus Produktion, Instandhaltung und Entsorgung, rechtfertigt die Anwendung der Ökobilanz auf das komplexe System Weiche.

Folgende Forschungsfragen sollen im Zuge dieser Masterarbeit beantwortet werden:

- Welche Komponenten sind die maßgebenden Emissionsauslöser innerhalb des Sys- tems Weiche?
- Innerhalb welcher Lebensphase treten die größten Umweltwirkungen auf?
- Welcher Oberbautyp verursacht in Bezug auf Ressourcenverbrauch und Emissionen die geringsten negativen Umweltwirkungen?

1.2 Aufgabenstellung

Zu Beginn dieser Arbeit erfolgt eine allgemeine Literaturrecherche der Themen Ökobilanz und Eisenbahnweichen um Ziele, Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen zu bestimmen. Zusätzlich wird eine am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU-Graz bearbeitete Masterarbeit herangezogen, die sich bereits mit der Anwendung der Ökobilanzmethodik auf das freie Streckengleis des Systems Eisenbahn beschäftigt. Im Grunde soll die Herangehensweise der Ökobilanz des Streckengleises auf die Eisenbahnweiche übertragen und somit Zeit und Aufwand in der Entwicklung der Anwendungstechnik gespart werden. Der Schwerpunkt dieser Arbeit bezieht sich demnach nicht nur auf die Anwendbarkeit der Ökobilanz auf Eisenbahnweichen, sondern auch auf die ausgewerteten Endergebnisse der Produktsysteme und deren Vergleich. Als Produktsystem der Ökobilanz wird eine einfache Weiche mit einem Abzweigradius von 500 m mit unterschiedlichen Oberbautypen und Belastungsklassen gewählt.

In der zweiten Bearbeitungsphase erfolgt die für die Ökobilanz notwendige Erstellung der Sachbilanzen. Darunter versteht man die Sammlung aller für die Zielerreichung der Studie erforderlichen Daten und Informationen, welche über die Bestandsaufnahmen der Input- und Outputdaten der jeweiligen zu untersuchenden Systeme gewonnen werden. Die Anzahl der Weichensysteme wird dabei vom Untersuchungsrahmen bestimmt.

Im nächsten Schritt sollen für die bessere Einschätzung der Sachbilanzergebnisse der einzelnen Weichensysteme zusätzliche Informationen mittels Wirkungsabschätzung bereitgestellt werden. Dies fördert das Verständnis der Umweltrelevanz der einzelnen Sachbilanzergebnisse.

In der abschließenden Phase der Ökobilanz bzw. dieser Masterarbeit erfolgt die Auswertung und der Vergleich der Ergebnisse der Sachbilanz sowie der Wirkungsabschätzung. In Bezug auf die definierte Zielsetzung dieser Studie erfolgt eine Zusammenfassung aller relevanten Resultate mit einer Diskussion über empfohlene Maßnahmen im Sinne einer Reduktion der Umweltwirkungen innerhalb des Systems Eisenbahnweiche.

Für die Modellierung der Ökobilanz wird das in Life-Cycle-Assessment führende Softwareprogramm SimaPro¹ herangezogen. Die Implementierung der Sachbilanz erfolgt dabei auf Basis von Datensätzen der ecoinvent² Datenbank.

¹ SimaPro, www.simapro.com

² ecoinvent, www.ecoinvent.org

2 Die Weiche

Weichen sind für ein funktionierendes Eisenbahnnetz eine Grundvoraussetzung [2]. Dem Schienengebundenen Verkehr ist erst durch den Einbau einer Weiche eine unterbrechungsfreie Fahrt während eines Gleiswechsels möglich. [3]

Durch Weichen wird die Kapazität einer Eisenbahnanlage erhöht. Für eine Netzbildung und effiziente Betriebsführung bilden sie die Grundlagen. Jedoch unterliegen Weichen, bedingt durch ihre Konstruktion, hohen dynamischen Beanspruchungen. Vor allem beim Übergang des Rades zwischen Flügelschiene und Herzstück, aber auch zwischen Flügelschiene und Backenschiene kommt es aufgrund der Unterbrechung der Radsatzführung zu hohen Verschleißerscheinungen. Deutlich höhere Instandhaltungsaufwände und geringere Nutzungsdauern gegenüber dem freien Streckengleis sind die Folge. [4]

Die hohe Kapitalbindung der Weiche durch Investition und laufender Instandhaltung erfordert eine sorgsame Prüfung jedes Weicheneinbaus. Eine einfache Weiche mit einem Abzweigradius von 500 m und einer gesamten Weichenlänge von ca. 40 m weist bereits vergleichbar hohe Kosten auf wie ein 0,5 km langes freies Gleisstück. Deshalb ist es notwendig, Weichen mit ausreichender Qualität zu verbauen und adäquater Instandhaltung zu warten, um das Maximum an Nutzungsdauer zu erhalten. [4]

Weichen können hinsichtlich ihrer Grundform unterschieden werden in:

- Einfache Weichen
- Bogenweichen
- Doppelweichen
- Kreuzungen
- Kreuzungsweichen [4]

Der Ausarbeitung der Ökobilanz wird die einfache Weiche zu Grunde gelegt.

Abbildung 1 zeigt einen schematischen Weichenaufbau. Die Weiche kann dabei grob untergliedert werden in:

- Zungenvorrichtung
- Zwischenschienen
- Herzstück mit Fahrschienen und Radlenker [4]

Die Weiche

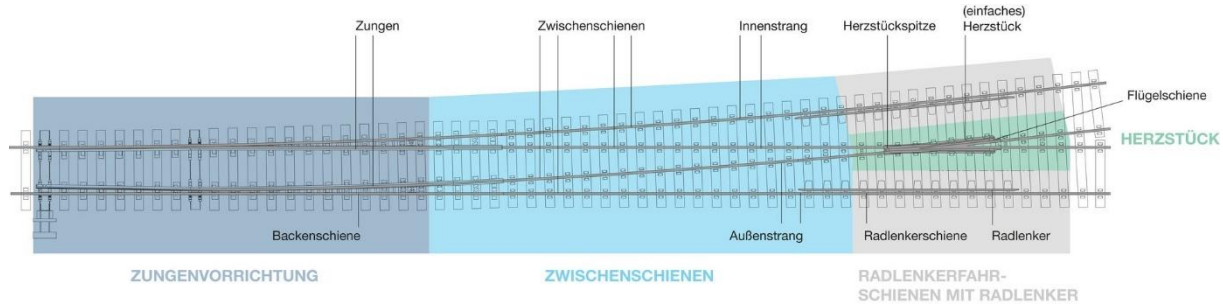


Abbildung 1: Weichenaufbau [4]

Einfache Weiche

Die einfachen Weichen bestehen aus einem geraden Hauptgleis und einem gekrümmten Zweiggleis. Mit Blickrichtung Weichenende wird die Weiche, abhängig von der Richtung des abzweigenden Stranges, als einfache Weiche links bzw. rechts bezeichnet. Bei einfachen Weichen erfolgt der Einbau generell ohne Überhöhung. [5]

Zungenvorrichtung

Durch die Zungenvorrichtung wird es dem Fahrzeug erlaubt, eine Richtungsänderung entweder in den Hauptstrang oder den Zweigstrang durchzuführen. [6]

Sie besteht aus zwei Zungenschienen und zwei Backenschienen. Die Beweglichen Zungenschienen ermöglichen die Richtungsgebung in den gewünschten Strang. [6]

Die Zungenkonstruktion kann dabei auf zwei Arten ausgeführt werden:

- Federzunge
- Federschienenzunge [6]

Im Fall der Federzunge befindet sich die Verbindung zwischen Zungenschiene und Regelprofil im starren hinteren Zungenteil. Weil die Ausschmiedung zum Regelprofil mit Schienenbefestigungen gesichert und der Schienenfuß innerhalb der Federstelle dadurch auf eine Länge von 1,50 m abgefräst werden kann, ist es möglich den Umstellwiderstand zu reduzieren. [6]

Bei der Federschienenzunge befindet sich der Übergang von Zunge auf Regelprofil noch im beweglichen Zungenteil. [6]

Zwischenschienen

Die Zwischenschienen bestehen aus unbearbeiteten Regelschienen, die die Zungenvorrichtung mit dem Herzstück verbindet. [6]

Herzstück mit Fahrschienen und Radlenker

Das Herzstück besteht aus der Herzstückspitze und zwei Flügelschienen. [6]

Um den geraden Schienenstrang bei einer Einfahrt in das Zweiggleis durchkreuzen zu können, muss die Schienenführung zwischen Herzstückspitze und Zwischenschiene unterbrochen werden. Innerhalb dieses Bereichs erfolgt keine Spurführung über den Spurkranz des Rades, weshalb am gegenüberliegenden Strang ein Radlenker angebracht wird, um ein Fehlsteuern zu verhindern. Die Lastabtragung übernimmt dabei jedoch immer der Schienenstrang. Der Radlenker hat in diesem Bereich ausschließlich Führungsaufgaben.[6]

Die Weichenkomponenten sind aufgrund dieser Unterbrechungen in den Fahrkanten hohen Schlagbelastungen und dadurch hohem Verschleiß ausgesetzt. [6]

3 Grundlagen der Ökobilanz

Die Ökobilanz ist eine Methode, die dem besseren Verständnis und zur Berücksichtigung der potenziellen Umweltwirkungen von Produkten und deren Nutzung sowie dahinterstehenden Prozessen dient. Die Entwicklung der Ökobilanz ist dabei auf das gestiegene Umweltbewusstsein zurückzuführen. [1]

Die Ökobilanz findet in verschiedenen Gebieten Anwendung. Dies umfasst bspw. die Entwicklung und Verbesserung von Produkten, strategische Planungen, politische Entscheidungsprozesse oder auch Marketingzwecke. Des Weiteren können Möglichkeiten zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten in ihren verschiedenen Lebenszyklusphasen aufgezeigt werden. [1]

Der gesamte Lebensweg eines Produktes, beginnend bei der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Recycling bis hin zur endgültigen Entsorgung wird in der Ökobilanz behandelt. Die Transportwege der einzelnen Lebensphasen werden ebenfalls berücksichtigt. Dabei werden vor allem Umweltaspekte und potenzielle Umweltwirkungen, wie z.B. das Nutzen von Ressourcen oder die Auswirkungen von Emissionen auf die Umwelt, betrachtet. Diese ganzheitliche Betrachtung ermöglicht das Erkennen und die eventuelle Vermeidung einer Verlagerung von Umweltwirkungen in einen anderen Abschnitt des Lebenszyklus. Soziale und ökonomische Aspekte eines Produktes werden üblicherweise im Rahmen einer Ökobilanz nicht berücksichtigt. [1]



Abbildung 2: Lebensweg eines Produktes

3.1 Normen

Die Durchführung einer Ökobilanz-Studie ist in mehreren Normen verankert. Die Anforderungen sowie die Anleitung für die Erstellung einer Ökobilanz sind in der ÖNORM EN ISO 14044 detailliert erklärt. Die Grundsätze und die Rahmenbedingungen sind in der ÖNORM EN ISO 14040 zu finden. [1]

3.2 Phasen einer Ökobilanz

Eine Ökobilanz-Studie beinhaltet vier Phasen, die nachfolgend aufgelistet und näher beschrieben werden.

- Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung [1]

Eine weitere Übersicht findet sich in *Abbildung 3* wieder. Diese Phasen werden zwar chronologisch abgearbeitet, stehen jedoch untereinander in Wechselwirkung, so dass ein iterativer Prozess entsteht:

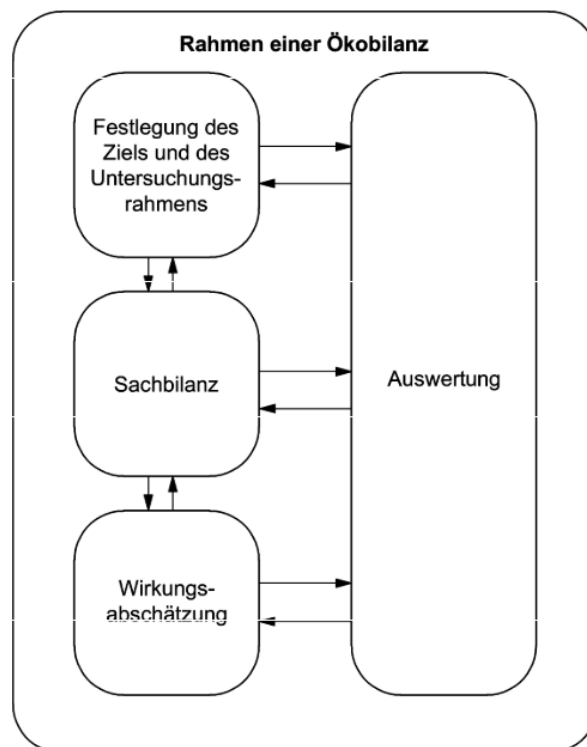


Abbildung 3: Phasen einer Ökobilanz [1]

3.2.1 Ziel und Untersuchungsrahmen

In der ersten Phase werden Ziel sowie Untersuchungsrahmen der Ökobilanz festgelegt. Je nach Zielsetzung kann dabei die Breite und Tiefe einer Ökobilanz deutlich schwanken. Der Untersuchungsrahmen sollte ausreichend genau definiert werden, so dass die Einzelheiten der Studie nicht im Widerspruch stehen und für das definierte Ziel angemessen sind. [1]

3.2.1.1 Ziel

Das Ziel umfasst die beabsichtigte Anwendung und die Gründe für die Durchführung der Ökobilanz-Studie. Außerdem soll die angesprochene Zielgruppe, d.h. für wen die Ergebnisse der Studie bestimmt sind, definiert werden. Auch die mögliche Verwendung der Ergebnisse in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen sollte in das Ziel miteinfließen. [1]

3.2.1.2 Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen umfasst das zu untersuchende Produktsystem und dessen Funktionen sowie die Systemgrenzen und den notwendigen Detaillierungsgrad. Er ist abhängig vom Untersuchungsgegenstand sowie vom vorgesehenen Anwendungsbereich der Studie und sollte deshalb auf die festgesetzten Ziele abgestimmt sein. [1]

Der Lebensweg eines Produktes wird in der Ökobilanz als Produktsystem modelliert und ist für die Ausführung einer bestimmten Funktion zuständig. Das Produktsystem wird dabei nicht nur durch sein Endprodukt definiert, sondern durch alle Maßnahmen, die zur Ausführung seiner Funktion erforderlich sind. [1]

Das Produktsystem wird in Prozessmodule unterteilt, welche durch Flüsse von Zwischenprodukten und/oder Abfallbehandlungen miteinander verbunden sind. Auch Verbindungen mit anderen Produktsystemen durch Produktflüsse oder Verbindungen mit der Umgebung durch Elementarflüsse sind vorhanden. [1]

Die Unterteilung des Produktsystems in Prozessmodule erleichtert die Identifikation von Inputs und Outputs. Während einige der Inputs zu Bestandteilen des Outputproduktes werden, gibt es auch jene Inputs (z.B. Betriebsstoffe), welche innerhalb eines Prozessmoduls verwendet werden und folglich kein Teil des Outputproduktes sind. Ein Prozessmodul kann auch andere Outputs, wie beispielsweise Elementarflüsse und/oder Produkte, erzeugen. [1]

Unter den Elementarflüssen versteht man die mit dem System verbundene Nutzung von Ressourcen sowie das Ausstoßen von Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Diese Daten sind die Ergebnisse der Sachbilanz und stellen die Eingangsdaten für die Wirkungsabschätzung dar. Auf Grundlage dieser Daten kann im Anschluss eine Auswertung erfolgen. [1]

Ein Beispiel für ein Produktsystem ist in *Abbildung 4* dargestellt.

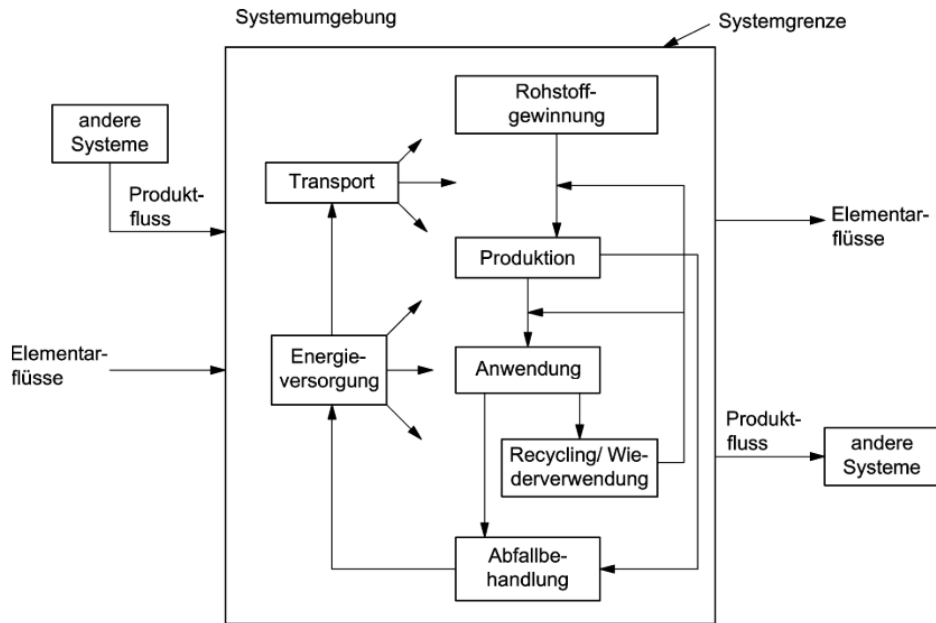


Abbildung 4: Aufbau eines Produktsystems [1]

Die Systemgrenze stellt die Grenze zwischen Produktsystem und Systemumgebung dar und bestimmt welche Prozessmodule Teil des Produktsystems sind. Im Idealfall sollte das Produktsystem so modelliert werden, dass die Inputs und Outputs an seinen Grenzen, d.h. an der Systemgrenze, Elementarflüsse sind. [1]

3.2.1.3 Funktionelle Einheit

Ein System kann mehrere Funktionen haben, die vom Ziel und vom Untersuchungsrahmen der Ökobilanz abhängen. Durch die Quantifizierung der Funktionen des Produktes wird eine funktionelle Einheit geschaffen. Diese Einheit ist notwendig, um eine Bezugsbasis für die Input- und Outputflüsse zu schaffen. Dadurch wird eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Ökobilanzen sichergestellt. Diese ist vor allem dann wichtig, wenn unterschiedliche Systeme bewertet werden. [1]

Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz, der um eine funktionelle Einheit aufgebaut ist. Sämtliche Analysen und Vergleiche sind auf diese funktionelle Einheit zu beziehen. [1]

3.2.2 Sachbilanz

Die zweite Phase der Ökobilanz ist die Erstellung einer Sachbilanz. Sie stellt eine Bestandsaufnahme der Inputdaten und Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System dar. Ebenso kommen Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems vor. Die Sachbilanz beinhaltet alle Daten, die zum Erreichen der Ziele erforderlich sind. [1]

Die Erstellung einer Sachbilanz erfolgt iterativ. Während der Datensammlung und der näheren Systemuntersuchung können neue Anforderungen oder Einschränkungen an die Daten festgestellt werden, die eine Änderung der Datenerhebung verlangen, damit die Ziele der Ökobilanz-Studie noch erreicht werden können. [1]

Abbildung 5 zeigt die wichtigsten In- und Outputs, welche bei der Betrachtung eines Prozessmoduls auftreten können.

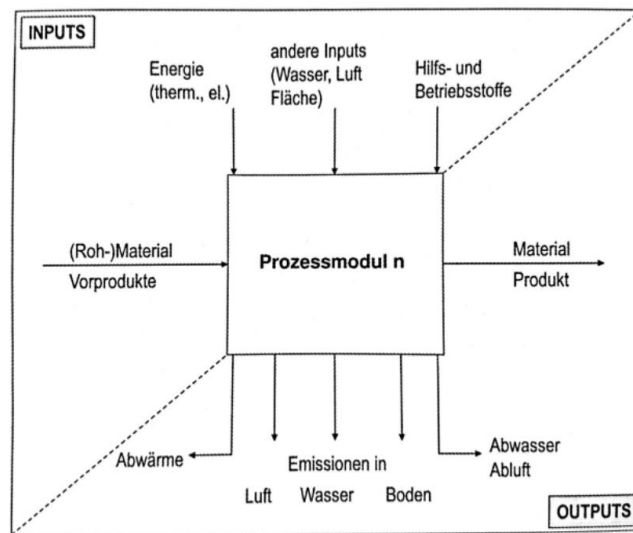


Abbildung 5: Prozessmodul eines Produktsystems [7]

3.2.3 Wirkungsabschätzung

Die Phase der Wirkungsabschätzung gilt als dritte Phase. In dieser Phase werden zusätzliche Informationen bereitgestellt, um die Einschätzung der Sachbilanzergebnisse eines Produktsystems zu unterstützen und deren Umweltrelevanz besser verstehen zu können. Demzufolge wird die Beurteilung der Bedeutung potenzieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Sachbilanzergebnisse angestrebt. Um die resultierenden potenziellen Wirkungen zu erkennen, werden die Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungen und Wirkungsindikatoren verknüpft. [1]

Abbildung 6 zeigt den Ablauf der Wirkungsabschätzung.

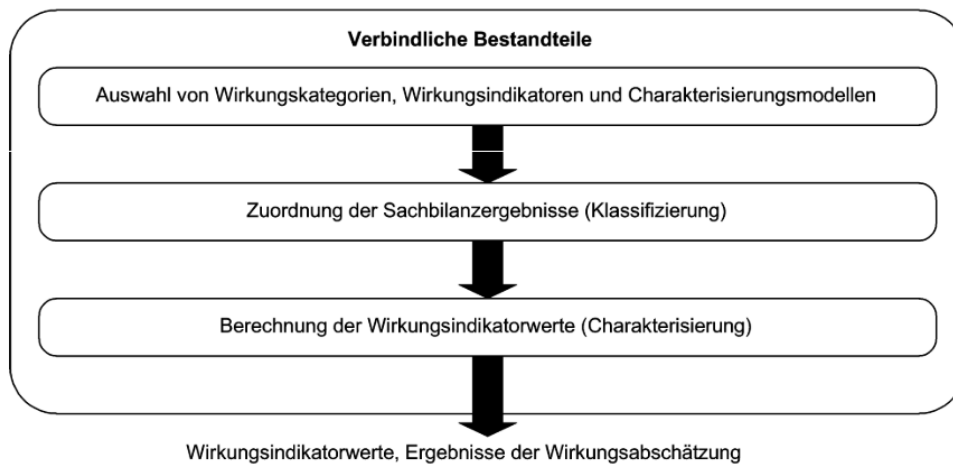


Abbildung 6: Wirkungsabschätzung [1]

3.2.4 Auswertung

Die abschließende Phase der Ökobilanz-Studie ist die Auswertung. Hier werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gemeinsam diskutiert und zusammengefasst. Es wird überprüft, ob die Ergebnisse in Einklang mit der Zielstellung und dem Untersuchungsrahmen sind und Empfehlungen, Schlussfolgerungen sowie Entscheidungshilfen formuliert. [1]

Die Auswertung sollte mit dem Ziel und Untersuchungsrahmen übereinstimmende Ergebnisse liefern, welche für Empfehlungen, Schlussfolgerungen und Erläuterungen dienen. [1]

4 Ziel und Untersuchungsrahmen

4.1 Ziel

Das Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung der Ökobilanz auf eine Eisenbahnweiche und die Auswertung der daraus resultierenden Ergebnisse. Dabei sollen Eisenbahnweichen mit unterschiedlichen Oberbautypen und Belastungsklassen modelliert und miteinander verglichen werden. Durch die Bestimmung der maßgebenden Emissionsauslöser innerhalb des Produktsystems Weiche soll die Ökobilanz als zusätzliche Entscheidungshilfe für strategische und umwelttechnische Maßnahmen dienen. Aufgrund der umwelttechnischen Modellierung der Weiche über den gesamten Lebenszyklus hinweg, können die Umweltwirkungen sowohl für einzelne Komponenten als auch Lebensphasen analysiert werden.

Insbesondere sollen im Zuge dieser Masterarbeit folgende Fragen im Detail beantwortet werden:

- Welche Komponenten sind die maßgebenden Emissionsauslöser innerhalb des Produktsystems Weiche?
- Innerhalb welcher Lebensphasen treten die größten Umweltwirkungen auf?
- Welcher Oberbautyp verursacht in Bezug auf Ressourcenverbrauch und Emissionen die geringsten negativen Umweltwirkungen?

Bevor diese Fragen jedoch beantwortet werden können, müssen vorab der Untersuchungsrahmen und die Systemgrenzen für die erstellende Ökobilanz festgelegt werden. Dies wird im folgenden Kapitel 4.2 erläutert.

4.2 Untersuchungsrahmen

Bevor mit der Erstellung einer Sachbilanz begonnen werden kann, ist der Untersuchungsrahmen inklusive dazugehöriger Systemgrenzen zu bestimmen. Für die Anwendung der Ökobilanz wird im Zuge dieser Arbeit eine einfache Weiche mit einem Abzweigradius von 500 m, einer Neigung von 1:14 und gutem Unterbauzustand herangezogen. Der Untersuchungsrahmen setzt sich dabei wie folgt zusammen:

- Oberbautyp

| Schwellentyp | Schienenprofil | Zungenbauart |
|------------------------|----------------|--------------|
| Betonschwelle | 60E1 | Fz |
| Besohlte Betonschwelle | 60E1 | Fz |
| Holzschwelle | 54E2 | Fsch |

Tabelle 1: Oberbauvarianten

- Belastungsklasse
 - Niedrig → 33.000 GesBT/Tag, Gleis
 - Mittel → 55.000 GesBT/Tag, Gleis
 - Hoch → 90.000 GesBT/Tag, Gleis
- Systemgrenzen
 - Erdplanum
 - Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb

Bedingt durch den Untersuchungsrahmen müssen im Zuge der Erstellung der Ökobilanz drei Weichenproduktsysteme entsprechend der vordefinierten Oberbautypen erstellt und jeweils mit den angegebenen Belastungsklassen modelliert werden. Die Systemgrenze stellt dabei einerseits das Erdplanum dar. Daraus folgt, dass zusätzlich zum Oberbau auch der Unterbau in die Auswertung der Ökobilanz berücksichtigt werden soll. Andererseits soll der Weichenantrieb des Stellsystems aus Gründen der zusätzlichen Komplexität des Antriebssystems in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden. Es wird empfohlen, eine eigene Ökobilanzierung der Antriebssysteme durchzuführen.

4.3 Funktionelle Einheit

Da es sich bei der Erstellung einer Ökobilanz um ein genormtes Verfahren handelt, welches sich auf eine Vielzahl unterschiedlichster Produkte bzw. Produktsysteme anwenden lässt, ist es von entscheidender Bedeutung, welche Einheit für die spätere Auswertung der Ergebnisse herangezogen werden soll. Gibt es bestehende oder zukünftig geplante Ökobilanzen von Produktsystemen mit ähnlicher oder gleicher Funktion, welche im Hinblick auf Ihre Umweltwirkungen und den daraus abgeleiteten strategischen Entscheidungen verglichen werden sollen, muss dieselbe funktionelle Einheit verwendet werden. Andernfalls ist eine Vergleichbarkeit nicht möglich und auch nicht zulässig.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Life-Cycle-Assessment (LCA) einer 500er Weiche mit verschiedenen Oberbautypen und unterschiedlichen Belastungsklassen. Diese unterschiedlichen Randbedingungen führen zu jeweils spezifischen Nutzungsdauern. Daher ist es nicht ausreichend, die 500er Weiche als funktionelle Einheit zu bestimmen. Um sicherzustellen, dass alle aus dem Untersuchungsrahmen resultierende Varianten bzw. Produktsysteme miteinander vergleichbar sind, muss noch eine zeitliche Komponente in dieser funktionellen Einheit berücksichtigt werden.

Die für diese Arbeit gewählte funktionelle Einheit lautet deshalb wie folgt:

- Bereitstellung einer EW 500 für 1 Jahr

Durch die jährliche Darstellung der Ergebnisse aus der Ökobilanz werden die Umweltwirkungen unter Berücksichtigung der Nutzungsdauern vergleichbar gemacht.

Damit die Vergleichbarkeit jedoch nicht nur auf die EW 500 beschränkt bleibt, sondern auch einfache Weichen mit anderen Abzweiggraden berücksichtigt werden können, bedarf es weiterer Überlegungen. Unter der Annahme, dass es innerhalb der Gruppe von einfachen Weichen keine zu großen Unterschiede in der technischen Ausführung gibt, ermöglicht die richtige Modellierung der Ökobilanz eine Skalierbarkeit der Ergebnisse auf einfache Weichen mit größeren oder kleineren Abzweiggraden. Zu diesem Zweck muss die oben angeführte funktionelle Einheit um eine Gewichtskomponente ergänzt werden.

Die funktionelle Einheit für den Vergleich einfacher Weichen mit unterschiedlichen Abzweiggraden lautet:

- Bereitstellung von 1 kg der EW 500 für 1 Jahr

Wird das Modell der Ökobilanz so erstellt, dass alle In- und Outputs des Produktes Weiche auf 1 kg der Gesamtmasse der Weiche bezogen werden, kann mit Hilfe der Gesamtge-

wichtsangabe einer einfachen Weiche mit einem anderen Abzweigradius die Ökobilanz berechnet und mit der EW 500 verglichen werden. Der Vorteil liegt darin, nicht für jeden existierenden Abzweigradius einer einfachen Weiche eigens eine Ökobilanz anfertigen zu müssen. Natürlich gilt das nur unter der zuvor bestimmten Annahme, dass es innerhalb der Weichengruppe der einfachen Weichen kaum Unterschiede in der technischen Ausführung gibt. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass dieser Sachverhalt im Zuge dieser Masterarbeit nicht untersucht wurde.

5 Sachbilanz

Die Sachbilanz beschäftigt sich mit der Bestandsaufnahme von Input- und Outputdaten des Produktsystems Weiche und gilt somit als aufwendigster Teil einer Ökobilanz. Das Produktsystem bildet dabei den kompletten Lebenszyklus der Weiche ab. Dieser reicht von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, der Anwendung bis hin zum Recycling sowie der Abfallbehandlung. Dabei wird nicht nur der Materialinput, sondern auch der Energiebedarf und die notwendigen Transportwege berücksichtigt. Mit Hilfe der gesammelten Daten werden in weiterer Folge die sogenannten Elementarflüsse bestimmt. Laut ÖNORM EN ISO 14040 bilden die sogenannten Elementarflüsse das Ergebnis der Sachbilanz. Diese Elementarflüsse stehen auf der Inputseite des Produktsystems für den Verbrauch von Ressourcen und auf der Outputseite für die Emissionen in Luft, Wasser und Boden. Das Ergebnis der Sachbilanzphase wird in weiterer Folge als Input für die Wirkungsabschätzungsphase herangezogen, in welcher die Sachbilanzergebnisse Wirkungskategorien zugeordnet und die Wirkungswerte für die spätere Auswertung berechnet werden. [1]

In diesem Kapitel erfolgt nun die Bestandsaufnahme aller Input- und Outputdaten mit gleichzeitiger Darstellung der Modellierung in SimaPro. Dabei wird die Bestandsaufnahme wie folgt untergliedert:

- Herstellung
- Transport
- Einbau
- Instandhaltung
- End of Life (EOL)

5.1 Herstellung

Für die Bestandsaufnahme der Daten wurden von der voestalpine VAE GmbH Weichenstücklisten einer Holzschwellenweiche und Betonschwellenweiche entsprechend der Vorgaben des Untersuchungsrahmens zur Verfügung gestellt. Diese Weichenstücklisten wurden als Hauptdatenquelle für den Materialinput der Weichenherstellung verwendet und beinhalten einen Großteil der in den Produktsystemen verbauten Komponenten.

Diese Komponenten gilt es zu Beginn der Sachbilanz grob in Materialgruppen zu untergliedern. *Abbildung 7* zeigt die verwendeten Materialgruppen der Holz- und der Betonschwellenweiche, die auf Grundlage der Weichenstücklisten gewählt wurden.

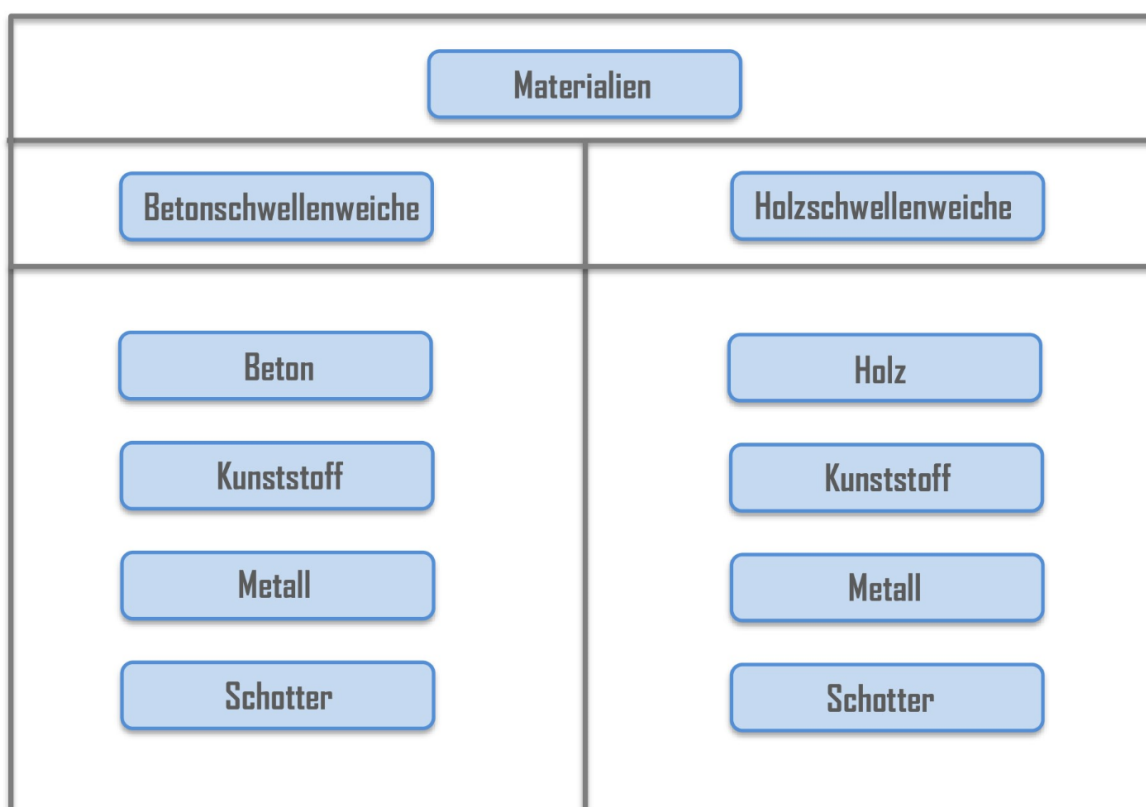


Abbildung 7: Materialgruppierung der Weichen

Diese grobe Unterteilung hilft dabei den Überblick der Vielzahl an Komponenten zu wahren und die Nachvollziehbarkeit des späteren Modells zu gewährleisten.

Diese Einteilung ist jedoch für die eigentliche Bestandsaufnahme der einzelnen Komponenten zu ungenau. Deshalb erfolgt auf Basis dieser ersten Grobeinteilung, eine feinere Untergliederung der Materialgruppen.

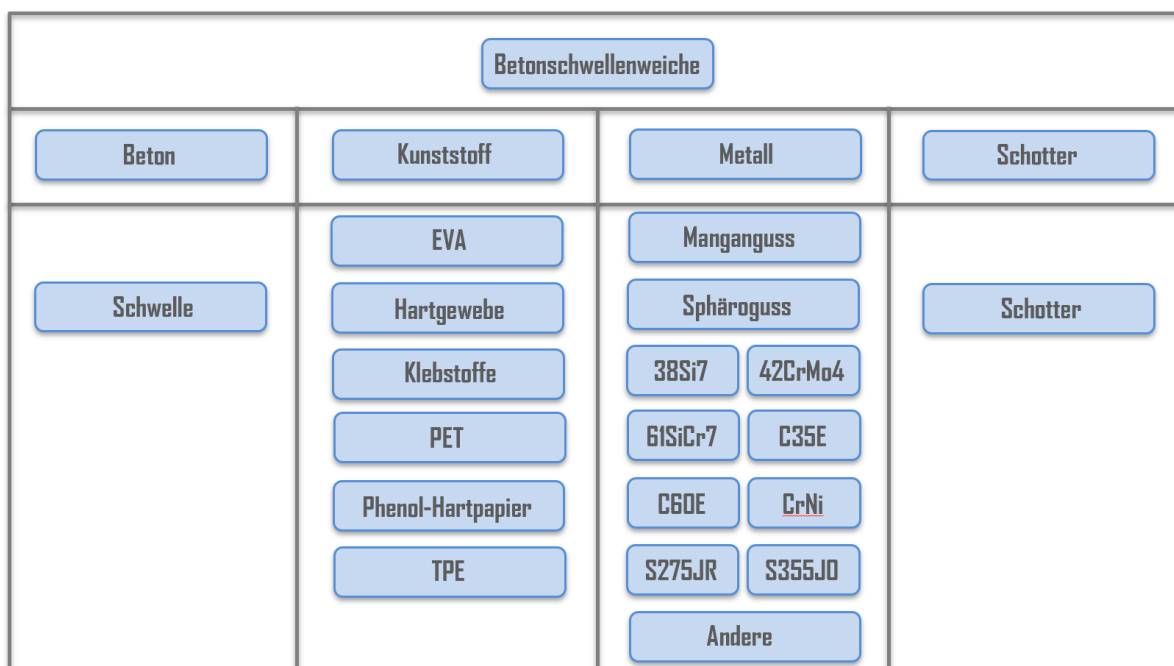


Abbildung 8: Unterklassifizierung der Materialgruppen

Abbildung 8 zeigt den Strukturaufbau, der für die komponentenspezifische Materialzuweisung der Betonschwellenweiche gewählt wurde. Man sieht, dass viele Materialunterklassen benötigt werden. Dies ergibt sich aufgrund der großen Anzahl an unterschiedlichen Weichenkomponenten aus Kunststoff und Metall.

Die Materialzuweisung der einzelnen Komponenten erfolgt dabei auf unterschiedliche Weise. Teilweise werden in den Stücklisten den einzelnen Komponenten bereits Materialien zugewiesen oder können über die jeweiligen Datenblätter der Hersteller herausgefunden werden. Fehlt diese genaue Materialbezeichnung, müssen andere Wege zur Bestimmung des Materials gefunden werden. Gibt es beispielsweise Informationen über die jeweilige Festigkeitsklasse einer Metallkomponente, kann über internationale Normen auf den Werkstoff rückgeschlossen werden. Wenn es dabei mehrere Auswahlmöglichkeiten gibt, muss eine Annahme getroffen werden.

Gibt es weder eine genaue Materialbezeichnung noch andere Informationen, wie beispielsweise die Festigkeitsklasse, bleibt noch die Möglichkeit über Ähnlichkeiten zwischen den Komponenten eine Annahme zu treffen. Als Beispiel sollen zwei Sechskantschrauben mit ähnlichen Dimensionen herangezogen werden. Ist von einer Sechskantschraube das Material bereits bekannt, von der anderen jedoch nicht, wird die Annahme getroffen, dass beide aus demselben Material bestehen.

Kann aufgrund fehlender ähnlicher Komponenten auch diese Art der Materialbestimmung nicht angewendet werden, müssen schlussendlich reine Annahmen getroffen werden. Oftmals müssen im Zuge solcher Annahmen dieselben Materialien zugewiesen werden, weil es keine passenden Datensätze in der in SimaPro hinterlegten ecoinvent Datenbank gibt.

Alle Komponenten wie Zungenschienen, Backenschienen und Fahrschienen, die aus Schienen der voestalpine Schienen GmbH hergestellt werden, werden keinem der zuvor bestimmten Materialien, sondern dem Sammelbegriff „Schiene“ zugewiesen. Dies liegt daran, dass für Schienen der voestalpine Schienen GmbH bereits ein eigener Datensatz in SimaPro existiert. Dieser wurde im Zuge der Erstellung einer Ökobilanz für das freie Streckengleis erstellt [8]. Dieser Datensatz wird unverändert für alle Schienenstahlkomponenten in die Ökobilanz der Weiche übernommen.

Ebenso wurde ein Datensatz für den Spannstahl der Betonschwellen, welcher wie der Schienendatensatz eigens für die Ökobilanzierung des freien Streckengleises erstellt wurde, verwendet. Jedoch führt dieser Datensatz in den späteren Berechnungen zu einer deutlichen Überzeichnung der Umweltwirkungen der Weichenbetonschwellen als im Vergleich zu jenen der Gleisbetonschwellen. Das liegt daran, dass in Weichenbetonschwellen aufgrund ihrer Länge im Vergleich zu Gleisbetonschwellen ein Vielfaches der Menge an Spannstahl benötigt wird. Weitere Untersuchungen zeigten, dass die vorhandene Modellierung des Spannstahls nicht plausibel auf die Ökobilanz der Eisenbahnschwelle anwendbar ist. Aus diesem Grund wird der verbaute Spannstahl in den Weichenschwellen mit dem ecoinvent Datensatz eines herkömmlichen Bewehrungsstahls modelliert.

Da es sich bei den Stücklisten um sensible Unternehmensdaten handelt, wird davon Abstand genommen, die komponentenspezifischen Materialzuweisungen tabellarisch darzustellen.

Nach Abschluss der Materialzuweisungen, werden die Einzelkomponenten der Stücklisten aus Gründen der Modellier- und späteren Auswertbarkeit zu folgenden Hauptkomponenten der Weiche zusammenfasst:

- Zungenvorrichtung
- Herzstück
- Fahrschiene + Radlenker
- Rippenplatten
- Befestigungsmaterial

Sachbilanz

- Zwischenlagen
- Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb
- Schwellen
- Schwellenbesohlung

Darüber hinaus ist ebenso als Eingangsmaterial für die Sachbilanz folgendes Material zu erfassen:

- Schotter

In den folgenden Abschnitten werden die Bestandsaufnahmen aller Materialinputs je Hauptkomponente entsprechend des Oberbautyps der Weiche zusammengefasst. Es ist wichtig, das Gewicht der Komponenten vor ihrer Bearbeitung im jeweiligen Weichenwerk für die Ökobilanzierung heranzuziehen, da auch der Verschnitt von Material einen Ressourcenverbrauch darstellt. Deshalb müssen alle im Zuge der Herstellung verbrauchten Ressourcen berücksichtigt werden, nicht nur das Nettogewicht der fertigen Weiche.

Zusätzlich werden die Ressourcen- und Energieaufwände der Weichenwerke erfasst und anteilig den zu untersuchenden Weichen angerechnet.

5.1.1 Holzschwellenweiche

| | Zungenvorrichtung | |
|------------------------|-------------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schiene | 3.983,66 | 96,44 |
| Gussteile (Sphäroguss) | 83,40 | 2,02 |
| Stahlteile (38Si7) | 2,16 | 0,05 |
| Stahlteile (42CrMo4) | 18,56 | 0,45 |
| Stahlteile (C35E) | 12,20 | 0,30 |
| Stahlteile (E295) | 24,28 | 0,59 |
| Stahlteile (S235JR) | 0,88 | 0,02 |
| Stahlteile (S335J2G3) | 5,76 | 0,14 |
| Summe | 4.130,90 | 100,00 |

Tabelle 2: Sachbilanz Zungenvorrichtung – Holzschwellenweiche [9]

Die Zungenvorrichtung (ZV) ist jener Teil der Holzschwellenweiche, dessen Einzelkomponenten aus der größten Anzahl an unterschiedlichen Werkstoffen bestehen.

Tabelle 2 zeigt, dass das Schienenmaterial deutlich den größten Anteil am Gesamtgewicht der Zungenvorrichtung für sich beansprucht. Das Gesamtgewicht der Zungenvorrichtung für die Holzschwellenweiche beträgt 4.130,90 kg.

| | FAS+RADL | |
|---------------------|----------|--------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schiene | 5.020,78 | 99,70 |
| Stahlteile (38Si7) | 1,62 | 0,03 |
| Stahlteile (C35E) | 11,88 | 0,24 |
| Stahlteile (S235JR) | 1,80 | 0,04 |
| Summe | 5.036,08 | 100,00 |

Tabelle 3: Sachbilanz Fahrschienen und Radlenker – Holzschwellenweiche [9]

Tabelle 3 enthält die Ergebnisse der Sachbilanz für die Fahrschienen und Radlenker der Holzschwellenweiche. Das Gesamtgewicht von 5.036,08 kg wird dabei fast zur Gänze vom Schienenmaterial gestellt. Dies liegt daran, dass nicht nur die Fahrschienen dem Schienenmaterial zugewiesen werden, sondern aus Gründen der Vereinfachung angenommen wird, dass auch die Radlenker aus demselben Material bestehen.

| | Herzstück | |
|--------------------|-----------|--------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schiene | 845,84 | 51,37 |
| Gussteile (Mangan) | 790,00 | 47,98 |
| Stahlteile (CrNi) | 2,16 | 0,13 |
| Sprengstoffe | 8,50 | 0,52 |
| Summe | 1.646,50 | 100,00 |

Tabelle 4: Sachbilanz Herzstück – Holzschwellenweiche [9]

Der Bereich des Herzstückes, bestehend aus Schienenzwischenstücken und dem eigentlichen Herzstück aus Manganguss, hat ein Gesamtgewicht von 1.646,50 kg (siehe *Tabelle 4*). Für die Sprengverfestigung des Herzstückes ist der Holzschwellenstückliste eine Sprengstoffangabe von 8,50 kg entnommen worden.

| | Rippenplatten | |
|---------------------|---------------|--------|
| Material | [kg] | [%] |
| Stahlteile (S275JR) | 2.901,50 | 100,00 |
| Summe | 2.901,50 | 100,00 |

Tabelle 5: Sachbilanz Rippenplatten – Holzschwellenweiche [9]

Table 5 zeigt das Material und das Gesamtgewicht des Rippenplattensatzes der Holzschwellenweiche.

| Material | Befestigungsmaterial | |
|----------------------|----------------------|---------------|
| | [kg] | [%] |
| Stahlteile (38Si7) | 657,67 | 48,78 |
| Stahlteile (42CrMo4) | 670,80 | 49,76 |
| Stahlteile (C35E) | 13,33 | 0,99 |
| Stahlteile (S235JR) | 6,31 | 0,47 |
| Summe | 1.348,11 | 100,00 |

Table 6: Sachbilanz Befestigungsmaterial – Holzschwellenweiche [9]

Das Befestigungsmaterial besteht aus Stahlwerkstoffen mit hohen Silizium-, Chrom- und Molybdänanteil. Das Gesamtgewicht wird in Table 6 mit 1.348,11 kg angegeben.

| Material | Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb | |
|---------------------|--|---------------|
| | [kg] | [%] |
| Stahlteile (38Si7) | 0,38 | 0,04 |
| Stahlteile (C35E) | 4,20 | 0,41 |
| Stahlteile (S355J0) | 1.026,83 | 99,56 |
| Summe | 1.031,41 | 100,00 |

Table 7: Sachbilanz Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb - Holzschwellenweiche [9]

Für das Stellen und Sichern der Zungenschienen werden, ohne Berücksichtigung des Weichenantriebs, Materialien mit einem Gesamtgewicht von 1.031,41 kg verbaut (siehe Table 7). Der Weichenantrieb wird in dieser Ökobilanz aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt.

| Material | Zwischenlagen | |
|--------------------------------|---------------|---------------|
| | [kg] | [%] |
| Kunststoffe (Ethylvinylacetat) | 45,00 | 100,00 |
| Summe | 45,00 | 100,00 |

Table 8: Sachbilanz Zwischenlagen – Holzschwellenweiche [9]

Table 8 zeigt den Materialbedarf der Zwischenlagen.

| | Holzschwellen | |
|---------------|------------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Holz | 8.974,18 | 84,00 |
| Imprägnierung | 1.709,37 | 16,00 |
| Summe | 10.683,55 | 100,00 |

Tabelle 9: Sachbilanz Holzschwellen – Holzschwellenweiche [8][9]

Tabelle 9 gibt den Holz- sowie den Imprägnierungsmittelanteil des kompletten Holzschwellensatzes an. Die Bestimmung des Imprägnierungsmittelanteils erfolgt in Anlehnung der Ökobilanzierung des freien Streckengleises. [8]

| | Holzschwellenweiche | |
|--|---------------------|---------------|
| Hauptkomponenten | [kg] | [%] |
| Zungenvorrichtung | 4.130,90 | 15,40 |
| Herzstück | 1.646,50 | 6,14 |
| FAS+RADL | 5.036,08 | 18,78 |
| Rippenplatten | 2.901,50 | 10,82 |
| Befestigungsmaterial | 1.348,11 | 5,03 |
| Zwischenlagen | 45,00 | 0,17 |
| Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb | 1.031,41 | 3,85 |
| Holzschwellen | 10.683,55 | 39,83 |
| Summe | 26.823,05 | 100,00 |

Tabelle 10: Sachbilanz Holzschwellenweiche [9]

Betrachtet man alle Hauptkomponenten und addiert ihre Massen, ergibt sich ein Gesamtgewicht der Holzschwellenweiche von 26.823,05 kg (siehe Tabelle 10).

| Input Holzschwellenweiche - Weichenwerk Wörth | | | | | | | |
|---|-----------|-------------------|--------------|---------------------|----------------|---------------------|--------------|
| Input [kg] | Menge | Umrechnungsfaktor | Umrechnung | ausgelieferte Masse | Input/kg | Weiche ohne ZV & HZ | Input/Weiche |
| Elektrizität Wasserkraft | - | 3.600 MJ | - | 21652983 | - | 21046 | - |
| Elektrizität Extern | 945 MWh | 3 600 MJ | 3 402 480 MJ | | 0,157136776 kg | | 3 307 MJ |
| Diesel | 29 833 l | 0,874 kg/l | 26 074 kg | | 0,001204191 kg | | 25,34 kg |
| Benzin | 3 183 l | 0,780 kg/l | 2 483 kg | | 0,000114672 kg | | 2,41 kg |
| Heizung: Fernwärme | 1 724 MWh | 3 600 MJ | 6 205 200 MJ | | 0,286574829 kg | | 6 031 MJ |
| Heizung: Erdgas | - | 0,750 kg/m³ | - | | - | | - |
| Prozessgase: Erdgas | - | 0,750 kg/m³ | - | | - | | - |
| Prozessgase: Propan | 260 kg | - | - | | 0,000012008 kg | | 0,25 kg |
| Prozessgase: Azetylen | 2 233 kg | - | - | | 0,000103142 kg | | 2,17 kg |
| Wasser | 4 946 m³ | - | - | | 0,000228421 kg | | 4,81 m³ |

Tabelle 11: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Wörth – Holzschwellenweiche [10]

Der Anteil der Holzschwellenweiche am Ressourcen- und Energieverbrauch des Weichenwerkes in Wörth wird in Tabelle 11 angegeben. Für die Bestimmung dieser Anteile, die der Holzschwellenweiche zugeschrieben werden können, werden die einzelnen Aufwände den gesamten ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes Wörth gegenübergestellt. Dadurch lassen sich die Anteile an Ressourcen und Energie pro Kilogramm ausgelieferter

Sachbilanz

Masse bestimmen. Werden diese Werte mit dem Gewicht der zu untersuchenden Holzschwellenweiche multipliziert, erhält man die Anteile der Weiche an den verbrauchten Ressourcen und Energien des Weichenwerkstandortes.

Es ist anzumerken, dass das angegebene Gesamtgewicht der Holzschwellenweiche von 21.046 kg nicht die Gewichtsanteile der Zungenvorrichtung und des Herzstücks beinhaltet. Dies liegt an der Tatsache, dass diese beiden Komponenten im Weichenwerk Zeltweg bearbeitet werden und nicht in Wörth. Die Anteile am Ressourcen- und Energieverbrauch des Standortes Zeltweg, bezogen auf das Gewicht der Zungenvorrichtung und des Herzstücks der Holzschwellenweiche, wird in *Tabelle 12* dargestellt.

Die Standortaufwände in *Tabelle 11* und *Tabelle 12* sind bereits über die drei Geschäftsjahre von 2015 bis 2017 gemittelt und beziehen sich auf die gesamt ausgelieferten Produktmassen des jeweiligen Weichenwerkes. Diese Mittelung soll eventuelle ungewöhnliche Einzelvorkommnisse eines Geschäftsjahres glätten.

| Input Holzschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | | | |
|---|-------------------------|------------------------|---------------|---------------------|----------------|---------|---------------------|
| Input [kg] | Menge | Umrechnungsfaktor | Umrechnung | ausgelieferte Masse | Input/kg | ZV & HZ | Input/Weiche |
| Elektrizität Wasserkraft | 6 997 MWh | 3 600 MJ | 25 189 200 MJ | 37284000 | 0,675603476 MJ | 5777 | 3 903 MJ |
| Elektrizität Extern | 1 139 MWh | 3 600 MJ | 4 100 400 MJ | | 0,109977470 MJ | | 635 MJ |
| Diesel | 89 675 l | 0,874 kg/l | 78 376 kg | | 0,002102134 kg | | 12,14 kg |
| Benzin | 2 469 l | 0,780 kg/l | 1 926 kg | | 0,000051653 kg | | 0,30 kg |
| Heizung: Fernwärme | 5 215 MWh | 3 600 MJ | 18 774 000 MJ | | 0,503540393 MJ | | 2 909 MJ |
| Heizung: Erdgas | 154 350 Nm ³ | 0,75 kg/m ³ | 115 763 kg | | 0,003104884 kg | | 17,94 kg |
| Prozessgase: Erdgas | 214 967 Nm ³ | 0,75 kg/m ³ | 161 225 kg | | 0,004324248 kg | | 24,98 kg |
| Prozessgase: Propan | 22 780 kg | - | - | | 0,000610986 kg | | 3,53 kg |
| Prozessgase: Azetylen | 1 245 kg | - | - | | 0,000033392 kg | | 0,19 kg |
| Wasser | 24 200 m ³ | - | - | | 0,000649072 kg | | 3,75 m ³ |

Tabelle 12: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – Holzschwellenweiche [10]

5.1.2 Betonschwellenweiche

| Material | Zungenvorrichtung | |
|------------------------|-------------------|---------------|
| | [kg] | [%] |
| Schiene | 4.392,00 | 97,48 |
| Gussteile (Sphäroguss) | 36,36 | 0,81 |
| Stahlteile (38Si7) | 1,62 | 0,04 |
| Stahlteile (42CrMo4) | 8,08 | 0,18 |
| Stahlteile (C35E) | 10,86 | 0,24 |
| Stahlteile (S355J0) | 56,84 | 1,26 |
| Summe | 4.505,76 | 100,00 |

Tabelle 13: Sachbilanz Zungenvorrichtung – Betonschwellenweiche [11]

Tabelle 13 zeigt, dass das Schienenmaterial deutlich den größten Anteil am Gesamtgewicht der Zungenvorrichtung für sich beansprucht. Das Gesamtgewicht der Zungenvorrichtung für die Betonschwellenweiche beträgt 4.505,76 kg.

| | FAS+RADL | |
|--------------------------------------|-----------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schiene | 3.308,00 | 97,46 |
| Stahlteile (42CrMo4) | 7,48 | 0,22 |
| Stahlteile (C60E) | 75,20 | 2,22 |
| Klebstoffe | 3,20 | 0,09 |
| Klebstoffe (Hartgewebe) | 0,22 | 0,01 |
| Klebstoffe (Polyethylenterephthalat) | 0,03 | 0,00 |
| Kunststoffe (Phenol-Hartpapier) | 0,18 | 0,01 |
| Summe | 3.394,31 | 100,00 |

Tabelle 14: Sachbilanz Fahrschienen und Radlenker – Betonschwellenweiche [11]

Tabelle 14 enthält die Ergebnisse der Sachbilanz für die Fahrschienen und Radlenker der Betonschwellenweiche. Das Gesamtgewicht von 3.394,31 kg wird dabei fast zur Gänze vom Schienenmaterial gestellt. Dies liegt daran, dass nicht nur die Fahrschienen dem Schienenmaterial zugewiesen werden, sondern aus Gründen der Vereinfachung angenommen wird, dass auch die Radlenker aus demselben Material bestehen.

| | Herzstück | |
|--------------------|-----------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schiene | 499,60 | 36,41 |
| Gussteile (Mangan) | 870,00 | 63,41 |
| Stahlteile (CrNi) | 2,40 | 0,17 |
| Summe | 1.372,00 | 100,00 |

Tabelle 15: Sachbilanz Herzstück – Betonschwellenweiche [11]

Der Bereich des Herzstückes, bestehend aus Schienenzwischenstücken und dem eigentlichen Herzstück aus Manganguss, hat ein Gesamtgewicht von 1.372,00 kg (siehe Tabelle 15).

| | Rippenplatten | |
|------------------------|-----------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Gussteile (Sphäroguss) | 900,68 | 23,86 |
| Stahlteile (61SiCr7) | 36,52 | 0,97 |
| Stahlteile (S275JR) | 2.515,70 | 66,64 |
| Stahlteile (S355J0) | 322,32 | 8,54 |
| Summe | 3.775,22 | 100,00 |

Tabelle 16: Sachbilanz Rippenplatten – Betonschwellenweiche [11]

Tabelle 16 zeigt das Material und das Gesamtgewicht des Rippenplattensatzes der Betonschwellenweiche.

| | Befestigungsmaterial | |
|---------------------|----------------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Stahlteile (38Si7) | 339,05 | 28,05 |
| Stahlteile (C35E) | 864,59 | 71,52 |
| Stahlteile (S235JR) | 5,30 | 0,44 |
| Summe | 1.208,94 | 100,00 |

Tabelle 17: Sachbilanz Befestigungsmaterial – Betonschwellenweiche [11]

Das Befestigungsmaterial besteht aus Stahlwerkstoffen mit hohem Siliziumanteil. Das Gesamtgewicht wird in *Tabelle 17* mit 1.208,94 kg angegeben.

| | Zwischenlagen | |
|---|---------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Kunststoffe (Ethylvinylacetat) | 119,60 | 76,86 |
| Kunststoffe (Thermoplastic Polyester Elastomer) | 36,00 | 23,14 |
| Summe | 155,60 | 100,00 |

Tabelle 18: Sachbilanz Zwischenlagen – Betonschwellenweiche [11]

Tabelle 18 zeigt den Materialbedarf der Zwischenlagen.

| | Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb | |
|---------------------|--|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Stahlteile (38Si7) | 0,38 | 0,04 |
| Stahlteile (C35E) | 4,20 | 0,41 |
| Stahlteile (S355J0) | 1.026,83 | 99,56 |
| Summe | 1.031,41 | 100,00 |

Tabelle 19: Sachbilanz Verschluss und Umstellgestänge ohne Weichenantrieb – Betonschwellenweiche [11]

Für das Stellen und Sichern der Zungenschienen werden ohne Berücksichtigung des Weichenantriebs, Materialien mit einem Gesamtgewicht von 1.031,41 kg verbaut (siehe *Tabelle 19*). Der Weichenantrieb wird in dieser Ökobilanz aus Gründen der Vereinfachung nicht berücksichtigt.

| | Betonschwellen | |
|--------------|------------------|---------------|
| Material | [kg] | [%] |
| Beton C50/60 | 51.172,38 | 97,31 |
| Spannstahl | 1.224,00 | 2,33 |
| Bewehrung | 30,60 | 0,06 |
| Metall | 81,09 | 0,15 |
| Kunststoff | 81,09 | 0,15 |
| Summe | 52.589,16 | 100,00 |

Tabelle 20: Sachbilanz Betonschwellen – Betonschwellenweiche [12]

Tabelle 20 zeigt die Verteilung der Werkstoffe des kompletten Betonschwellensatzes. Es ist deutlich erkennbar, dass der Anteil des Spannstahles auf Grund der Länge von Weichenschwellen deutlich höher ist als jener der herkömmlichen Bewehrung. Die Materialien Metall und Kunststoff repräsentieren die Dübel, die für das Verschrauben des Befestigungsmaterials notwendig sind. Da das Verhältnis Kunststoff zu Metall unbekannt ist, wird ein Anteil von je 50% angenommen. [12]

| | Betonschwellenweiche | |
|--|----------------------|---------------|
| Hauptkomponenten | [kg] | [%] |
| Zungenvorrichtung | 4.505,76 | 6,62 |
| Herzstück | 1.372,00 | 2,02 |
| FAS+RADL | 3.394,31 | 4,99 |
| Rippenplatten | 3.775,22 | 5,55 |
| Befestigungsmaterial | 1.208,94 | 1,78 |
| Zwischenlagen | 155,60 | 0,23 |
| Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb | 1.031,41 | 1,52 |
| Betonschwellen | 52.589,16 | 77,30 |
| Summe | 68.032,40 | 100,00 |

Tabelle 21: Sachbilanz Betonschwellenweiche [11][12]

Betrachtet man alle Hauptkomponenten und addiert ihre Massen, ergibt sich ein Gesamtgewicht der Betonschwellenweiche von 68.032,40 kg (siehe *Tabelle 21*).

Sachbilanz

| Input Betonschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | | | |
|--|-------------------------|------------------------|---------------|---------------------|----------------|----------------------|----------------------|
| Input [kg] | Menge | Umrechnungsfaktor | Umrechnung | ausgelieferte Masse | Input/kg | Gesamtgewicht Weiche | Input/Weiche |
| Elektrizität Wasserkraft | 6 997 MWh | 3 600 MJ | 25 189 200 MJ | 37284000 | 0,675603476 MJ | 68032 | 45 963 MJ |
| Elektrizität Extern | 1 139 MWh | 3 600 MJ | 4 100 400 MJ | | 0,109977470 MJ | | 7 482 MJ |
| Diesel | 89 675 l | 0,874 kg/l | 78 376 kg | | 0,002102134 kg | | 143,01 kg |
| Benzin | 2 469 l | 0,780 kg/l | 1 926 kg | | 0,000051653 kg | | 3,51 kg |
| Heizung: Fernwärme | 5 215 MWh | 3 600 MJ | 18 774 000 MJ | | 0,503540393 MJ | | 34 257 MJ |
| Heizung: Erdgas | 154 350 Nm ³ | 0,75 kg/m ³ | 115 763 kg | | 0,003104884 kg | | 211,23 kg |
| Prozessgase: Erdgas | 214 967 Nm ³ | 0,75 kg/m ³ | 161 225 kg | | 0,004324248 kg | | 294,19 kg |
| Prozessgase: Propan | 22 780 kg | - | - | | 0,000610986 kg | | 41,57 kg |
| Prozessgase: Azetylen | 1 245 kg | - | - | | 0,000033392 kg | | 2,27 kg |
| Wasser | 24 200 m ³ | - | - | | 0,000649072 kg | | 44,16 m ³ |

Tabelle 22: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – Betonschwellenweiche [13]

Der Anteil der Betonschwellenweiche am Ressourcen- und Energieverbrauch des Weichenwerkes in Zeltweg wird in *Tabelle 22* angegeben. Für die Bestimmung dieser Anteile, die der Betonschwellenweiche zugeschrieben werden können, werden die einzelnen Aufwände den gesamt ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes Zeltweg gegenübergestellt. Dadurch lassen sich die Anteile an Ressourcen und Energie pro Kilogramm ausgelieferter Masse bestimmen. Werden diese Werte mit dem Gewicht der zu untersuchenden Betonschwellenweiche multipliziert, erhält man die Anteile der Weiche an den verbrauchten Ressourcen und Energien des Weichenwerkstandortes.

Der Standortaufwand in *Tabelle 22* ist bereits über die drei Geschäftsjahre von 2015 bis 2017 gemittelt und bezieht sich auf die gesamt ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes. Diese Mittelung soll eventuelle ungewöhnliche Einzelvorkommnisse eines Geschäftsjahres glätten.

5.1.3 Besohlte Betonschwellenweiche

| Material | Schwellenbesohlung | |
|-------------------------|--------------------|--------|
| | [kg] | [%] |
| geschäumtes Polyurethan | 385,56 | 100,00 |
| Summe | 385,56 | 100,00 |

Tabelle 23: Sachbilanz Schwellenbesohlung – besohlte Betonschwellenweiche

Da keine Stückliste eigens für die besohlte Betonschwellenweiche zu Verfügung steht, wird angenommen, dass der Aufbau, mit Ausnahme der Betonschwellenbesohlung, dem der herkömmlichen Betonschwellenweiche gleicht.

Das gewählte Material der Schwellenbesohlung wird dabei analog der bestehenden Ökobilanz für das Streckengleis angenommen. [8]

Das Gesamtgewicht der Schwellenbesohlung wird wie folgt berechnet:

Besohlung pro Schwelle: $0,3 \text{ m}^2 / \text{lfm Schwelle}$ [12]

Gewicht Besohlung: $4,2 \text{ kg} / \text{m}^2$ [14]

Schwellen gesamt: 306 lfm [12]

$$306 \times 0,3 \times 4,2 = 385,56 \text{ kg}$$

| Hauptkomponenten | besohlte Betonschwellenweiche | |
|--|-------------------------------|---------------|
| | [kg] | [%] |
| Zungenvorrichtung | 4.505,76 | 6,59 |
| Herzstück | 1.372,00 | 2,01 |
| FAS+RADL | 3.394,31 | 4,96 |
| Rippenplatten | 3.775,22 | 5,52 |
| Befestigungsmaterial | 1.208,94 | 1,77 |
| Zwischenlagen | 155,60 | 0,23 |
| Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb | 1.031,41 | 1,51 |
| Betonschwellen | 52.589,16 | 76,86 |
| Schwellenbesohlung | 385,56 | 0,56 |
| Summe | 68.417,96 | 100,00 |

Tabelle 24: Sachbilanz besohlte Betonschwellenweiche [11][12]

Betrachtet man alle Hauptkomponenten zusammen und addiert ihre Massen, ergibt das ein Gesamtgewicht der besohnten Betonschwellenweiche von 68.417,96 kg (siehe Tabelle 24).

| Input besohlte Betonschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | | | |
|---|-------------|-------------------|---------------|---------------------|----------------|----------------------|--------------|
| Input [kg] | Menge | Umrechnungsfaktor | Umrechnung | ausgelieferte Masse | Input/kg | Gesamtgewicht Weiche | Input/Weiche |
| Elektrizität Wasserkraft | 6 997 MWh | 3 600 MJ | 25 189 200 MJ | 37284000 | 0,675603476 MJ | 68418 | 45 963 MJ |
| Elektrizität Extern | 1 139 MWh | 3 600 MJ | 4 100 400 MJ | | 0,109977470 MJ | | 7 482 MJ |
| Diesel | 89 675 l | 0,874 kg/l | 78 376 kg | | 0,002102134 kg | | 143,01 kg |
| Benzin | 2 469 l | 0,780 kg/l | 1 926 kg | | 0,000051653 kg | | 3,51 kg |
| Heizung: Fernwärme | 5 215 MWh | 3 600 MJ | 18 774 000 MJ | | 0,503540393 MJ | | 34 257 MJ |
| Heizung: Erdgas | 154 350 Nm³ | 0,75 kg/m³ | 115 763 kg | | 0,003104884 kg | | 211,23 kg |
| Prozessgase: Erdgas | 214 967 Nm³ | 0,75 kg/m³ | 161 225 kg | | 0,004324248 kg | | 294,19 kg |
| Prozessgase: Propan | 22 780 kg | - | - | | 0,000610986 kg | | 41,57 kg |
| Prozessgase: Azetylen | 1 245 kg | - | - | | 0,000033392 kg | | 2,27 kg |
| Wasser | 24 200 m³ | - | - | | 0,000649072 kg | | 44,16 m³ |

Tabelle 25: Sachbilanz Herstellung Weichenwerk Zeltweg – besohlte Betonschwellenweiche [13]

Der Anteil der besohnten Betonschwellenweiche am verbrauchten Ressourcen- und Energiebedarf des Weichenwerkes in Zeltweg wird in Tabelle 25 angegeben. Die Bestimmung dieser Anteile, die der besohnten Betonschwellenweiche zugeschrieben werden können, geschieht dabei auf die gleiche Weise wie bei der unbesohnten Betonschwellenweiche. Den

einzigsten Unterschied bildet das leicht erhöhte Weichengesamtgewicht, bedingt durch die Schwellenbesohlung.

Der Standortaufwand in *Tabelle 25* ist bereits über die drei Geschäftsjahre von 2015 bis 2017 gemittelt und bezieht sich auf die gesamt ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes. Diese Mittelung soll eventuelle ungewöhnliche Einzelvorkommnisse eines Geschäftsjahres glätten.

5.1.4 Schotter

Die Schottermenge in *Tabelle 26* wird für alle Weichenoberbautypen gleich angenommen.

| | Schotter | |
|----------|------------|--------|
| Material | [kg] | [%] |
| Schotter | 187.500,00 | 100,00 |
| Summe | 187.500,00 | 100,00 |

Tabelle 26: Sachbilanz Schotter

Für die Bestimmung der Schottermenge pro Weiche wird die nachfolgende Berechnung durchgeführt.

Anzahl Schwellen: 101 *Stk/Weiche* [12]

Gesamtlänge Schwellen: 306 *lfm/Weiche* [12]

Mittlere Schwellenlänge: $\frac{306}{101} = 3,03 \text{ m}$

Aufgrund des nicht gleichbleibenden Schotterkörpers unter einer Weiche, der die Volumeberechnung deutlich erschwert, werden Vereinfachungen angenommen. Da die Anzahl an Schwellen pro Weiche und die Gesamtlauflänge der Schwellen bekannt sind, wird von einem gleichbleibenden Weichenquerschnitt mit einer mittleren Schwellenlänge von 3,03 m ausgegangen.

Über den Schwellenabstand von 60 cm erhält man die Länge des vereinfachten Schotterkörpers, die notwendig ist, um das Volumen unter der Weiche abbilden zu können.

Anzahl Schwellen: 101 *Stk/Weiche* [12]

Mittlerer Schwellenabstand: 60 *cm* [15]

Gesamtlänge Schotterkörper: $101 \times 60 = 60,6 \text{ m}$

Anhand dieser Daten kann nun vereinfacht das Volumen des fiktiven Gleiskörpers berechnet werden. Es wird eine Schotterbetthöhe von 50 cm, ein Vorkopfschotter von 50 cm und eine Böschungsneigung von 2/3 angenommen. Mit diesen Annahmen, der zuvor berechneten mittleren Schwellenlänge und der berechneten Länge des fiktiven Gleiskörpers ergibt sich ein Gesamtvolumen von ungefähr 145 m³.

Von diesem Volumen muss noch jenes des kompletten Betonschwellensatzes abgezogen werden. Der Weichenschwellenquerschnitt wird wie folgt angenommen: 0,22 / 0,30 m (h / b). [16]

Multipliziert man nun diese Fläche mit der mittleren Schwellenlänge von 3,03 m erhält man das Volumen einer Weichenschwelle. Bei einer Gesamtanzahl von 101 Schwellen pro Weiche ergibt sich daraus ein Gesamtvolumen der Weichenschwellen von ca. 20 m³.

Nun kann das Volumen des Schotterkörpers bestimmt werden:

$$145 - 20 = 125 \text{ m}^3/\text{Weiche}$$

Für die Umrechnung in kg pro Weiche wird eine Dichte von 1,5 t/m³ angenommen [8]. Daraus ergibt sich ein Schottergesamtwicht von 187.500 kg.

5.2 Transport

In diesem Kapitel erfolgt die Bestandsaufnahme der Transportwege, die im Zuge des Lebenszyklus einer Weiche auftreten. Während die Transportwege aus Rohstoffabbau und der Herstellung der einzelnen Materialien bereits in den Datensätzen aus ecoinvent inkludiert sind, müssen jene Transportwege, die im Zuge des Weichenzusammenbaus, des Einbaus im Streckennetz, der Instandhaltung und der Entsorgung entstehen, noch erfasst werden. Dieses Kapitel beschäftigt sich jedoch nur mit der Bestandsaufnahme jener Transportwege, die im Zuge des Weichenzusammenbaus auftreten. Alle weiteren Transportwege werden in den Prozessmodulen, in denen sie entstehen, berücksichtigt.

5.2.1 Holzschwellenweiche

Tabelle 27 zeigt die Transportwege der Hauptkomponenten, welche im Zuge des Einbaus einer Holzschwellenweiche entstehen. Dabei werden Herstellungsort, Zielort und, falls ein Bearbeitungsschritt es erfordert, eine Zwischenstation angegeben. Die Distanzen werden mit Hilfe von Google Maps bestimmt. Die letzte Spalte gibt Auskunft über den Transportmodus, der für den Transport angenommen wird.

| Holzschwellenweiche | | | | | |
|----------------------|----------------------------|-------------------------|-----------|--------------|-------|
| Komponente | von | über | nach | Distanz [km] | Modus |
| Schiene nur ZV & HZ | voestalpine Schiene | VAE Zeltweg | WWG Wörth | 277 | Bahn |
| Schiene ohne ZV & HZ | voestalpine Schiene | - | WWG Wörth | 200 | Bahn |
| Schwelle | Herstellungsort | - | WWG Wörth | 983,5 | Bahn |
| Zwischenlagen | Getzner Bürs | - | WWG Wörth | 548 | LKW |
| Befestigungsmaterial | Vossloh Werdohl | - | WWG Wörth | 837 | LKW |
| Rippenplatten | Vossloh Werdohl | - | WWG Wörth | 837 | LKW |
| Herzstück Gussteile | Spanien und Frankreich | Erzberg und VAE Zeltweg | WWG Wörth | 2239 | Bahn |
| Schotter | nahegelegenes Schotterwerk | - | Einbauort | 100 | LKW |
| Weiche | WWG Wörth | - | Einbauort | 234 | Bahn |

Tabelle 27: Sachbilanz Transport - Holzschwellenweiche

Die Holzschwellenweiche wird im Gegensatz zur Betonschwellenweiche nicht im Weichenwerk Zeltweg, sondern im Weichenwerk Wörth hergestellt. Jedoch erfolgen nicht alle Arbeitsschritte, die im Zuge des Zusammenbaus der Weiche notwendig sind, in Wörth. Die Bearbeitung der Zungenvorrichtung und des Herzstücks erfolgt im Weichenwerk Zeltweg. Die Belieferung mit den Schienenrohlingen, die für die Zungenvorrichtung und das Herzstück benötigt werden, erfolgt demnach nicht direkt vom Schienenwerk der voestalpine Schiene zum Weichenwerk in Wörth, sondern aufgrund eines notwendigen Bearbeitungsschrittes über Zeltweg.

Alle weiteren Schienenrohlinge, die nicht für die Zungenvorrichtung oder das Herzstück benötigt werden, werden direkt vom Schienenhersteller in Leoben nach Wörth gebracht.

| Transport Holzschwellen | |
|-------------------------|--------------|
| Ort | Distanz [km] |
| Barett, FR | 1.634 |
| Wülknitz, D | 500 |
| Marmetschke, D | 900 |
| FTHP, CZ | 900 |
| Mittelwert | 983,5 |

Tabelle 28: Sachbilanz Transportwege der Holzschwellen – Holzschwellenweiche [8]

Für den Transportweg der Holzschwelle werden vier Herstellungsorte angenommen (siehe Tabelle 28). Zwei davon befinden sich in Deutschland, einer in Frankreich und einer in Tschechien. Die berechneten Distanzen beziehen sich auf die Strecken zwischen den Herstellungsorten und dem Weichenwerk Wörth. Für die Sachbilanz wird die durchschnittliche Distanz dieser vier Herstellungsorte herangezogen und beträgt 983,5 km.

Die Zwischenlagen werden vom Hersteller Getzner in Bürs (Vorarlberg) direkt zum Weichenwerk in Wörth geliefert. Auch das Befestigungsmaterial sowie die Rippenplatten werden vom Hersteller Vossloh AG in Werdohl (Deutschland) direkt nach Wörth geliefert.

| Transport Herzstückrohling | |
|----------------------------|--------------|
| Ort | Distanz [km] |
| Arbérats-Sillègue, FR | 2.148 |
| Laudio-Llodio, SP | 2.330 |
| Mittelwert | 2.239 |

Tabelle 29: Sachbilanz Transportwege Herzstück - Holzschwellenweiche

Die voestalpine VAE GmbH besitzt zwei Tochterunternehmen in Spanien und Frankreich, wo die Herzstückrohlinge gegossen werden. Es wird angenommen, dass sie für die Sprengverfestigung direkt zum Erzberg in Eisenerz (Steiermark) gebracht werden. Anschließend erfolgt für die Herzstückherstellung der Transport des sprengverfestigten Herzstücks zum Weichenwerk in Zeltweg. Erst danach erfolgt die Überstellung des Herzstückes zum Weichenwerk in Wörth. Da die Belieferung des Herzstückrohlings aus diesen beiden Tochtergesellschaften der voestalpine VAE GmbH erfolgt, wird der durchschnittliche Gesamtweg beider Distanzen, wie er oben beschrieben wurde, für die Sachbilanz herangezogen. Somit ergibt sich eine Strecke von 2.239 km.

Der Schotter wird direkt zum Einbauort gebracht. Als repräsentativer Einbauort in Österreich wird die geografische Mitte in Bad Aussee (Steiermark) definiert. Da bezüglich der Schotteranlieferung eine Vielzahl an Schotterwerken in Frage kommt, wird eine durchschnittliche Transportstrecke von 100 km angenommen. [8]

Die fertige Weiche wird mit der Bahn vom Weichenwerk zum zuvor definierten Einbauort gebracht. Dies ergibt eine Strecke von 234 km.

5.2.2 Betonschwellenweiche

Tabelle 30 listet die Transportwege der Hauptkomponenten, welche im Zuge des Einbaus einer Betonschwellenweiche entstehen. Dabei werden wiederum Herstellungsort, Zielort und, falls ein Bearbeitungsschritt es erfordert, eine Zwischenstation angegeben. Die Distanzen werden mit Hilfe von Google Maps bestimmt. Die letzte Spalte gibt Auskunft über den Transportmodus, der für den Transport angenommen wurde.

| Betonschwellenweiche | | | | | |
|----------------------|----------------------------|------------------|-------------|--------------|-------|
| Komponente | von | über | nach | Distanz [km] | Modus |
| Schiene | voestalpine Schiene | - | VAE Zeltweg | 42 | Bahn |
| Schwelle | MABA Wöllersdorf | - | VAE Zeltweg | 154 | Bahn |
| Bewehrung | voestalpine wire rod | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 272 | Bahn |
| Spannstahl | voestalpine wire austria | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 253 | Bahn |
| Zwischenlagen | Getzner Bürs | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 781 | LKW |
| Befestigungsmaterial | Vossloh Werdohl | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 1.069 | LKW |
| Rippenplatten | Vossloh Werdohl | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 1.069 | LKW |
| Herzstück Gussteile | Spanien und Frankreich | Erzberg | VAE Zeltweg | 2.000 | Bahn |
| Schotter | nahegelegenes Schotterwerk | - | Einbauort | 100 | LKW |
| Weiche | VAE Zeltweg | - | Einbauort | 141 | Bahn |
| Besohlung | Getzner Bürs | MABA Wöllersdorf | VAE Zeltweg | 781 | LKW |

Tabelle 30: Sachbilanz Transportwege - Betonschwellenweiche

Da alle Bearbeitungsschritte für die Herstellung der Betonschwellenweiche, auch jene der Zungenvorrichtung und des Herzstücks, in Zeltweg erfolgen, werden die benötigten Schienelemente direkt zum Weichenwerk in Zeltweg gebracht.

Die Betonschwellen werden von der Firma MABA in Wöllersdorf (Niederösterreich) produziert und direkt nach Zeltweg geliefert. Im Falle der besohlenen Betonschwellenweiche wird die Schwellenbesohlung vom Hersteller Getzner in Bürs (Vorarlberg) zum Schwellenproduzenten MABA transportiert, mit den Schwellen verbunden und als fertig besohlte Betonschwellen nach Zeltweg überstellt.

Die Bewehrung und der Spannstahl der Betonschwellen werden direkt in Wöllersdorf in die Schwelle eingebracht und von dort weiter nach Zeltweg transportiert. Die Bewehrung wird von der voestalpine wire rode und der Spannstahl von der voestalpine wire austria geliefert. [8]

Wie bereits im Rahmen der Holzschwellenweiche werden auch bei Betonschwellenweichen die Zwischenlagen von der Firma Getzner in Bürs hergestellt. Von dort gelangen sie zuerst nach Wöllersdorf und anschließend nach Zeltweg.

Das Befestigungsmaterial sowie die Rippenplatten werden vom Hersteller Vossloh AG in Werdohl (Deutschland) produziert und dann nach Wöllersdorf gebracht, um dort direkt auf den Weichen verschraubt zu werden. Im Anschluss erfolgt der Transport nach Zeltweg.

| Transport Herzstückrohling | |
|----------------------------|--------------|
| Ort | Distanz [km] |
| Arbérats-Sillègue, FR | 1.900 |
| Laudio-Llodio, SP | 2.100 |
| Mittelwert | 2.000 |

Tabelle 31: Sachbilanz Transportwege Herzstück - Betonschwellenweiche

Die Herzstückrohlinge werden in Spanien und in Frankreich gegossen. Es wird angenommen, dass sie für die Sprengverfestigung direkt zum Erzberg in Eisenerz (Steiermark) gebracht werden. Anschließend erfolgt der Transport des sprengverfestigten Herzstücks zum Weichenwerk in Zeltweg, wo das Herzstück hergestellt wird. Da die Belieferung des Herzstückrohlings aus den beiden Tochtergesellschaften der voestalpine VAE GmbH erfolgt, wird der durchschnittliche Gesamtweg der beiden Distanzen (FR-Zeltweg und SP-Zeltweg) für die Sachbilanz herangezogen. Somit ergibt sich eine Strecke von 2.000 km.

Für die Komponente Schotter gelten selbige Annahmen wie im Rahmen der Holzschwellenweiche. Als Einbauort wird abermals Bad Aussee angenommen, die Transportstrecke des Schotters mit 100 km. [8]

Die fertige Weiche wird mit der Bahn vom Weichenwerk in Zeltweg zum zuvor definierten Einbauort gebracht. Dies ergibt eine Strecke von 141 km.

5.3 Einbau

Der Ablauf in Bezug auf den Einbau der Weiche ist für die Holzschwellenweiche sowie für die Betonschwellenweiche ident. In *Tabelle 32* wird der Ablauf eines Weicheneinbaus inklusive dazugehöriger Einzelmaßnahmen in chronologischer Reihenfolge abgebildet.

| Einbau | |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Arbeitsschritte | Einzelmaßnahmen |
| Abtransport alte Weiche | Antransport Kirowkran |
| | Einsatz Kirowkran |
| | Abtransport Weiche |
| Altschotter entfernen | Antransport Bagger 22t |
| | Aushub Altschotter |
| | Abtransport Altschotter |
| Planumsverbesserung | Aushub Unterbau |
| | Abtransport Unterbau |
| | Antransport Unterbau |
| | Einhub Unterbau |
| | Planumsverdichtung |
| 1. Schotterlage | Antransport Neuschotter |
| | Einhub 1. Schotterlage |
| | Abtransport Bagger 22t |
| Weichenverlegung | Antransport gesamte Weiche |
| | Einsatz Kirowkran |
| | Abtransport Kirowkran |
| Ergänzungsschotter | Verteilung mit Lok |
| Stopfen | An- und Abtransport Stopfmaschine |
| | Einsatz Stopfmaschine (3 Mal) |
| DGS | An- und Abtransport DGS |
| | Einsatz DGS |
| Schweißen | An- und Abtransport Schweißroboter |
| | Einsatz Schweißroboter |
| Schleifen | An- und Abtransport Schleifmaschine |
| | Einsatz Schleifmaschine |

Tabelle 32: Ablauf Weicheneinbau

Bevor eine neue Weiche eingebaut werden kann, muss zuvor die alte Weiche abtransportiert werden. Anschließend wird der Altschotter mittels Bagger entfernt und mit LKWs abtransportiert. Die darauffolgende Planumsverbesserung entfernt den Unterbau. Danach wird das alte Material abtransportiert, das neue Material eingehoben und mittels Walzenzug verdichtet. Im nächsten Schritt wird die erste Schotterlage aufgetragen, wozu Neuschotter antransportiert und mittels Bagger eingehoben werden muss. Auf diese Schotterlage wird

die vom Weichenwerk just-in-time gelieferte Weiche verlegt. Für den Verlegevorgang der schweren Weiche ist ein Kirowkran erforderlich. Ist die Weiche wieder befahrbar, wird mittels Schotterwagen Ergänzungsschotter bis zur Schwellenoberkante aufgetragen. Anschließend muss das Schotterbett gestopft und mittels dynamischen Gleisstabilisator stabilisiert werden. Die Weiche muss darüber hinaus noch lückenlos mit den Anschlussgleisen verschweißt werden. Zum Schluss wird eine Erstschienenschleifung durchgeführt, um aus dem Herstellungsprozess verbleibende Rückstände von der Schienenoberfläche zu entfernen.

Im Zuge des Einbaus werden Wegstrecken für die Anlieferungen von Maschinen und Material sowie gewisse Maschineneinsatzzeiten je Tätigkeit benötigt. Nachfolgend werden diese Transportwege und Maschinenstunden, die der Ökobilanzierung zu Grunde liegen, für jeden Arbeitsschritt tabellarisch dargestellt.

| Einzelmaßnahmen | Abtransport alte Weiche | | |
|-----------------------|-------------------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Antransport Kirowkran | Lok Vossloh | - | 200 |
| Einsatz Kirowkran | Kirowkran | 0,5 | - |
| Abtransport Weiche | Lok Vossloh | - | 100 |

Tabelle 33: Abtransport alte Weiche – Ablauf Weicheneinbau

Im ersten Arbeitsschritt wird die alte Weiche abtransportiert. Für das Verladen der Weiche wird ein Kirowkran benötigt, der zuvor mit einer Lokomotive antransportiert werden muss. Es wird angenommen, dass alle benötigten Geräte innerhalb eines Radius von 200 km um den Einbauort gelagert werden. Das Verladen der Weiche wird mit einem Zeitaufwand von 0,5 h des Kirowkrans angenommen. Die alte Weiche wird mittels Bahn zur nächsten Altstoffverwertung gebracht, welche in einem Umkreis von 100 km liegt.

| Einzelmaßnahmen | Altschotter entfernen | | |
|-------------------------|-----------------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Antransport Bagger 22t | Lok Vossloh | - | 200 |
| Aushub Altschotter | Bagger 22t | 1,79 | - |
| Abtransport Altschotter | LKW | - | 100 |

Tabelle 34: Altschotter entfernen – Ablauf Weicheneinbau

Nach dem Abtransport der Weiche wird das alte Schotterbett entfernt. Zu diesem Zweck wird ein Bagger entsprechend des oben angenommenen Transportwegs für Maschinen zur Baustelle gebracht. Für die Berechnung der Einsatzstunden des Baggers wird eine Schaufelgröße von 1 m³ und einer Hubleistung von 70 m³/h angenommen. Bei einer Schottermenge von 125 m³ ergibt sich daraus ein Zeitaufwand von 1,79 h. Der Altschotter wird mit LKWs zur nächstgelegenen Schottergrube innerhalb eines 100 km Radius gebracht.

| Einzelmaßnahmen | Planumsverbesserung | | |
|----------------------|---------------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Aushub Unterbau | Bagger 22t | 0,6 | - |
| Abtransport Unterbau | LKW | - | 100 |
| Antransport Unterbau | LKW | - | 100 |
| Einhub Unterbau | Bagger 22t | 0,6 | - |
| Planumsverdichtung | Walzenzug 15t | 0,42 | - |

Tabelle 35: Planumsverbesserung – Ablauf Weicheneinbau

Nach Entfernung des Altschotters wird der Unterbau erneuert. Zu diesem Zweck muss die Menge des benötigten Erdreichs bestimmt werden. Die Querschnittsbreite des Schotterbettplanums ergibt sich dabei aus der unteren Breite des Schotterbetts zuzüglich einer Breite von 60 cm auf jeder Seite des Gleisquerschnitts. Die Unterbaustärke wird mit 10 cm und die Böschungsneigung mit einem Verhältnis von 2/3 angenommen. In Anlehnung an die Rechnung der Schottermenge (siehe Kapitel 5.1.4) ergibt sich daraus ein Gesamtvolumen von 42 m³.

Aufgrund der zuvor definierten Hubleistung des Baggers und dessen Schaufelgröße ergibt sich ein Maschinenaufwand von 0,6 h jeweils für Aus- und Einhub des Materials. Für den An- und Abtransport des Unterbaumaterials wird ein LKW benötigt, der eine Strecke von je 100 km zurücklegt. Für die Planumsverdichtung kommt ein Walzenzug mit einem Zeitaufwand von 0,42 h zum Einsatz. Dieser Aufwandswert ergibt sich aus einer Unterbaumenge von 42 m³ und einer Walzleistung von 100 m³/h.

| Einzelmaßnahmen | 1. Schotterlage | | |
|-------------------------|-----------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Antransport Neuschotter | Lok Vossloh | - | 100 |
| Einhub 1. Schotterlage | Bagger 22t | 0,89 | - |
| Abtransport Bagger 22t | Lok Vossloh | - | 200 |

Tabelle 36: 1. Schotterlage – Ablauf Weicheneinbau

Bevor die neue Weiche verlegt werden kann, muss auf dem neuen Schottplanum eine erste Schotterlage aufgetragen werden. Dies erfolgt in konventioneller Ausführung mittels Bagger für die Hälfte der zuvor bestimmten Schottermenge (62,5 m³). Daraus ergibt sich ein Aufwandswert für den Baggereinsatz von 0,89 h. Der Schotter wird aus einem nahegelegenen Schotterweg innerhalb eines 100 km Radius angeliefert. Da der Bagger in keinem der folgenden Arbeitsschritte mehr benötigt wird, erfolgt dessen Abtransport mittels Lokomotive. Hierfür wird die gleiche Transportstrecke wie bei der Anlieferung angenommen herangezogen (200 km).

| Einzelmaßnahmen | Weichenverlegung | | |
|----------------------------|------------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Antransport gesamte Weiche | Lok Vossloh | - | 141 / 234 |
| Einsatz Kirowkran | Kirowkran | 0,5 | - |
| Abtransport Kirowkran | Lok Vossloh | - | 200 |

Tabelle 37: Weichenverlegung – Ablauf Weicheneinbau

Die Weiche wird mittels Kirowkran auf der ersten Schotterlage verlegt. Der Zeitaufwand des Kirowkrans beläuft sich dabei auf 30 min und wird nach Abschluss dieser Arbeit abtransportiert. Der Antransport der Weiche erfolgt dabei je nach Oberbautyp vom jeweiligen Weichenwerk in Zeltweg (Betonschwellenweiche) oder Wörth (Holzschwellenweiche). 141 km werden dabei aus Zeltweg und 234 km aus Wörth bis zum Einbauort zurückgelegt (siehe Kapitel 5.2).

| Einzelmaßnahmen | Ergänzungsschotter | | |
|--------------------|--------------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| Verteilung mit Lok | Lok Vossloh | - | 1 |

Tabelle 38: Ergänzungsschotter – Ablauf Weicheneinbau

Ist die Weiche verlegt und ausgerichtet, wird Ergänzungsschotter mittels Schotterwagen, angetrieben durch eine Lokomotive, aufgetragen. Zu diesem Zweck wird die zweite Hälfte der angelieferten Schottermenge verwendet. Für das Bewegen des Schotterwagens wird in Summe eine Strecke von 1 km angenommen.

| Einzelmaßnahmen | Stopfen Einbau | | |
|-----------------------------------|----------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| An- und Abtransport Stopfmaschine | selbstfahrend | - | 400 |
| Einsatz Stopfmaschine (3 Mal) | 09-32 CSM | 1,5 | - |

Tabelle 39: Stopfen Einbau – Ablauf Weicheneinbau

Zum Verdichten des Schotterbetts wird ein 3-maliger Stopfvorgang durch eine Stopfmaschine mit einem Gesamtzeitaufwand von 1,5 h durchgeführt. Die Stopfmaschine überwindet die Strecke innerhalb des 200 km Radius dabei aus eigener Kraft. In Summe ergibt sich daraus für den An- und Abtransport eine Strecke von 400 km.

| Einzelmaßnahmen | DGS | | |
|-------------------------|-------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| An- und Abtransport DGS | Lok Vossloh | - | 400 |
| Einsatz DGS | DGS 62N | 0,5 | - |

Tabelle 40: DGS – Ablauf Weicheneinbau

Zur Erhöhung der Gleislagestabilität erfolgt eine dynamische Gleisstabilisierung. Hierfür wird ein dynamischer Gleisstabilisator (DGS) von einer Lok zum Einbauort gebracht und nach vollendeter Arbeit wieder abtransportiert. Der Einsatz des DGS nimmt einen Zeitaufwand von 0,5 h in Anspruch.

| Einzelmaßnahmen | Schweißen | | |
|------------------------------------|--------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| An- und Abtransport Schweißroboter | Lok Vossloh | - | 400 |
| Einsatz Schweißroboter | APT 1500 R-A | 6 | - |

Tabelle 41: Schweißen – Ablauf Weicheneinbau

Die Weiche wird lückenlos an das Anschlussgleis verschweißt. Hierfür wird ein Schweißroboter mit einem Zeitaufwand von 6 h benötigt.

| Einzelmaßnahmen | Schleifen | | |
|-------------------------------------|-------------|-----------|--------------|
| | Maschine | Dauer [h] | Strecke [km] |
| An- und Abtransport Schleifmaschine | Lok Vossloh | - | 400 |
| Einsatz Schleifmaschine | SSM2 | 1,5 | - |

Tabelle 42: Schleifen – Ablauf Weicheneinbau

Nach Abschluss aller vorangegangenen Arbeiten erfolgt das Erstschienenschleifen, um Rückstände aus dem Herstellungsprozess abzutragen. Dieser Arbeitsschritt wird von einer Schleifmaschine in 1,5 h durchgeführt.

| Maschine | Treibstoffverbrauch | | | | Quelle |
|---------------|---------------------|--------|--------|---------|---------|
| | [l/h] | [l/km] | [kg/h] | [kg/km] | |
| Bagger 22t | 15,00 | - | 12,60 | - | [17] |
| Lok Vossloh | - | 2,50 | - | 2,10 | [17] |
| LKW | - | 0,35 | - | 0,29 | [17] |
| Kirowkran | 47,62 | - | 40,00 | - | Annahme |
| Walzenzug 15t | 10,00 | - | 8,40 | - | [17] |
| 09-32 CSM | 88,00 | - | 73,92 | - | [17] |
| DGS 62N | 44,05 | - | 37,00 | - | [18] |
| APT 1500 R-A | 44,05 | - | 37,00 | - | [18] |
| SSM2 | 38,10 | - | 32,00 | - | [18] |

Tabelle 43: Treibstoffverbrauch Maschinen – Weicheneinbau

Um die Emissionen zu bestimmen, welche die zuvor erwähnten Maschinen während der Verrichtung ihrer Arbeiten ausstoßen, ist der Verbrauch des Treibstoffs relevant. Der Treibstoffverbrauch wird entweder in l/h oder in l/km angegeben, je nachdem ob die Einzel-

maßnahmen auf Stundenbasis oder auf Kilometerbasis durchgeführt werden. Diese Verbrauchswerte werden entweder aus einer bereits durchgeführten Ökobilanz der Unterbau-sanierung oder aus der österreichischen Baugeräteliste entnommen. [17][18] Lediglich die Angaben des Kirowkrans beruhen auf dessen angenommener Motorleistung von 400 kW.

Die Umrechnung des Treibstoffverbrauchs von Liter in Kilogramm erfolgt über die Dichte von Diesel, die 0,84 kg/l beträgt. [18]

| Maschine | Leistung | |
|---------------|----------|---------|
| | [kW] | Quelle |
| Bagger 22t | 115 | [17] |
| Lok Vossloh | 1700 | [19] |
| LKW | 300 | [17] |
| Kirowkran | 400 | Annahme |
| Walzenzug 15t | 107 | [17] |
| 09-32 CSM | 348 | [17] |
| DGS 62N | 370 | [18] |
| APT 1500 R-A | 370 | [18] |
| SSM2 | 320 | [18] |

Tabelle 44: Maschinenleistungen - Weicheneinbau

Zusätzlich zum Treibstoffverbrauch werden die Emissionen zu Feinstaub (PM) und Stickoxiden (NOx) in der Sachbilanz aufgenommen. Die Menge an ausgestoßenen Schadstoffen kann dabei über die Leistung der einzelnen Maschinen berechnet werden. In *Tabelle 44* sind die Leistungskennwerte betreffender Maschinen aufgelistet.

| Maschine | Schadstoffe | | | | |
|---------------|----------------|--------|------------------|--------|-------------|
| | Feinstaub (PM) | | Stickoxide (NOx) | | EURO-Klasse |
| | [g/h] | [g/km] | [g/h] | [g/km] | |
| Bagger 22t | 3,45 | - | 402,50 | - | 4 |
| Lok Vossloh | - | 0,64 | - | 74,38 | 4 |
| LKW | - | 0,11 | - | 13,13 | 4 |
| Kirowkran | 12,00 | - | 1400,00 | - | 4 |
| Walzenzug 15t | 3,21 | - | 374,50 | - | 4 |
| 09-32 CSM | 10,44 | - | 1218,00 | - | 4 |
| DGS 62N | 11,10 | - | 1295,00 | - | 4 |
| APT 1500 R-A | 11,10 | - | 1295,00 | - | 4 |
| SSM2 | 9,60 | - | 1120,00 | - | 4 |

Tabelle 45: Schadstoffemissionen Maschinen – Weicheneinbau

Unter der Annahme, dass es sich bei allen Maschinen um Fahrzeuge der Klasse 4 des Europäischen Emissionsstandards für schwere Nutzfahrzeuge handelt, werden die Feinstaubemissionen auf 0,03 g/kWh und die Emissionen von Stickoxiden auf 3,5 g/kWh begrenzt [20]. Multipliziert man die Leistungskennwerte der Maschinen mit den jeweiligen Emissionsgrenzwerten, erhält man die Menge an Schadstoffen pro Betriebsstunde. Für die Lokomotive und den LKW muss zusätzlich die durchschnittliche Fahrtgeschwindigkeit miteinbezogen werden, um eine Umrechnung von g/h in g/km zu ermöglichen. Für diese Umrechnung wird für beide Fahrzeuge eine angenommene Geschwindigkeit von 80 km/h zu Grunde gelegt.

| Arbeitsschritte | Sachbilanz Einbau | | |
|-------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|
| | Treibstoff [kg] | Feinstaub [g] | Stickoxide [g] |
| Abtransport alte Weiche | 650 | 197 | 23.013 |
| Altschotter entfernen | 472 | 145 | 16.908 |
| Planumsverbesserung | 77 | 28 | 3.265 |
| 1. Schotterlage | 641 | 194 | 22.671 |
| Weichenverlegung | 736/931 | 223/283 | 26.062/32.979 |
| Ergänzungsschotter | 2 | 1 | 74 |
| Stopfen | 615 | 68 | 7.917 |
| DGS | 859 | 261 | 30.398 |
| Schweißen | 1.062 | 322 | 37.520 |
| Schleifen | 888 | 269 | 31.430 |
| Summe | 6.002/6.198 | 1.708/1.767 | 199.257/206.174 |

Tabelle 46: Sachbilanz Weicheneinbau

Tabelle 46 zeigt die Gesamtwerte an Treibstoffverbrauch und Emissionen und stellt somit die Sachbilanz des Einbauprozesses einer Weiche dar. Im Rahmen der Weichenverlegung hängt der Wert davon ab, ob es sich um eine Betonschwellenweiche oder um eine Holzschwellenweiche handelt, da sie unterschiedliche Produktionsstätten und somit auch verschiedene Distanzen zum Einbauort aufweisen.

5.4 Instandhaltung

Table 47 zeigt die Instandhaltungsmaßnahmen, die je nach Belastungsklasse unterschiedlich häufig in einem Lebenszyklus der Weiche auftreten können.

| Instandhaltung | |
|----------------------|--|
| Einzelmaßnahmen | Arbeitsschritte |
| Stopfen | An- und Abtransport Stopfgerät (selbstfahrend) |
| | Einsatz Stopfmaschine |
| Schleifen | An- und Abtransport Schleifgerät |
| | Einsatz Schleifmaschine |
| HZV-Wechsel | An- und Abtransport HZV |
| | Einsatz Bagger 22t |
| | An- und Abtransport Bagger |
| | Material HZV |
| | Herstellung HZV |
| | Entsorgung HZV |
| Herzwechsel | An- und Abtransport HZ |
| | Einsatz Bagger 22t |
| | An- und Abtransport Bagger |
| | Material HZ |
| | Herstellung HZ |
| | Entsorgung HZ |
| Radlenkerwechsel | An- und Abtransport RADL |
| | Einsatz Bagger 22t |
| | An- und Abtransport Bagger |
| | Material RADL |
| | Herstellung RADL |
| | Entsorgung RADL |
| Schweißen | An- und Abtransport Schweißroboter |
| | Einsatz Schweißroboter |
| Schotteraustausch RM | An- und Abtransport RM (selbstfahrend) |
| | Einsatz RM |
| Zwischenlagenwechsel | An- und Abtransport ZW |
| | Material ZW |
| | Herstellung ZW |
| | Entsorgung ZW |

Table 47: Ablauf Weicheninstandhaltung

Diese Instandhaltungsmaßnahmen werden wie folgt in der Sachbilanz aufgenommen:

- Stopfen: Neben dem eigentlichen Stopfvorgang, der für eine Korrektur der Gleislage sorgt, muss auch der An- und Abtransport der Stopfmaschine berücksichtigt werden
- Schleifen: Das Schleifen dient zur Reprofilierung der Schienenoberflächen.
- HZV-Wechsel: Auf Grund der hohen Belastungen muss die halbe Zungenvorrichtung in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden. Dies geschieht über einen Zweiwegebagger. Da der verschleißbedingte Komponentenaustausch im Zuge der Nutzugsphase auftritt, muss der zusätzliche Ressourcen- und Energieverbrauch der Neukomponente sowie die Entsorgung der Altkomponente dieser Phase zugeordnet werden.
- Herzwechsel: Das Herz ist die Stelle, an der die größten Belastungen im Zuge der Nutzungsphase auftreten. Deshalb muss das Herzstück verschleißbedingt am häufigsten von allen Weichenkomponenten getauscht werden. Da der verschleißbedingte Komponentenaustausch im Zuge der Nutzungsphase auftritt, muss der zusätzliche Ressourcen- und Energieverbrauch der Neukomponente sowie die Entsorgung der Altkomponente dieser Phase zugeordnet werden.
- Radlenkerwechsel: Da der verschleißbedingte Komponentenaustausch im Zuge der Nutzungsphase auftritt, muss der zusätzliche Ressourcen- und Energieverbrauch der Neukomponente sowie die Entsorgung der Altkomponente dieser Phase zugeordnet werden.
- Schweißen: Für Auftrags- und Reparaturschweißungen wird ein Schweißroboter benötigt.
- Schotteraustausch RM: Der Schotteraustausch erfolgt im Zuge einer kontinuierlichen Reinigung der angrenzenden Gleise mittels Reinigungsmaschine.
- Zwischenlagenwechsel: Das Wechseln der Zwischenlagen kommt nur im Falle einer besohnten Betonschwellenweiche vor, da auf Grund der hohen Nutzungsdauer und der folglich langjährigen Belastung die Zwischenlagen stark beansprucht werden. Da der verschleißbedingte Komponentenaustausch im Zuge der Nutzungsphase auftritt, muss der zusätzliche Ressourcen- und Energieverbrauch der Neukomponente sowie die Entsorgung der Altkomponente dieser Phase zugeordnet werden.

| Maßnahmen | Zeitaufwand Instandhaltung | |
|----------------------|----------------------------|--|
| | Dauer [h] | |
| Stopfen | 1,5 | |
| Schleifen | 1,5 | |
| HZW-Wechsel | 3,67 | |
| Herzwechsel | 4 | |
| Radlenkerwechsel | 1 | |
| Schweißen | 6 | |
| Schotteraustausch RM | 19,5 | |
| Zwischenlagenwechsel | 6 | |

Tabelle 48: Zeitaufwand Weicheninstandhaltung [21]

Tabelle 48 zeigt die Zeitaufwände, die jede Instandhaltungsmaßnahme verursacht. Sie werden den Umweltwirkungen der Maschinen zu Grunde gelegt. Für die Maßnahme Stopfen wird die Stopfmaschine 09-32 CSM, für das Schleifen die Schleifmaschine SSM2, für das Schweißen der Schweißroboter APT 1500 R-A und für den Schotteraustausch die Reinigungsmaschine RM 80 verwendet. [8][17]

Für alle Maßnahmen, die einen Materialwechsel vorsehen, kommt ein 22 Tonnen Bagger zum Einsatz. Der An- und Abtransport der einzelnen Maschinen, die im Zuge der Instandhaltungsmaßnahmen auftreten, müssen ebenfalls berücksichtigt werden. Für die Berechnung der Umweltwirkungen der Transportwege, wird wie bei der Erstellung der Sachbilanz des Einbaus, eine Strecke von 200 km je Richtung angenommen.

| Belastung [GesBT/Tag, Gleis] | Anzahl Instandhaltungsmaßnahmen | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|
| | HSW | | | BSW | | | BSW_USP | | |
| | 90.000 | 55.000 | 33.000 | 90.000 | 55.000 | 33.000 | 90.000 | 55.000 | 33.000 |
| Stopfen | 12 | 7 | 8 | 12 | 9 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| Schleifen | 5 | 3 | 3 | 8 | 5 | 4 | 9 | 5 | 5 |
| HZW-Wechsel | 1 | 1 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Herzwechsel | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 |
| Radlenkerwechsel | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| Schweißen | 2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| Schotteraustausch RM | 0 | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 | 0,2 | 0 | 0 | 0 |
| Zwischenlagenwechsel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

Tabelle 49: Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen je Oberbautyp und Belastungsklasse [22]

Tabelle 49 zeigt die belastungsabhängige Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen der jeweiligen Weichenoberbautypen, die innerhalb des Lebenszyklus einer Weiche erforderlich

sind. Diese beruhen dabei auf den Standardelementen der Weiche des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz. Ein Standardelement beschreibt das mittlere und zu erwartende Verhalten (Instandhaltungsbedarf und Nutzungsdauer) einer Weiche unter spezifischen Rahmenbedingungen. Dieses Verhalten der Weiche wird demnach für jeden Oberbautyp und Belastungsklasse über ein eigenes Standardelement beschrieben. [22]

Mit Hilfe der bekannten Anzahl der Instandhaltungsmaßnahmen je Belastungsklasse und Oberbautyp lassen sich wie in Kapitel 5.3 die Emissionen und der Treibstoffverbrauch errechnen. Die Kennwerte der Maschinen können ebenfalls aus Kapitel 5.3 entnommen werden. Für die Reinigungsmaschine gilt ein Leistungswert von 700 kW und ein Verbrauch von 70 kg/h Diesel. [18]

5.5 End of Life (EOL)

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Abfallbehandlung der Weiche am Ende ihrer Lebensphase.

Folgende Tabelle zeigt die Art der Abfallbehandlung bzw. Verwertung der Weiche gegliedert in ihre Materialhauptgruppen.

| Materialgruppen | Entsorgung Weiche | | |
|-----------------|-------------------|-----------|-------------|
| | Verbrennung | Recycling | Deponierung |
| Holz | 100% | - | - |
| Beton | - | - | 100% |
| Metall | - | 95% | 5% |
| Kunststoff | 100% | - | - |
| Schotter | - | - | 100% |

Tabelle 50: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe

Für die Entsorgung der Weiche wurden folgende Annahmen getroffen:

- Holzswellen werden verbrannt
- Betonswellen werden zur Gänze deponiert
- Die 95 % Recyclingrate der Metallgesamtmass ergibt sich draus, dass ein geringer Teil davon wiederverwendet wird und der Recyclingvorgang geringe Stoffverluste nach sich zieht. Dabei wird ein Wegfall der Gesamtmass von 5 % angenommen, welcher innerhalb der Ökobilanz als Deponierung modelliert wird.
- Schotter wird deponiert

- Die Gesamtmasse an Kunststoffkomponenten wird verbrannt

Alle Materialien, die durch Verbrennung entsorgt werden, kommen in eine Müllverbrennungsanlage und dienen somit der Fernwärmeerzeugung.

5.5.1 Holzschwellenweiche

Table 51 zeigt die nach der Art der Abfallbehandlung gegliederten Massen der Materialgruppen der Holzschwellenweiche, unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen.

| Holzschwellenweiche | | | |
|---------------------|------------------|----------------|------------------|
| Materialgruppen | Verbrennung [kg] | Recycling [kg] | Deponierung [kg] |
| Holz | 10684 | - | - |
| Metall | - | 15282 | 804 |
| Kunststoff | 54 | - | - |
| Summe | 10737 | 15282 | 804 |

Table 51: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe - Holzschwellenweiche

Der Anteil der Holzschwellenweiche am Müll des Weichenwerkes in Wörth wird in Table 52 angegeben. Für die Bestimmung des Müllanteils, der der Holzschwellenweiche zugeschrieben werden kann, werden – analog zu den Inputermittlungen (vgl. Kapitel 5.1) - die einzelnen Abfallgruppen den gesamt ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes Wörth gegenübergestellt. Dadurch lässt sich der Müllanteil pro Kilogramm ausgelieferter Masse bestimmen. Werden diese Werte mit dem Gewicht der zu untersuchenden Holzschwellenweiche multipliziert, erhält man die Anteile der Weiche am produzierten Müll des Weichenwerkstandortes.

| Abfall Holzschwellenweiche - Weichenwerk Wörth | | | | | |
|--|----------|---------------------|-----------|---------------------|---------------|
| Output [kg] | Menge | ausgelieferte Masse | Output/kg | Weiche ohne ZV & HZ | Output/Weiche |
| Karton | 6954,33 | 21652983 | 0,000321 | 21046 | 6,76 |
| Kunststoff | 3281,00 | | 0,000152 | | 3,19 |
| Altholz | 57440,00 | | 0,002653 | | 55,83 |
| Schrott | 1173,67 | | 0,000054 | | 1,14 |
| Lack und Farbe | 4721,33 | | 0,000218 | | 4,59 |
| Holz imprägniert | 14066,92 | | 0,000650 | | 13,67 |
| Imprägniermittel | 2679,41 | | 0,000124 | | 2,60 |
| Öl | 1157,33 | | 0,000053 | | 1,12 |
| Schweißbrückstände | 7325,33 | | 0,000338 | | 7,12 |

Table 52: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Wörth – Holzschwellenweiche [10]

Es ist anzumerken, dass das angegebene Gesamtgewicht der Holzschwellenweiche von 21.046 kg in Table 52 nicht die Gewichtsanteile der Zungenvorrichtung und des Herz-

stücks beinhaltet. Dies liegt an der Tatsache, dass diese beiden Komponenten im Weichenwerk in Zeltweg bearbeitet werden und nicht in Wörth. Der Anteil am produzierten Müll des Standortes Zeltweg, bezogen auf das Gewicht der Zungenvorrichtung und das Herzstück der Holzschwellenweiche, wird in *Tabelle 53* dargestellt.

| Abfall Holzschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | |
|--|------------|---------------------|-----------|---------|---------------|
| Output [kg] | Menge | ausgelieferte Masse | Output/kg | ZV & HZ | Output/Weiche |
| Keramik | 236,00 | 37284000 | 0,000006 | 5777 | 0,04 |
| Schleifmittel | 11295,67 | | 0,000303 | | 1,75 |
| Schrott | 2713375,33 | | 0,072776 | | 420,46 |
| Altpapier | 46160,00 | | 0,001238 | | 7,15 |
| Aluminium | 463,00 | | 0,000012 | | 0,07 |
| Gewerbemüll: Glas | 20854,50 | | 0,000559 | | 3,23 |
| Gewerbemüll: Bio | 20854,50 | | 0,000559 | | 3,23 |
| Gewerbemüll: Blech/Dosen | 20854,50 | | 0,000559 | | 3,23 |
| Gewerbemüll: Kunststoff | 20854,50 | | 0,000559 | | 3,23 |
| E-Schrott | 8162,67 | | 0,000219 | | 1,26 |
| Bleiakku | 1045,00 | | 0,000028 | | 0,16 |
| Emulsionen | 50663,33 | | 0,001359 | | 7,85 |
| Öl | 39217,00 | | 0,001052 | | 6,08 |
| Altholz | 81026,67 | | 0,002173 | | 12,56 |
| Holz imprägniert | 12667,20 | | 0,000340 | | 1,96 |
| Imprägnier-mittel | 2412,80 | | 0,000065 | | 0,37 |
| Lack und Farbe | 1313,67 | | 0,000035 | | 0,20 |

Tabelle 53: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – Holzschwellenweiche [13]

5.5.2 Betonschwellenweiche

Tabelle 54 zeigt die nach der Art der Abfallbehandlung gegliederten Massen der Materialgruppen der Betonschwellenweiche, unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen.

| Betonschwellenweiche | | | |
|----------------------|------------------|----------------|------------------|
| Materialgruppen | Verbrennung [kg] | Recycling [kg] | Deponierung [kg] |
| Beton | - | - | 52589 |
| Metall | - | 14520 | 764 |
| Kunststoff | 159 | - | - |
| Summe | 159 | 14520 | 53353 |

Tabelle 54: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe - Betonschwellenweiche

Der Anteil der Betonschwellenweiche am Müll des Weichenwerkes in Zeltweg wird in *Tabelle 55* angegeben. Für die Bestimmung des Müllanteils, der der Betonschwellenweiche zugeschrieben werden kann, werden die einzelnen Abfallgruppen den gesamten ausgelieferten Produktmassen des Weichenwerkes in Zeltweg gegenübergestellt. Dadurch lässt sich der Müllanteil pro Kilogramm ausgelieferter Masse bestimmen. Werden diese Werte mit dem Gewicht der zu untersuchenden Betonschwellenweiche multipliziert, erhält man die Anteile der Weiche am produzierten Müll des Weichenwerkstandortes.

| Abfall Betonschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | |
|---|------------|---------------------|-----------|----------------------|---------------|
| Output [kg] | Menge | ausgelieferte Masse | Output/kg | Gesamtgewicht Weiche | Output/Weiche |
| Keramik | 236,00 | 37284000 | 0,000006 | 68032 | 0,43 |
| Schleifmittel | 11295,67 | | 0,000303 | | 20,61 |
| Schrott | 2713375,33 | | 0,072776 | | 4951,12 |
| Altpapier | 46160,00 | | 0,001238 | | 84,23 |
| Aluminium | 463,00 | | 0,000012 | | 0,84 |
| Gewerbemüll: Glas | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,05 |
| Gewerbemüll: Bio | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,05 |
| Gewerbemüll: Blech/Dosen | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,05 |
| Gewerbemüll: Kunststoff | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,05 |
| E-Schrott | 8162,67 | | 0,000219 | | 14,89 |
| Bleiakku | 1045,00 | | 0,000028 | | 1,91 |
| Emulsionen | 50663,33 | | 0,001359 | | 92,45 |
| Öl | 39217,00 | | 0,001052 | | 71,56 |
| Altholz | 81026,67 | | 0,002173 | | 147,85 |
| Holz imprägniert | 12667,20 | | 0,000340 | | 23,11 |
| Imprägnier-mittel | 2412,80 | | 0,000065 | | 4,40 |
| Lack und Farbe | 1313,67 | | 0,000035 | | 2,40 |

Tabelle 55: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – Betonschwellenweiche [13]

5.5.3 Besohlte Betonschwellenweiche

Tabelle 56 zeigt die nach der Art der Abfallbehandlung gegliederten Massen der Materialgruppen der besohnten Betonschwellenweiche, unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen.

| besohlte Betonschwellenweiche | | | |
|-------------------------------|------------------|----------------|------------------|
| Materialgruppen | Verbrennung [kg] | Recycling [kg] | Deponierung [kg] |
| Beton | - | - | 52589 |
| Metall | - | 14520 | 764 |
| Kunststoff | 545 | - | - |
| Summe | 545 | 14520 | 53353 |

Tabelle 56: Art der Abfallbehandlung je Materialgruppe – besohlte Betonschwellenweiche

Der Anteil der besohnten Betonschwellenweiche am Müll des Weichenwerkes in Zeltweg wird in Tabelle 57 angegeben. Die Bestimmung des Müllanteils, der der besohnten Betonschwellenweiche zugeschrieben werden kann, geschieht dabei auf die gleiche Weise wie bei der unbesohnten Betonschwellenweiche. Den einzigen Unterschied bildet das leicht erhöhte Weichengesamtgewicht, bedingt durch die Schwellenbesohlung.

Sachbilanz

| Abfall besohlte Betonschwellenweiche - Weichenwerk Zeltweg | | | | | |
|--|------------|---------------------|-----------|----------------------|---------------|
| Output [kg] | Menge | ausgelieferte Masse | Output/kg | Gesamtgewicht Weiche | Output/Weiche |
| Keramik | 236,00 | 37284000 | 0,000006 | 68418 | 0,43 |
| Schleifmittel | 11295,67 | | 0,000303 | | 20,73 |
| Schrott | 2713375,33 | | 0,072776 | | 4979,18 |
| Altpapier | 46160,00 | | 0,001238 | | 84,71 |
| Aluminium | 463,00 | | 0,000012 | | 0,85 |
| Gewerbemüll: Glas | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,27 |
| Gewerbemüll: Bio | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,27 |
| Gewerbemüll: Blech/Dosen | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,27 |
| Gewerbemüll: Kunststoff | 20854,50 | | 0,000559 | | 38,27 |
| E-Schrott | 8162,67 | | 0,000219 | | 14,98 |
| Bleiakku | 1045,00 | | 0,000028 | | 1,92 |
| Emulsionen | 50663,33 | | 0,001359 | | 92,97 |
| Öl | 39217,00 | | 0,001052 | | 71,97 |
| Altholz | 81026,67 | | 0,002173 | | 148,69 |
| Holz imprägniert | 12667,20 | | 0,000340 | | 23,24 |
| Imprägnier-mittel | 2412,80 | | 0,000065 | | 4,43 |
| Lack und Farbe | 1313,67 | | 0,000035 | | 2,41 |

Tabelle 57: Sachbilanz Abfall Weichenwerk Zeltweg – besohlte Betonschwellenweiche[13]

5.5.4 Schotter

Die Menge des deponierten Schotters wird bei allen Weichenoberbautypen gleich angenommen.

| Schotter | | | |
|-----------------|------------------|----------------|------------------|
| Materialgruppen | Verbrennung [kg] | Recycling [kg] | Deponierung [kg] |
| Schotter | - | - | 187500 |
| Summe | 0 | 0 | 187500 |

Tabelle 58: Sachbilanz Schotter - EOL

6 Wirkungsabschätzung

Die Phase der Wirkungsabschätzung beschäftigt sich mit der Umweltrelevanz und Wirkung der Sachbilanzergebnisse. [1]

SimaPro bietet eine große Auswahl an Bewertungsmethoden. Werden bestimmte Wirkungskategorien gewünscht oder gar gefordert, müssen Methoden gefunden werden, die die passenden Wirkungskategorien beinhalten. Beinhalten verschiedene Auswertemethoden die gleichen Wirkungskategorien, ist darauf zu achten, dass die Ergebnisse aufgrund unterschiedlicher Charakterisierungsmodelle und Gewichtungen anders ausfallen können.

Es sind für jede Ökobilanz die dem Ziel entsprechend sinnvollsten Auswertemethoden zu wählen und miteinander zu vergleichen. Dabei gilt dasselbe Prinzip wie bei der funktionalen Einheit. Ökobilanzen, die miteinander verglichen werden sollen, müssen mit derselben Methode ausgewertet worden sein.

Je nach Ziel und Anwendung einer Ökobilanz, aber auch aus Gründen der Belastbarkeit und Vergleichbarkeit der Endergebnisse, kann es daher sinnvoll sein, mehrere Bewertungsmethoden im Zuge der LCA-Analyse zu modellieren.

Im Zuge dieser Arbeit werden folgende Bewertungsmethoden verwendet:

- CML-IA baseline
- Ökologische Knappheit
- Ökologischer Fußabdruck

Im Kapitel 6.1 werden die oben genannten Bewertungsmethoden kurz beschrieben und einander gegenübergestellt.

6.1 Bewertungsmethoden

6.1.1 CML-IA baseline

Die CML-IA Methode wurde von einer Gruppe der „Center of environmental Science of Leiden University (NL) etabliert [23]. Im Zuge der Wirkungsabschätzung erfolgt eine auswirkungsorientierte Klassifizierung der Elementarflüsse bzw. der Stoff und Energieströme. [24]

Die „baseline“ Variante beinhaltet dabei die 10 am weitesten verbreiteten Wirkungskategorien bei Ökobilanzen, wodurch ihre Vergleichbarkeit hoch ist und bei einer Vielzahl von Produktsystemen sinnvoll angewendet werden kann. [23]

Ihr Nachteil besteht darin, dass bei Ökobilanzen mit höherem Detailierungsgrad die vorhandenen Wirkungskategorien die spezifischeren Anforderungen der LCA-Analyse nicht mehr erfüllen können.

Folgende Wirkungskategorien werden für die Zuordnung der Elementarflüsse verwendet:

- Erschöpfung abiotischer Ressourcen
- Treibhauseffekt
- Ozonabbau
- Humantoxizität
- Aquatische Ökotoxizität
- Terrestrische Ökotoxizität
- Bildung von Photooxidantien
- Versauerung
- Eutrophierung [24]

Es ist anzumerken, dass die Methodiken zur Bestimmung von Toxizitäten zurzeit nicht robust sind. Die Humantoxizität, die aquatische und die terrestrische Ökotoxizität werden in dieser Bewertungsmethode zwar berücksichtigt, sollten jedoch kritisch hinterfragt werden.

6.1.2 Ökologische Knappheit

Die Methode der Ökologischen Knappheit gewichtet die Emissionen und den Ressourcenverbrauch mit Hilfe von Eco-Faktoren, ausgedrückt in Eco-Punkten (EP) bzw. in Umweltbelastungspunkten (UBP). Die Ableitung dieser Eco-Faktoren erfolgt dabei aus den geltenden Umweltgesetzen und aus den aktuellen umweltpolitischen Zielen. Dies geschieht nach dem Distance-to-target-Prinzip. Je größer die Überschreitung aktueller Niveaus von Emissionen und Ressourcenverbrauch gegenüber den gesetzten politischen Zielen, desto größer ist der Eco-Faktor. [23]

Mit 20 Wirkungskategorien beinhaltet diese Bewertungsmethode doppelt so viele Wirkungskategorien als in der CML-IA baseline Methode berücksichtigt werden. Der Fokus liegt dabei ganz klar auf dem Ressourcenverbrauch. Der Verbrauch von Wasser, Energie und mineralischer Stoffe sowie die Flächennutzung werden durch entsprechende Wirkungskategorien berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Bewertungsmethode sind gut verständlich und verhältnismäßig leicht kommunizierbar, da geltende Umweltgesetze sowie aktuelle umweltpolitische Ziele als Referenz dienen. Dies ist jedoch in Bezug auf die Vergleichbarkeit mit internationalen Ökobilanzen ein großer Nachteil. Umweltgesetze und umweltpolitische Ziele sind von Land zu Land verschieden.

6.1.3 Ökologischer Fußabdruck

Der ökologische Fußabdruck wird definiert über das biologisch produktive Land und Wasser, welches eine Bevölkerung braucht, um die Ressourcen zu erzeugen, die sie konsumiert hat und damit ein Teil des Mülls absorbiert werden kann, der durch den Verbrauch fossiler und nuklearer Ressourcen erzeugt wurde. [23]

Ein Flächenverbrauch ist leicht verständlich und daher klar und einfach kommunizierbar. Als ergänzende Bewertungsmethode innerhalb einer Ökobilanz ist sie deshalb zu empfehlen. Eine Auswertung der Sachbilanzergebnisse ausschließlich mit dieser Methode wird einer detaillierten und umfassenden Bewertung der Umweltwirkungen des Produktsystems Weiche jedoch nicht gerecht.

6.1.1 Methodenvergleich

Durch die zehn „Standard“-Wirkungskategorien der CML-IA baseline Methode erzielt man die größte internationale Vergleichbarkeit der Ökobilanzergebnisse, wobei von Wirkungskategorien mit Toxizitätsbewertungen immer mehr Abstand genommen wird. Im Vergleich

dazu ist die Methode der ökologischen Knappheit zu stark von den nationalen Umweltgesetzen und den aktuellen umweltpolitischen Zielen abhängig, was wiederum die internationale Vergleichbarkeit einer Ökobilanz erschwert. Ein klarer Vorteil ist jedoch die verhältnismäßig leichte Kommunizierbarkeit der Ergebnisse, da gerade geltende nationale Umweltgesetze und umweltpolitische Ziele als Referenz dienen. Ein weiterer Vorteil der Methode der Ökologischen Knappheit gegenüber der CML-IA baseline Methode ist die Menge und Variation der berücksichtigten Wirkungskategorien. Dadurch lässt sich bei komplexen Ökobilanzierungen eine größere Bandbreite an Umweltwirkungen darstellen. Es ist jedoch anzumerken, dass der Fokus sehr stark auf den Ressourcenverbrauch liegt. Das schließt erneuerbare Ressourcen mit ein, wodurch eine starke Nutzung von diesen vermeintlich umweltfreundlichen erneuerbaren Ressourcen, in den Ökobilanzergebnissen zu großen Umweltwirkungen führen.

Die Methode des ökologischen Fußabdruckes ist zwar durch die Darstellung des Flächenverbrauchs eines Produktes über seinen Lebensweg sehr leicht kommunizierbar, jedoch wird diese eine Wirkungskategorie einer detaillierten und umfassenden Bewertung der Umweltwirkungen des Produktsystems Weiche nicht gerecht. Sie sollte demnach nur als ergänzende Bewertungsmethode herangezogen werden.

6.2 Implementierung in SimaPro

Nachdem die Datengenerierung in der Sachbilanz abgeschlossen ist und die passenden Bewertungsmethoden gewählt wurden, können die zu untersuchenden Weichenvarianten erstellt und simuliert werden. Wie genau dieser Prozess funktioniert wird in diesem Kapitel beschrieben.

Für die Erstellung der Ökobilanz gibt es dabei folgende Auswertungsansätze:

- Cradle-to-Gate
- Cradle-To-Grave
- Cradle-To-Cradle

Cradle-to-Gate berücksichtigt alle Umweltwirkungen eines Produktes bis es das Werk verlässt. Bei Cradle-To-Grave werden alle Umweltwirkungen des gesamten Lebenszyklus eines Produktes, einschließlich der Komponentenentsorgung, behandelt. Cradle-To-Cradle betrachtet ebenfalls den gesamten Lebenszyklus eines Produktes, mit der Ausnahme, dass alle Komponenten wiederverwertet werden.

Da die Weiche nicht vollständig, sondern nur komponentenspezifisch wiederverwertet werden kann, werden die beiden Auswertungsansätze Cradle-To-Grave und Cradle-To-Cradle mittels dem Überbegriff Lifecycle Impact Assessment (LCIA) zusammengefasst.

Die Auswertung der Ökobilanz wird demnach wie folgt gegliedert:

- Cradle-to-Gate
- Lifecycle Impact Assessment (LCIA)

6.2.1 Cradle-to-Gate

Streng genommen widerspricht der Cradle-to-Gate Ansatz der Philosophie einer Ökobilanz, da nicht der gesamte Lebenszyklus, sondern nur die Rohstoffgewinnungs- und Herstellungsprozesse betrachtet werden. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Lebensweg der Weiche endet, sobald diese das Werk verlässt. Aufgrund der fehlenden Nutzungsdauer fehlt jedoch auch die zeitliche Komponente in den Endergebnissen, was zur Folge hat, dass die Umweltwirkungen nur in Absolutwerten ausgewertet werden. Die Ökobilanz ist jedoch ein relativer Ansatz wodurch Absolutwerte sehr leicht falsch interpretiert werden können. Dieser Ansatz soll jedoch zum Zweck des besseren Verständnisses der Ergebnisinterpretation dienen und den Vorteil der Lebenszyklusbetrachtung verdeutlichen.

Die Herstellung der untersuchten Weichen erfolgt in den Weichenwerken Zeltweg und Wörth der voestalpine VAE GmbH.

Da bis zum Ende des Herstellungsprozesses noch keine Züge die Weichen befahren, fällt die Berücksichtigung der Belastungsklassen im Berechnungssetup komplett weg.

Daraus ergeben sich neun unterschiedliche Simulationssetups mit neun unterschiedlichen Ergebnissen, die es in weiterer Folge auszuwerten und zu interpretieren gilt.

Es bleibt jedoch nicht nur bei diesen neun Varianten. Es muss auch die Sensitivitätsanalyse der besohnten Betonschwellenweiche in den Simulationen gesondert berücksichtigt werden. Um den Aufwand der Simulationsergebnisse jedoch nicht zu groß werden zu lassen, wird die Sensitivitätsanalyse nur bei der CML-IA Bewertungsmethode berücksichtigt. Dadurch entsteht eine zusätzlich zu betrachtende Variante im Berechnungssetup.

Die Anzahl der Simulationen ergibt sich nach diesen Überlegungen wie folgt:

$$(3 \text{ Oberbautypen} \times 3 \text{ Bewertungsmethoden}) + 1 = 10 \text{ Varianten}$$

Modellierung in SimaPro

Bevor die Berechnungssetups erstellt und simuliert werden können, müssen vorab die entsprechenden Baugruppen in SimaPro mit den zuvor erstellten Prozessmodulen aus der Sachbilanzphase erstellt werden.

Für jeden Oberbautyp der Weiche muss eine Baugruppe erstellt werden, die den Cradle-to-Gate Ansatz repräsentiert. Diese Baugruppen dürfen und können durch die Software bedingt nur jene Prozesse beinhalten, welche bis zum Verlassen des Werks für das Produktsystem Weiche notwendig sind. Die Baugruppen repräsentieren die Herstellung der Weichen.

Abbildung 9 zeigt die übergeordnete Struktur des Modells bezüglich der Baugruppen. Für die besohlte Betonschwellenweiche existieren aufgrund der Sensitivitätsanalyse 2 Baugruppen (siehe *Abbildung 10*). Für die Holz- und die Betonschwellenweiche gibt es jeweils nur eine Baugruppe.

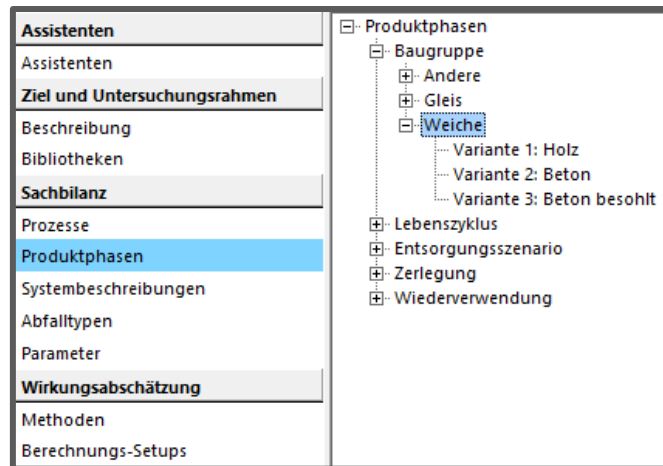


Abbildung 9: Baugruppen - SimaPro

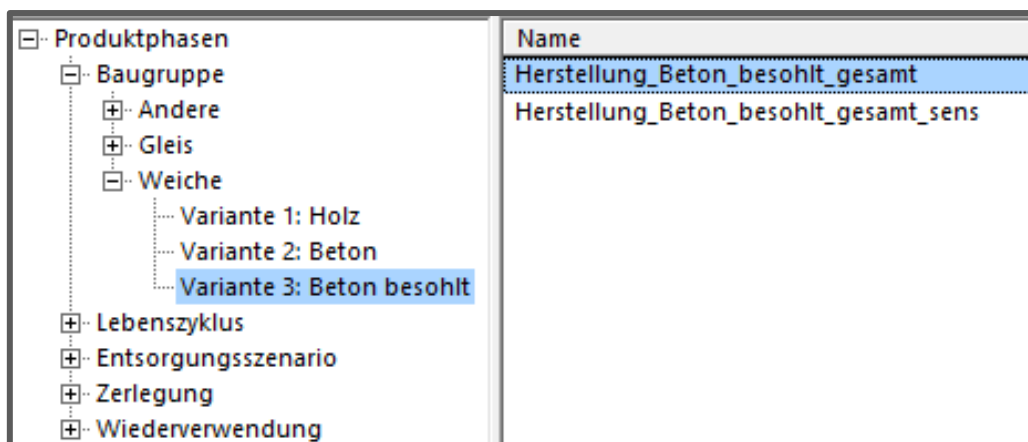


Abbildung 10: Baugruppen - SimaPro

Abbildung 11 zeigt den Aufbau der Baugruppe für die Besohlte Betonschwellenweiche. Alle Prozessmodule der Herstellung aus der Sachbilanz wurden bei der Implementierung in SimaPro auf die Einheit von genau 1 kg bezogen. In diesem Schritt wird nun der schlagende Vorteil dieser Vorgehensweise ersichtlich. Bei Gewichtsveränderungen der zu untersuchenden Weichen können auf einfacher Weise Anpassungen getroffen werden.

Da Weichen entsprechend spezifischer Randbedingungen des geplanten Einbauorts konstruiert und gebaut werden, können Abweichungen der Gewichte der einzelnen Komponentengruppen auftreten. Auch dann, wenn sich der Oberbau und der Abzweigradius nicht verändern. Gewichtsveränderungen bedeuten Veränderungen im Ressourcenverbrauch, was sich wiederum in den Endergebnissen der Ökobilanz widerspiegelt. Strenggenommen, müsste also für jede Weiche, die von der ursprünglich untersuchten Weiche abweicht, eine eigene Ökobilanz erstellt werden. Da dies einen immensen Aufwand darstellen würde, wurde das ursprüngliche Modell so entwickelt, dass bei Abweichungen innerhalb eines bestimmten Rahmens leichte Korrekturen vornehmbar sind, ohne die komplette Struktur der Ökobilanz verändern oder gar eine neue erstellen zu müssen.

Wirkungsabschätzung

Betreffen diese Abweichungen auch Größe und Abzweigradius des Produktsystems, kann dies ebenfalls mit demselben Ökobilanzmodell der EW 500 durch Änderung der Gewichtsangaben innerhalb der Baugruppe angepasst und simuliert werden. Natürlich nur unter der in Kapitel 4.3 erwähnten Annahme, dass es sich bei dieser Weiche ebenfalls um eine einfache Weiche handelt und es innerhalb einer Weichenart kaum Unterschiede in der technischen Ausführung gibt, wodurch das Modell skalierbar bleibt.

Die Skalierbarkeit ist jedoch nicht der einzige Vorteil dieses Modellaufbaus. Sollten sich aus bestimmten Gründen die hinterlegtenecoinvent Datensätze gewisser Prozessbausteine ändern, lassen sich diese einfach und schnell auf der niedrigsten Strukturstufe der Prozessmodule ändern, ohne die darüber aufgebaute Prozessstruktur antasten zu müssen.

Nachstehend sind alle Oberbauvarianten, für die eine Simulation durchgeführt werden soll, aufgelistet und ihr Aufbau durch entsprechende Abbildungen visualisiert. Die Massenangaben entsprechen der Sachbilanz aus Kapitel 3.2.2.

| Name | Status | Kommentar | | |
|---------------------------------------|--------|--|--|--|
| Herstellung_Beton_besohlt_gesamt_sens | Keine | Gewichte berechnet in Excel "Stückliste" | | |

| Materialien/Baugruppen | Menge | Einheit | Verteilung | Kommentar |
|---|----------|---------|-----------------|---|
| *Zungenvorrichtung Komplettsatz (B) | 4505,76 | kg | Nicht definiert | |
| *Fahrschiene + Radlenker Komplettsatz (B) | 3394,31 | kg | Nicht definiert | |
| *Herzstück Komplettsatz (B) | 1372 | kg | Nicht definiert | |
| *Betonschwelle Komplettsatz (B) | 52589,16 | kg | Nicht definiert | |
| *Gleisschotter (B) | 187500 | kg | Nicht definiert | |
| *Befestigungsmaterial Komplettsatz (B) | 1208,94 | kg | Nicht definiert | |
| *Rippenplatten Komplettsatz (B) | 3775,22 | kg | Nicht definiert | |
| *Zwischenlagen Komplettsatz (B) | 155,60 | kg | Nicht definiert | |
| *Verschluss & Umstellgestänge ohne Weichenantrieb K | 1031,42 | kg | Nicht definiert | |
| *UE Zeltweg (B) | 68032,41 | kg | Nicht definiert | |
| *Betonschwellenbesohlung (B) | 771,12 | kg | Nicht definiert | 2*385,56 = 771.12; geschäumtes PU mit doppelter Dichte, da in Realität USP ungeschäumtes PU ist aber kein passender Datensatz in SimaPro existiert. |

| (Zeile hier einfügen) | | | | |
|--|----------|---------|-----------------|---|
| Prozesse | Menge | Einheit | Verteilung | Kommentar |
| *Trans_Befestigungsmaterial Komplettsatz (B) | 1208,94 | kg | Nicht definiert | |
| *Trans_Betonschwelle Komplettsatz (B) | 52589,16 | kg | Nicht definiert | |
| *Trans_Betonschwellenbesohlung (B) | 385,56 | kg | Nicht definiert | |
| *Trans_Herzstück Gussteile (B) | 870 | kg | Nicht definiert | Nur HZ - Gussteile weil Schienenanteil bereits in *Trans_Schiene enthalten ist. |
| *Trans_Rippenplatten Komplettsatz (B) | 3775,22 | kg | Nicht definiert | |
| *Trans_Schiene (B) | 8199,60 | kg | Nicht definiert | Alle Schienengewichte der gesamten Weiche addiert |
| *Trans_Zwischenlagen Komplettsatz (B) | 155,60 | kg | Nicht definiert | |

Abbildung 11: Baugruppe besohlte Betonschwellenweiche - SimaPro

Nachdem die Baugruppen für die Herstellungsprozesse der Weichen erstellt wurden, kann mit dem konfigurieren der Berechnungssetups für Cradle-to-Gate begonnen werden (siehe *Abbildung 12*).

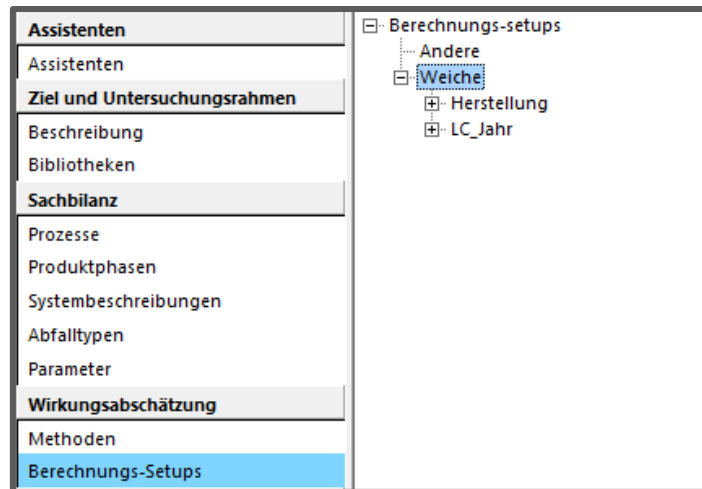


Abbildung 12: Berechnungssetup Cradle-to-Gate - SimaPro

Wie bereits früher in diesem Kapitel beschrieben, müssen 10 dieser Setups erstellt werden, damit alle zu untersuchenden Varianten bezüglich der Baugruppen und Bewertungsmethoden simuliert und hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen berechnet werden können. In *Abbildung 13* sieht man alle Baugruppen der Weiche einschließlich der Sensitivitätsanalyse für die beschlote Betonschwellenweiche, die mit der Bewertungsmethode CML-IA baseline simuliert werden.

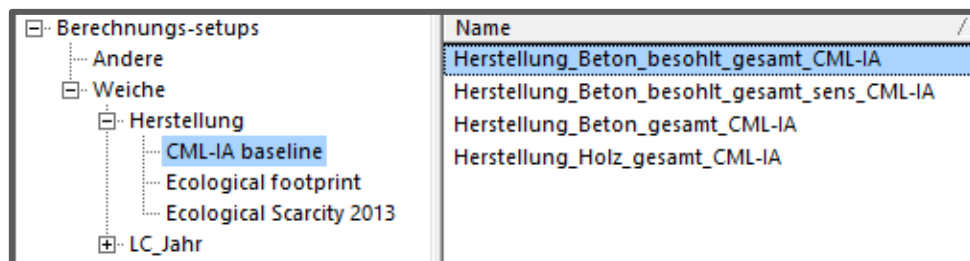


Abbildung 13: Berechnungssetups CML-IA - SimaPro

Abbildung 14 zeigt die Konfiguration eines solchen Berechnungssetups.

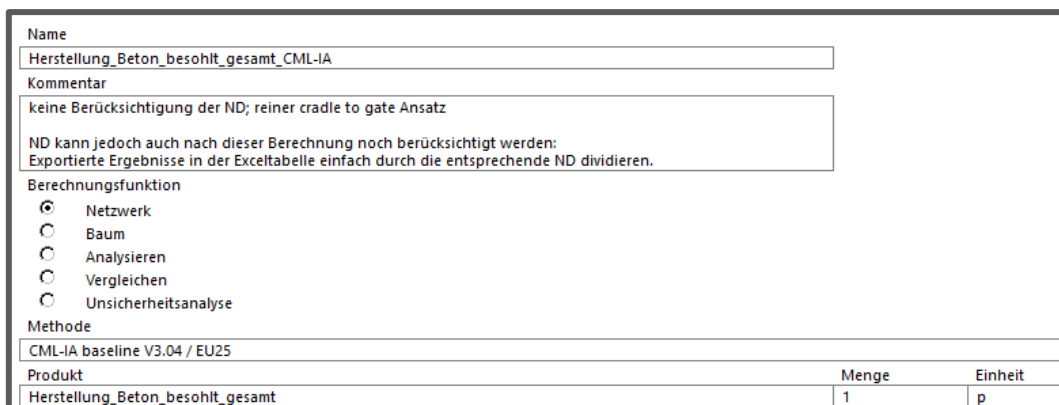


Abbildung 14: Berechnungssetup Einstellungen Cradle-to-Gate - SimaPro

6.2.2 Lifecycle Impact Assessment (LCIA)

Lifecycle Impact Assessment ist als Synonym für Ökobilanz zu verstehen. Es werden Umweltwirkungen der Weiche über ihren gesamten Lebensweg, unter der Berücksichtigung der Nutzungsdauer, berechnet. Nur so können alle Varianten des Produktsystems Weiche problemlos miteinander verglichen werden.

Aufgrund des zu Beginn dieser Arbeit definierten Ziels und Untersuchungsrahmens, ergibt sich ein doch erheblicher Simulationsaufwand der 500er Weiche bezüglich Ihrer Umweltwirkungen. Dies liegt daran, dass für jeden Oberbautyp mit jeder Belastungsklasse und den zuvor bestimmten Bewertungsmethoden extra ein Simulationssetup erstellt werden muss.

Daraus ergeben sich 27 unterschiedliche Simulationssetups, die es in weiterer Folge auszuwerten und zu interpretieren gilt.

Es bleibt jedoch nicht nur bei diesen 27 Varianten. Es muss auch die Sensitivitätsanalyse der besohnten Betonschwellenweiche in den Simulationen gesondert berücksichtigt werden. Um den Aufwand der Simulationsergebnisse jedoch nicht zu groß werden zu lassen, wird die Sensitivitätsanalyse nur bei der CML-IA Bewertungsmethode berücksichtigt. Dadurch entstehen 3 zusätzlich zu betrachtende Varianten im Berechnungssetup.

$$(3 \text{ Oberbautypen} \times 3 \text{ Belastungsklassen} \times 3 \text{ Bewertungsmethoden}) + 3 = 30 \text{ Varianten}$$

Wie die dargestellte Formel zeigt, müssen nach diesen Überlegungen insgesamt 30 verschiedene Weichenvarianten in SimaPro implementiert, simuliert und ausgewertet werden.

Modellierung in SimaPro

Bevor die Berechnungssetups erstellt und simuliert werden können, müssen vorab die entsprechenden Lebenszyklen in SimaPro erstellt werden. Dafür benötigt man neben den Prozessmodulen aus der Sachbilanz auch die zuvor im Kapitel 6.2.1 erstellten Baugruppen, die den Herstellungsprozess der einzelnen Weichen abbilden.

Für jede Variante, die sich aus den Belastungsklassen und Oberbautypen laut Untersuchungsrahmen ergeben, ist ein eigener Lebenszyklus zu erstellen. Diese Lebenszyklen beinhalten nun alle Lebensphasen des Produktsystems, wodurch alle Prozessmodule aus der Sachbilanzphase berücksichtigt werden müssen.

Abbildung 15 zeigt die übergeordnete Struktur des Modells bezüglich der Lebenszyklen. Für die besohlte Betonschwellenweiche existieren aufgrund der Sensitivitätsanalyse sechs

Lebenszyklen (siehe *Abbildung 16*). Für die Holz- und die Betonschwellenweiche gibt es jeweils nur drei Lebenszyklen.

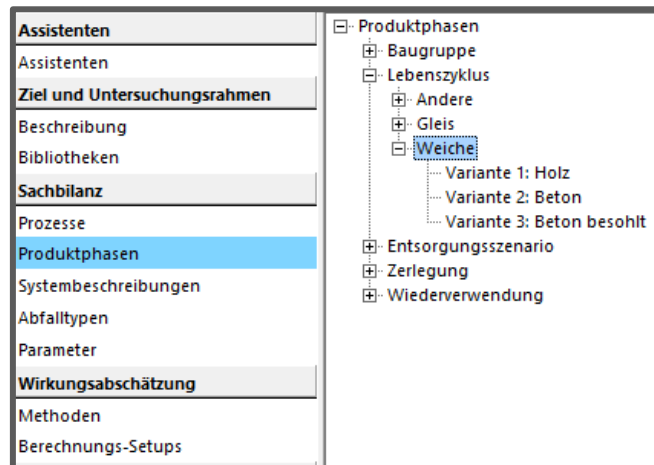


Abbildung 15: Lebenszyklen Strukturübersicht - SimaPro

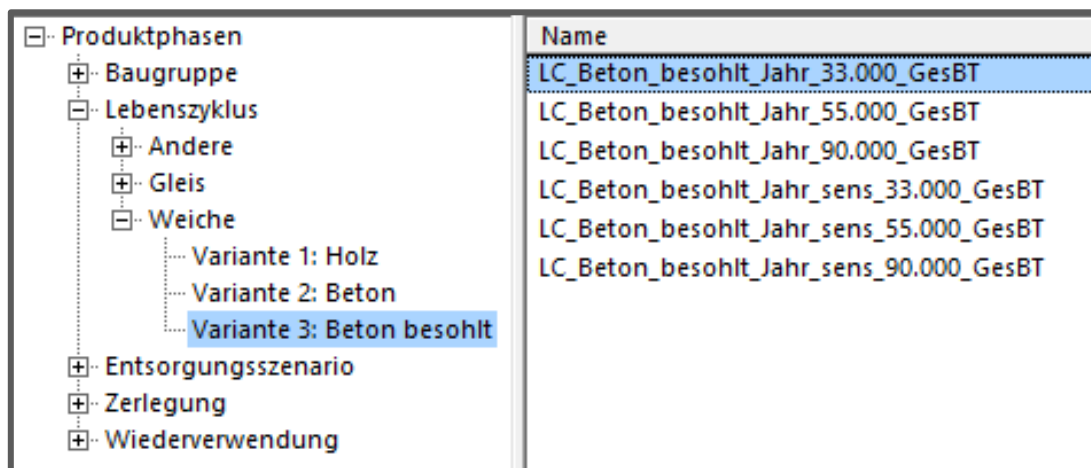


Abbildung 16: Lebenszyklen besohlte Betonschwellenweiche Variantenübersicht - SimaPro

Die Vorteile der Skalierbarkeit und der leichten Abänderbarkeit der hinterlegten ecoinvent Datensätze bleiben bestehen. Der Unterschied zu den Baugruppen besteht darin, dass im Konfigurationsmenü der Lebenszyklen keine Gewichts- sondern Stückangaben verwendet werden.

Anhand eines Beispiels soll nun das Konfigurationsmenü der Lebenszyklen in SimaPro erklärt werden. In *Abbildung 17* wird der Lebenszyklus der besohnten Betonschwellenweiche mit einer Gleisbelastung von 33.000 GesBT/Tag nachgebildet. Die erste Lebensphase, die Herstellung der Weiche, wird durch die Baugruppe der besohnten Betonschwellenweiche erzeugt. Es folgen die Phasen des Einbaus und der Instandhaltung, repräsentiert durch die abgebildeten Bausteine unter der Kategorie „Prozesse“. Das Ende der Lebensphase bildet das für das Entsorgungsszenario erstellte Prozessmodul. Abschließend muss noch überprüft werden, ob die zu Beginn der Ökobilanz bestimmte funktionelle Einheit eingehalten

Wirkungsabschätzung

wird. Die verwendeten Prozessmodule spiegeln die Gesamtheit der auftretenden Umweltwirkungen der Weiche über ihren gesamten Lebensweg wider. Deshalb müssen diese Prozessmodule durch die Nutzungsdauer des jeweiligen Produktsystems dividiert werden, um die jährlichen Umweltwirkungen der Weiche zu erhalten, wie von der funktionellen Einheit gefordert. Die Nutzungsdauer wird in der Mengenangabe durch einen Faktor berücksichtigt und wird wie folgt berechnet:

$$\frac{1}{ND} = \frac{1}{42} = 0,023809524$$

| Name | Status | Kommentar | | | | | |
|------------------------------------|-------------|-------------------------------------|----------------|----------------|-----|-----|------------|
| LC_Beton_besohlt_Jahr_33.000_GesBT | Keine | ND = 42 Jahre, Quelle: StdE Weichen | | | | | |
| Baugruppe | Menge | Einheit | Verteilung | SA^2 oder 2*SA | Min | Max | Kommentar |
| Herstellung_Beton_besohlt_gesamt | 0,023809524 | p | Nicht definier | | | | 1/42 Jahre |
| Prozesse | Menge | Einheit | Verteilung | SA^2 oder 2*SA | Min | Max | Kommentar |
| *Einbau_Beton_besohlt | 0,023809524 | p | Nicht definier | | | | 1/42 Jahre |
| *IH_Beton_besohlt_33.000_GesBT | 0,023809524 | p | Nicht definier | | | | 1/42 Jahre |
| (Zeile hier einfügen) | | | | | | | |
| Abfall-/Entsorgungsszenario | | | | | | | Kommentar |
| *Ent_Beton_besohlt | | | | | | | |
| (Zeile hier einfügen) | | | | | | | |
| Zusätzliche Lebenszyklen | Zahl | Verteilung | | SA^2 oder 2*SA | Min | Max | Kommentar |
| (Zeile hier einfügen) | | | | | | | |

Abbildung 17: Lebenszyklus besohlte Betonschwellenweiche_33.000 GesBT/Tag - SimaPro

Jede Lebenszyklusvariante muss auf diese Weise entsprechend ihrer Nutzungsdauer und Prozessmodule erstellt werden.

Nachstehend sind alle Lebenszyklusvarianten, für die eine Simulation durchgeführt werden soll, geordnet nach Belastungsklassen aufgelistet:

- 33.000 GesBT/Tag, Gleis
 - Holzschwellenweiche
 - Betonschwellenweiche
 - Besohlte Betonschwellenweiche
 - Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- 55.000 GesBT/Tag, Gleis
 - Holzschwellenweiche
 - Betonschwellenweiche
 - Besohlte Betonschwellenweiche

- Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- 90.000 GesBT/Tag, Gleis
 - Holzschwellenweiche
 - Betonschwellenweiche
 - Besohlte Betonschwellenweiche
 - Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse

Nachdem die Zyklen der kompletten Lebenswege der Weichen erstellt wurden, kann mit dem konfigurieren der Berechnungssetups für LCIA begonnen werden (siehe *Abbildung 18*).

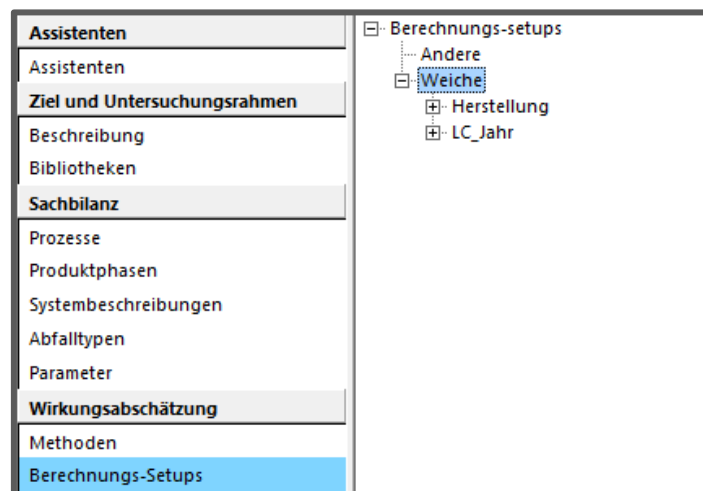


Abbildung 18: Berechnungssetup Lebenszyklen - SimaPro

Wie bereits früher in diesem Kapitel beschrieben, müssen 30 dieser Setups erstellt werden, damit alle zu untersuchenden Varianten bezüglich der Lebenszyklen und Bewertungsmethoden simuliert und hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen berechnet werden können. In *Abbildung 19* sieht man alle Lebenszyklen der Weiche einschließlich der Sensitivitätsanalysen für die besohlte Betonschwellenweiche, die mit der Bewertungsmethode CML-IA baseline simuliert werden.

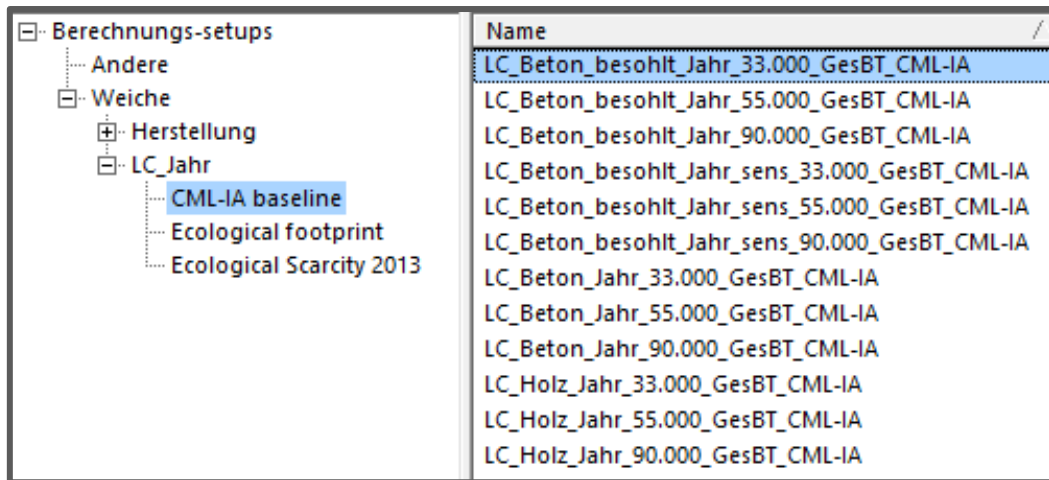


Abbildung 19: Berechnungssetup CML-IA Lebenszyklen-Varianten - SimaPro

Die Abbildung 20 zeigt die Konfiguration eines solchen Berechnungssetups.

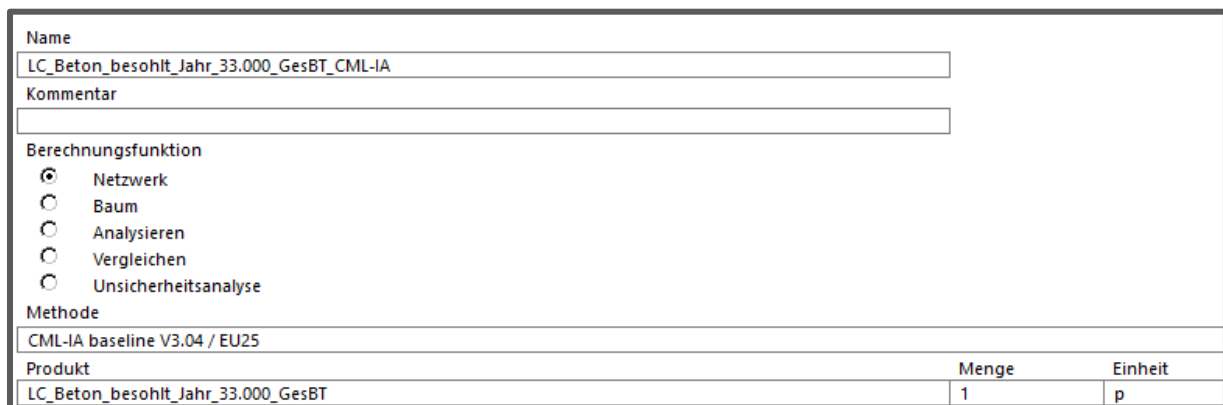


Abbildung 20: Berechnungssetup Lebenszyklus besohlte Betonschwellenweiche 33.000 GesBT/Tag - SimaPro

Sind alle gewünschten Weichenvarianten und Bewertungsmethoden über ein Berechnungssetup definiert, ist das Modell der Ökobilanz Weiche in SimaPro somit abgeschlossen. Es können nun alle Berechnungssetups simuliert, und die berechneten Ergebnisse für die spätere Auswertung exportiert werden.

Die Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse der Ökobilanz erfolgt in Kapitel 7.

7 Auswertung

Der letzte Teil der Ökobilanz beschäftigt sich mit der Auswertung der Ergebnisse aus der Sachbilanz- und der Wirkungsabschätzungsphase. Dabei sollen die Umweltwirkungen der einzelnen Varianten des Produktsystems analysiert und miteinander verglichen werden. Die Auswertung soll dazu dienen, die maßgebenden Emissionsauslöser zu bestimmen und diese Informationen für strategische und umwelttechnische Entscheidungen im Produktionsprozess zu Verfügung zu stellen.

Durch die Auswertung der Ökobilanzergebnisse sollen laut Zieldefinition folgende Fragen geklärt werden:

- Welche Komponenten sind die maßgebenden Emissionsauslöser innerhalb des Produktsystems Weiche?
- Innerhalb welcher Lebensphasen treten die größten Umweltwirkungen auf?
- Welcher Oberbautyp verursacht in Bezug auf Ressourcenverbrauch und Emissionen die geringsten negativen Umweltwirkungen?

Um bei der großen Anzahl an simulierten Produktsystemvarianten nicht den Überblick zu verlieren, wird die Auswertung nach den Bewertungsmethoden

- CML-IA baseline,
- ökologische Knappheit und
- ökologischer Fußabdruck

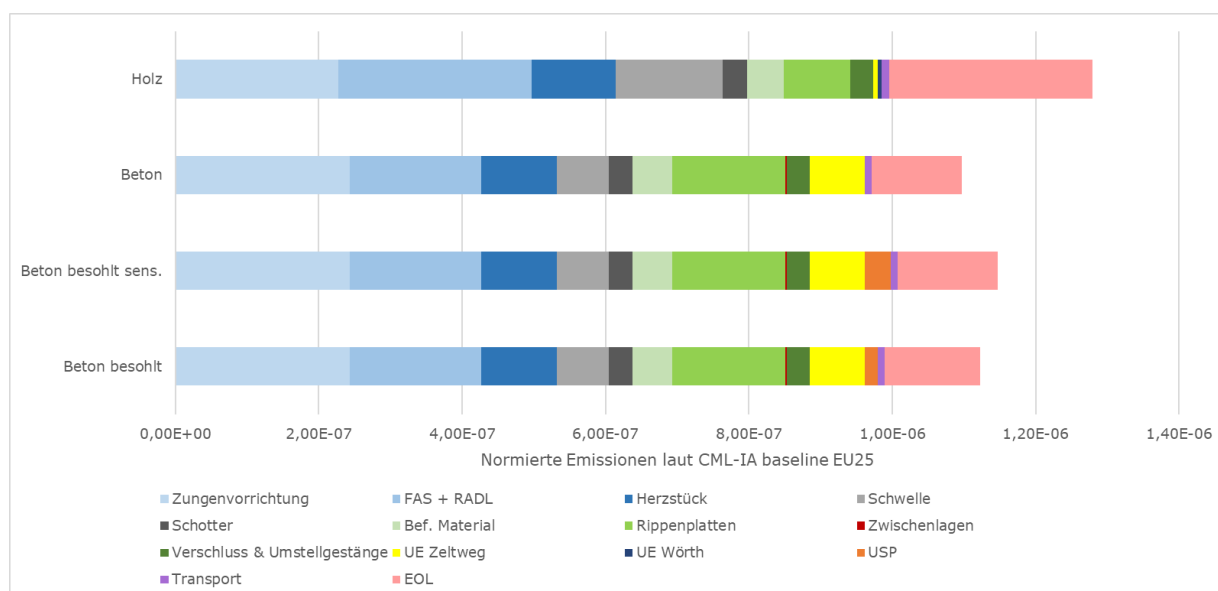
unterteilt. Zu Beginn der Auswertungen einer jeden Bewertungsmethode wird der Herstellungsprozess (Cradle-to-Gate) inklusive Entsorgung analysiert. Im darauffolgenden Abschnitt erfolgt dann die eigentliche Auswertung der Ökobilanz durch die Analysierung der Umweltwirkungen der Weichen über ihren gesamten Lebensweg.

7.1 CML-IA baseline

Die Auswertung erfolgt mit den normierten Ergebnissen aus SimaPro. Durch die Normierung werden die Werte der einzelnen Wirkungskategorien Einheitenlos und können so miteinander verglichen und aggregiert werden.

7.1.1 Cradle-to-Gate

In diesem Abschnitt werden für jede Komponenten-kategorie die normierten Ergebnisse der Wirkungskategorien aus dem Herstellungsprozess und der Entsorgung aufsummiert und farblich codiert in einem Diagramm dargestellt. Gleichzeitig werden die berechneten Ergebnisse der einzelnen Oberbautypen gegenübergestellt (siehe *Abbildung 21*).



*Abbildung 21: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25
gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung*

Es ist deutlich erkennbar, dass die blau codierten, aus Schienenstahl bestehenden Hauptkomponenten der Weiche, für rund die Hälfte aller Umweltwirkungen verantwortlich sind. Aufgrund des hohen Ressourcen- und Energieaufwandes während ihrer Produktion, lässt sich dies auch plausibel erklären. Das dabei der Anteil der Fahrschiene und des Radlenkers bei der Holzschwellenweiche höher ist als jener der Betonschwellenweiche liegt daran, dass laut den ausgearbeiteten Stücklisten für diese Komponenten 1,5 to mehr Material auf Seiten der Weiche mit Holzschwellenoberbau verbaut wird. Ebenso verhält es sich mit dem Herzstück. Das Herzstück der Holzschwellenweiche ist um 300 kg schwerer als jenes der Betonschwellenweiche. Aus demselben Grund gibt es auch bei den Rippenplatten einen deutlichen Unterschied zwischen dem Holz- und Betonoberbau. In diesem Fall ist es die Betonschwellenweiche, die um 1 to mehr Material für Rippenplatten verbaut hat. Dadurch

wird klar, wie wichtig es ist, die Erkenntnisse aus der Sachbilanz in die Auswertung mit einfließen zu lassen.

Vergleicht man die Schwellen, wird deutlich, dass Holzschwellen für die doppelte Menge an Umweltwirkungen verantwortlich ist als die Betonschwelle. Das liegt einerseits am hohen Rohstoffverbrauch von geeignetem Schwellenholz und andererseits am Einsatz von Holz imprägnierungsmittel aus Bitumen, welches die Nutzungsdauer der Schwelle erhöht. Dieses Imprägnierungsmittel wird aus Erdöl gewonnen, wodurch fossile Ressourcen verbraucht werden.

Der Einsatz von Bitumen wirkt sich auch deutlich auf das Lebensende (EOL=End Of Life) der Holzschwellenweiche aus. Die Umweltwirkungen bezüglich der Entsorgung von Holzschwellen sind um ein Vielfaches höher als jene der Betonschwellen. Grund dafür ist der enorme CO₂ Ausstoß während der Verbrennung der bituminösen Holzschwellen und dem sich daraus ergebenden Potenzial der globalen Erwärmung.

Die entsorgte Betonschwelle wird deponiert. Die größte Umweltwirkung, die dabei entsteht, ist die Versauerung vom Boden, bedingt durch das Ausschwämmen der Betoninhaltsstoffe durch den Regen.

Die Anteile der Weichenwerke Zeltweg und Wörth an den Umweltwirkungen werden durch die beiden Kategorien UE Zeltweg und UE Wörth abgebildet. Der im Vergleich sehr kleine Anteil vom Weichenwerk Wörth lässt sich damit erklären, dass es gewisse Produktionsprozesse, wie die Bearbeitung der Zungenvorrichtung und des Herzstückes in Wörth gar nicht gibt. Darüber hinaus gibt es in Wörth ein besseres Standortklima, weniger Bürokomplexe und die Gebäude wurden thermisch saniert.

Es ist anzumerken, dass der Transport, der im Zuge des Herstellungsprozesses entsteht, kaum Einfluss auf die Umwelt hat.

Betrachtet man zu guter Letzt die Betonschwellenbesohlung, fällt auf, dass die Umweltwirkungen, gemessen am Verhältnis zwischen dem Gesamtgewicht der Weiche und dem Gewicht der kompletten Schwellenbesohlung, sehr hoch ausfallen.

Bisher konnte somit die Frage beantwortet werden, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind. Das sind:

- Zungenvorrichtung
- Fahrschiene und Radlenker
- Herzstück

Auswertung

- Rippenplatten
- Holzschwelle

Man erkennt, dass die aus Schienenstahl gefertigten Komponenten einer Weiche die größten Umweltwirkungen verursachen.

Für die Beantwortung der Fragen, welche Lebensphasen einer Weiche die größten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten Umweltwirkungen verantwortlich ist, müssen die jährlichen Umweltwirkungen des kompletten Lebensweges einer Weiche herangezogen werden.

Würde man versuchen auf Basis von absoluten Werten eine Reihung der Oberbautypen bezüglich den geringsten Umweltwirkungen durchzuführen, würde man dadurch folgendes Ergebnis erhalten:

- Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- Holzschwellenweiche

Doch diese Reihung erfolgt ohne Berücksichtigung der Nutzungsdauer, wodurch Fehlinterpretationen entstehen können. Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz. Und nur unter der Berücksichtigung der Nutzungsdauer können Reihungen, Vergleiche und Sensitivitätsanalysen sinnvoll durchgeführt werden.

Im nächsten Abschnitt werden nun die Ergebnisse der Ökobilanz auf der Basis von jährlichen Umweltwirkungen mit Hilfe verschiedener Darstellungsformen ausgewertet.

7.1.2 Lifecycle Impact Assessment (LCIA)

Nachdem im vorherigem Abschnitt dieses Kapitels die Frage geklärt wurde, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind, beschäftigt sich dieser Abschnitt damit, welche Lebensphasen einer Weiche die meisten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten negativen Umwelteinflüsse sorgt. Hierfür werden 2 Darstellungsformen der Ökobilanzergebnisse verwendet. Einerseits die Gegenüberstellung aller Oberbautypen bezogen auf eine einzige Belastungsklasse und entsprechender Angabe der Nutzungsdauer. Und andererseits die Gegenüberstellung aller Belastungsklassen bezogen auf einen einzigen Oberbautyp. In beiden Varianten werden die jährlichen Umweltwirkungen bezogen auf die Lebensphasen für die Auswertung verwendet. Die Lebensphasen werden dabei wie folgt gegliedert:

- Herstellung
- Einbau
- Instandhaltung (Nutzungsphase)
- EOL (End Of Life)

Es wird darauf hingewiesen, dass Transportwege, Maschinenstunden, Energieverbrauch und dergleichen entsprechend ihres Entstehungsortes den jeweiligen Lebensphasen zugeordnet und modelliert wurden. Für detailliertere Informationen wird auf das Kapitel 5 verwiesen.

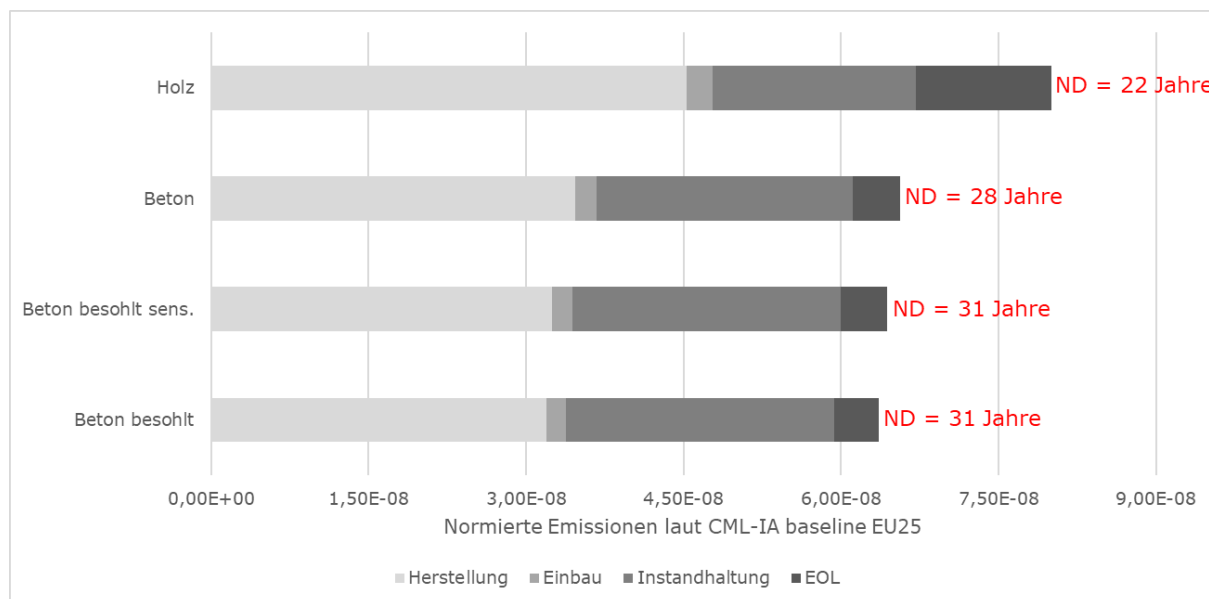


Abbildung 22: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25
LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 22 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Auf den ersten Blick wird klar, dass der Herstellungsprozess den größten Anteil der jährlichen LCI's besitzt.

Den zweitgrößten Anteil beanspruchen die Nutzungsphase bzw. die Instandhaltung für sich. Grund dafür ist der keinesfalls zu vernachlässigte Energie- und Ressourcenverbrauch, hervorgerufen durch den verschleißbedingten Austausch hochbelasteter Komponenten.

Durch die hohe Recyclingrate der Metallkomponenten von 95 %, fallen die Umweltwirkungen am Ende der Nutzungsdauer dementsprechend geringer aus, als die beiden zuvor betrachteten Lebensphasen. Einzige Ausnahme bildet hier die Holzschwellenweiche. Durch das Verbrennen der nicht mehr verwendbaren, mit Bitumen imprägnierten Holzschwellen wird eine erhebliche Menge an CO₂ ausgestoßen, was wiederum stark zur Erderwärmung beiträgt.

Der mit Abstand kleinste Anteil an den jährlichen Umwelteinflüssen wird während des Einbaus der Weichen erzeugt.

Nachdem nun die Lebensphasen mit den höchsten Umweltwirkungen identifiziert wurden, gilt es nun den Oberbautyp mit den geringsten Umwelteinflüssen zu bestimmen.

Reiht man die Weichen entsprechend der Oberbauvarianten mit den geringsten Umwelteinflüssen und verwendet dabei die jährlichen Umweltwirkungen, die man durch die Berücksichtigung der Nutzungsdauern erhält, gibt das folgendes Ergebnis:

Auswertung

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Absolut betrachtet entstehen bei der Betonschwellenweiche weniger Umweltwirkungen aufgrund des Wegfalls der Betonschwellenbesohlung. Jedoch sind die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche durch die längere Nutzungsdauer geringer. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass selbst bei der Annahme der doppelten Masse von geschäumtem Polyurethan, welches für die Modellierung der Schwellenbesohlung als Datensatz in SimaPro hinterlegt wurde, das Ergebnis der Reihung unverändert bleibt.

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

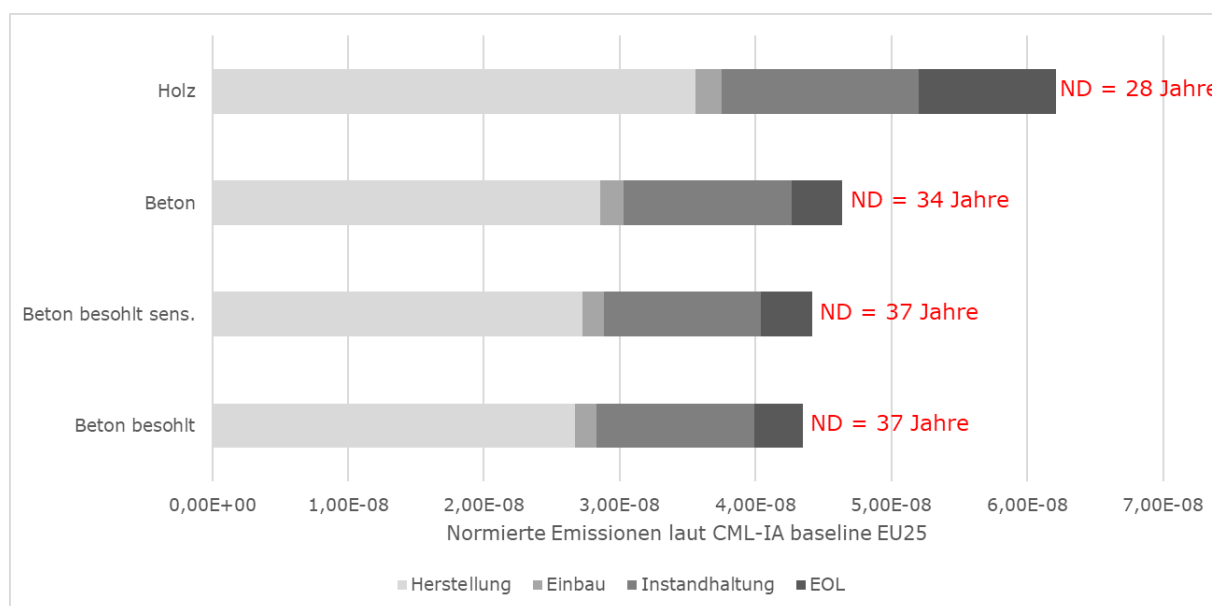


Abbildung 23: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 23 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 55.000 GesBT/Tag.

Die Bestimmung der kritischen Lebensphasen sowie der umweltfreundlichsten Oberbautypen liefert dieselben Ergebnisse wie bei einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Auswertung

Die Herstellung erzeugt erneut die größten Umweltwirkungen, gefolgt von der Nutzungsphase. Die Abfallbehandlung der Holzschwellenweiche liefert im Vergleich zum Betonoberbau wieder etwas höhere Werte aufgrund der Verbrennung der ausgedienten Holzschwellen. Der Weicheneinbauprozess bildet wiederum den deutlich kleinsten Anteil an den gesamten jährlichen Umweltwirkungen ab.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt auch bei einer Belastung von 55.000 GesBT/Tag wie folgt:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

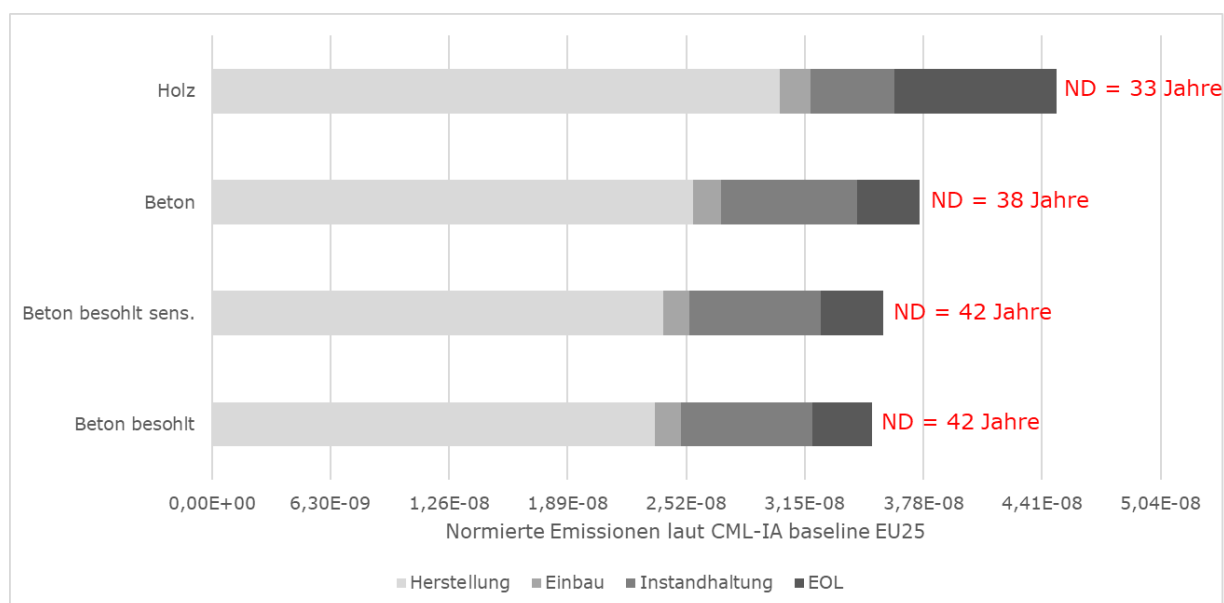


Abbildung 24: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25
LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 24 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 33.000 GesBT/Tag.

Bei der Bestimmung der kritischen Lebensphasen liefert das Modell leicht abweichende Ergebnisse im Vergleich zu den beiden zuvor analysierten Gleisbelastungen.

Die Herstellung erzeugt erneut die größten Umweltwirkungen. Jedoch ist die Nutzungsphase nur mehr bei Weichen mit Betonoberbau die zweitgrößte Quelle für negative Umwelteinflüsse. Aufgrund des geringen Instandhaltungsbedarfs in dieser Belastungsklasse, überwiegen die negativen Umwelteinflüsse aus der Verbrennung der Altholzschwellen den Einfluss des Instandhaltungstechnischen Materialaustausches.

Der Weicheneinbauprozess bildet wiederum den deutlich kleinsten Anteil an den gesamten jährlichen Umweltwirkungen.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt auch bei einer Belastung von 33.000 GesBT/Tag wie folgt:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche_Sensitivitätsanalyse
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

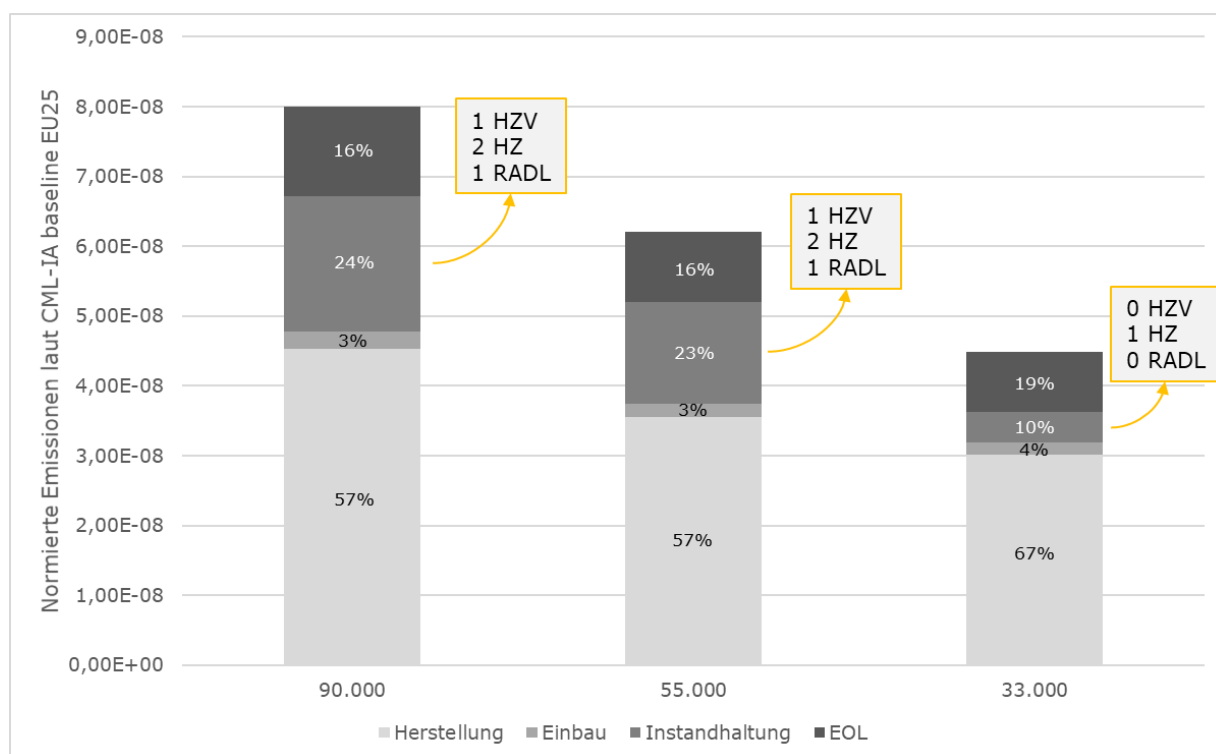


Abbildung 25: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 25 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Holzschwellenweiche für alle Belastungsklassen. Die Werte in den Boxen stehen dabei für die Anzahl, wie oft die halbe Zungenvorrichtung (HZV), das Herzstück (HZ) und die Radlenker (RADL) im Laufe der Nutzungsphase der Weiche getauscht werden müssen.

Bei dieser Darstellung der Ökobilanzergebnisse kann auf dem ersten Blick sofort beobachtet werden, dass bei sinkender Gleisbelastung die Nutzungsdauer aufgrund der geringeren Beanspruchung der Weiche steigt und somit die negativen jährlichen Umwelteinflüsse sinken.

Bei falscher Interpretation dieser Ergebnisse bedeutet dies, dass Eisenbahnstrecken mit zu hohem Verkehrsaufkommen schädlich für die Umwelt sind. Das verkehrs- und umweltpolitische Ziel kann jedoch keinesfalls sein, den Schienenverkehr zu reduzieren, sondern ihn zu erhöhen, um dadurch die Anteile am Modal Split des motorisierten Individual- und Güterverkehrs der Straße zu reduzieren.

Die korrekte Schlussfolgerung muss also lauten, die Qualität der Weichenkomponenten zu verbessern und dadurch die Nutzungsdauer zu steigern, um somit die jährlichen Umweltwirkungen zu senken.

Dieses wichtige Prinzip der Nutzungsdauerverlängerung durch verbesserte Komponentenqualität kann auch während der Nutzungsphase sinnvoll angewendet werden. *Abbildung*

25 zeigt, dass der Instandhaltungsbedarf und somit die Umweltbelastung einer Weiche steigt, je höher diese belastet wird. Im Falle einer mit 90.000 GesBT/Tag belasteten Holzschwellenweiche, muss im Laufe der gesamten Nutzungsdauer das Herzstück aus verschleißtechnischen Gründen zwei Mal gewechselt werden. Der damit verbundene Ressourcen- und Energieverbrauch kann reduziert werden, indem durch eine höhere Komponentenqualität der Instandhaltungsbedarf verringert wird. Darüber hinaus spielt eine adäquate Zustandsbeschreibung und Prognose der Weiche für einen optimierten Instandhaltungsplan eine wichtige Rolle.

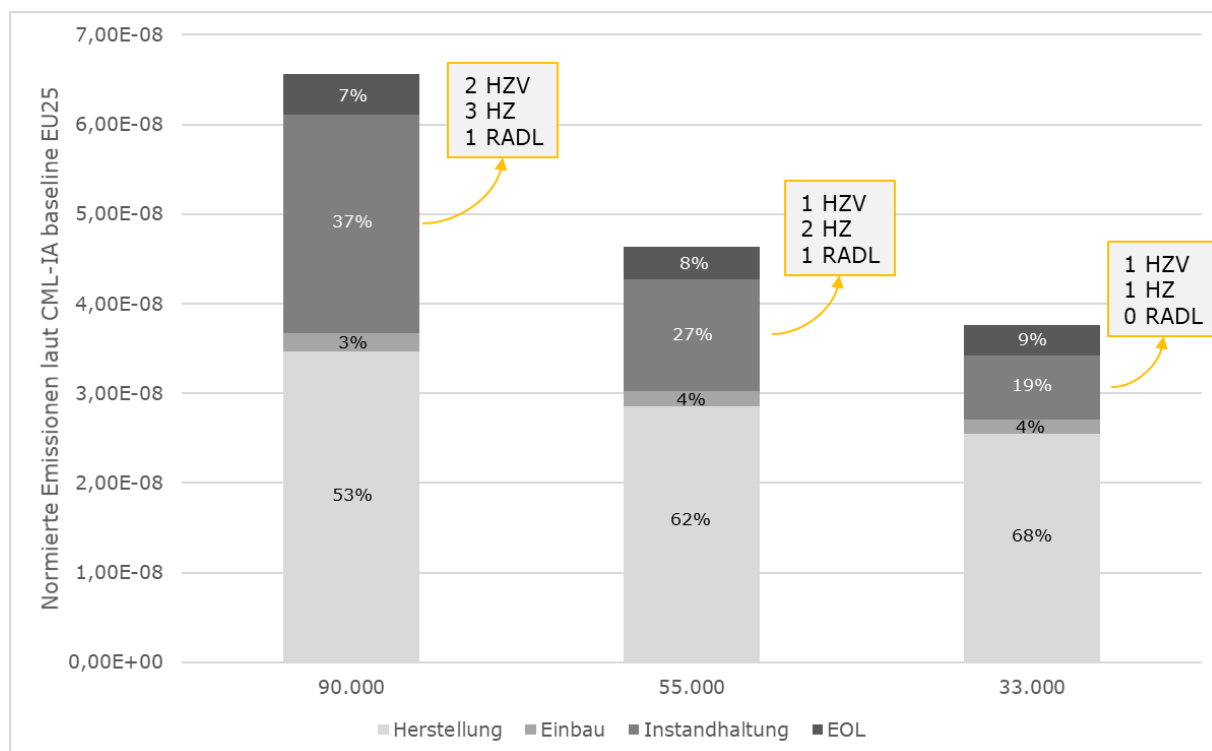


Abbildung 26: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25 LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 26 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen. Die Werte in den Boxen stehen dabei für die Anzahl, wie oft die halbe Zungenvorrichtung (HZV), das Herzstück (HZ) und die Radlenker (RADL) im Laufe der Nutzungsphase der Weiche getauscht werden müssen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken erkennt man einen deutlich erhöhten Instandhaltungsbedarf der Betonschwellenweiche gegenüber der Holzschwellenweiche. Dabei darf jedoch keinesfalls außer Acht gelassen werden, dass die Betonschwellenweiche eine um sechs Jahre höhere Nutzungsdauer aufweist. Nichtsdestotrotz gibt es hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

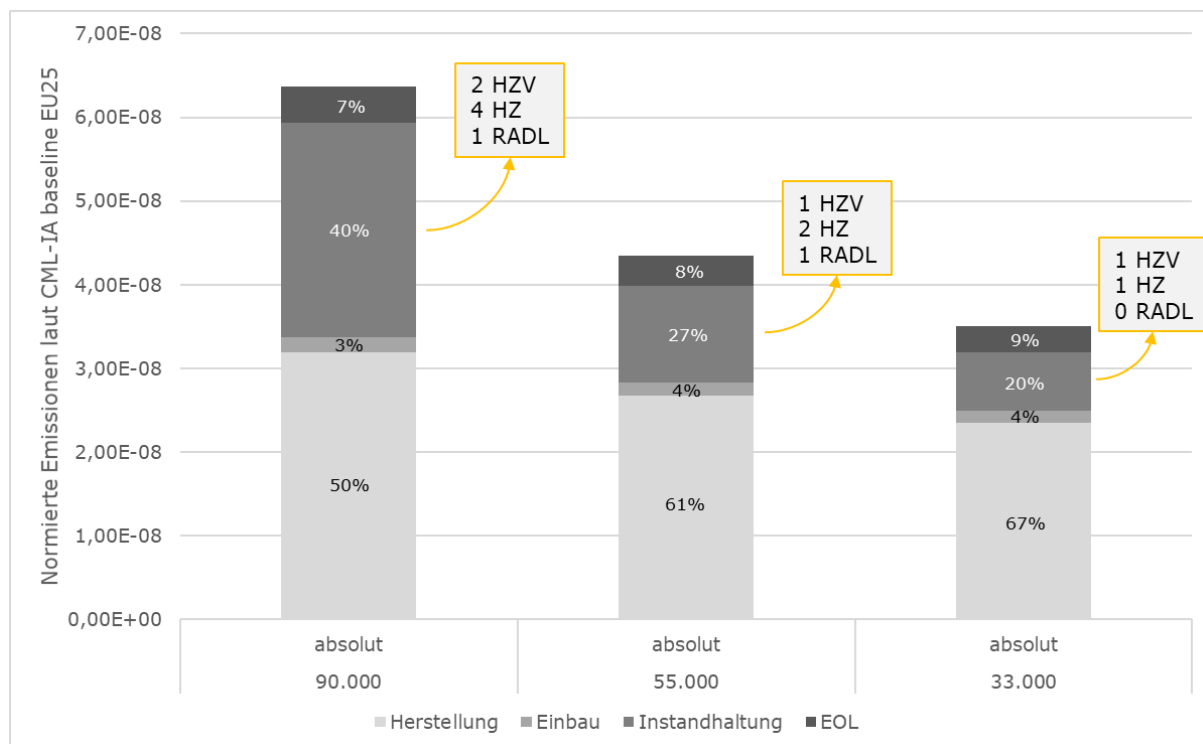


Abbildung 27: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25

LCI/Jahr der besohnten Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 27 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen. Die Werte in den Boxen stehen dabei für die Anzahl, wie oft die halbe Zungenvorrichtung (HZV), das Herzstück (HZ) und die Radlenker (RADL) im Laufe der Nutzungsphase der Weiche getauscht werden müssen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken weist die besohnte Betonschwellenweiche den größten Instandhaltungsbedarf gegenüber allen anderen Oberbautypen auf. Jedoch ist die Nutzungsdauer mit 31 Jahren deutlich am höchsten, wodurch sich gesamtheitlich betrachtet die geringsten jährlichen Umweltwirkungen ergeben. Nichtsdestotrotz gibt es auch hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

7.2 Ökologische Knappheit

Die Auswertung erfolgt mit den charakterisierten Ergebnissen aus SimaPro. Durch die Charakterisierung werden die Werte der einzelnen Wirkungskategorien als Umweltbelastungspunkte (UBP) (siehe Kapitel 6.1.2) ausgedrückt und können so miteinander verglichen und aggregiert werden.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Sensitivitätsanalyse bei dieser Bewertungsmethode nicht mehr angewendet wird. Bereits im Kapitel 6.1.1 wurde bewiesen, dass eine Verdoppelung des Polyurethananteils für die Betonschwellenbesohlung zu keiner Änderung der Reihung für die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen führt.

7.2.1 Cradle-to-Gate

Die Ergebnisse der einzelnen Oberbautypen werden in *Abbildung 28* gegenübergestellt.

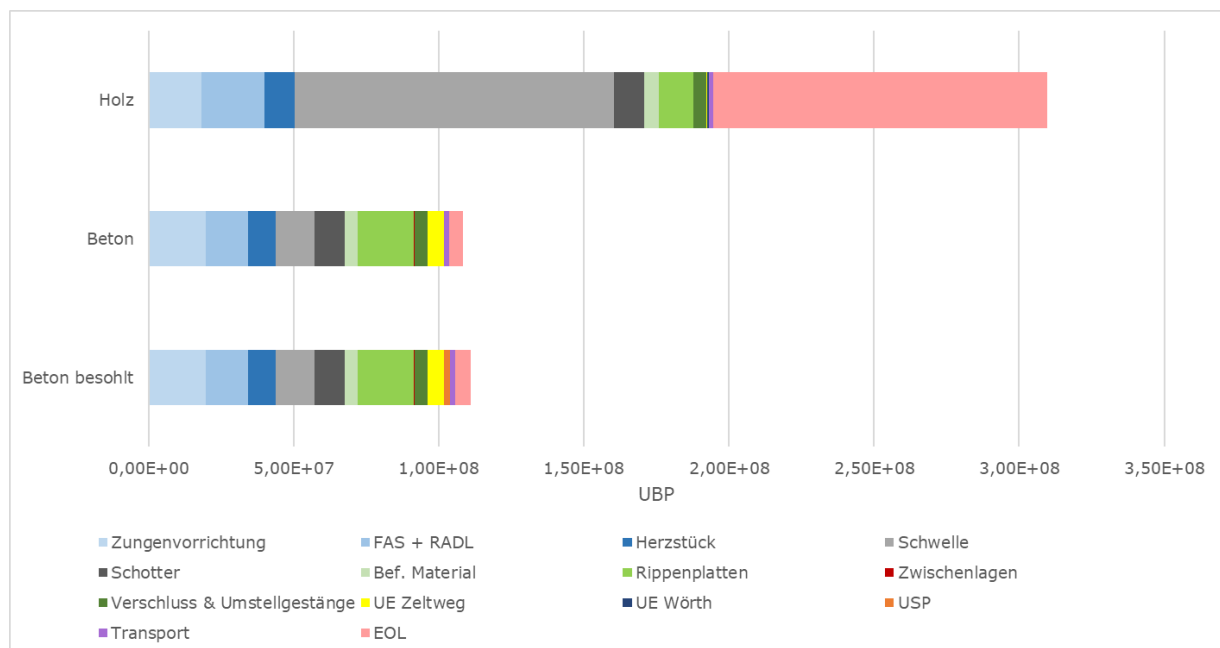


Abbildung 28: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung

Es ist deutlich erkennbar, dass die Schwellen und das Lebensende der Holzschwellenweiche für die mit Abstand größten Umweltwirkungen verantwortlich sind. Bezieht man die Einzelergebnisse der Wirkungskategorien in die Auswertung mit ein und berücksichtigt gleichzeitig den Schwerpunkt auf den Ressourcenverbrauch dieser Bewertungsmethode, ist dieses Ergebnis plausibel erklärbar.

Die Wirkungskategorie Flächenverbrauch ist der maßgebende Treiber von negativen Umwelteinflüssen der Holzschwelle. Für dessen Herstellung werden große Mengen an geeignetem Holz benötigt, welches wiederum nur durch sehr große Waldflächen abgedeckt werden kann. In Verbindung mit der Erhöhung des Potentials für den Treibhauseffekt, der durch die Abholzung der benötigten Bäume und der sich daraus ergebenden fehlenden Umwandlung von CO₂ in Sauerstoff entsteht, sind Holzschwellen bei der Herstellung die größten Umweltsünder der Ökobilanz innerhalb dieser Bewertungsmethode.

Die Holzschwelle wirkt sich jedoch auch auf das Lebensende (EOL) der Weiche am negativsten aus. Wieder ist der Flächenverbrauch die kritischste Wirkungskategorie mit den meisten Umweltbelastungspunkten. Diesmal begründet durch die enorme Waldfläche, die benötigt wird, um das CO₂ zu binden, welches durch die Verbrennung der mit Bitumen imprägnierten Altholzschwellen entsteht.

Beim Betonoberbau sind nach wie vor alle zusammengefasst betrachteten Metallerzeugnisse die größten Treiber. Doch die Betonschwellen und der Schotter besitzen einen auffallend großen Anteil an den gesamten negativen Umwelteinflüssen. Dieses Ergebnis ist wieder der großen Gewichtung des Ressourcenverbrauches innerhalb dieser Bewertungsmethode zuzuschreiben. Für das Schotterbett und der Herstellung von Beton werden mineralische Ressourcen benötigt. Darüber hinaus werden während der Betonproduktion große Mengen an CO₂ freigesetzt, was zu einer entsprechenden Erhöhung der Umweltbelastungspunkte für Betonschwellen führt.

Bezüglich der Altstoffbehandlung entstehen bei Weichen mit Betonoberbau keine großen Umweltwirkungen, da die Metallkomponenten zu 95 % recycelt werden und durch die Deposition von Schotter und der Schwelle innerhalb dieser Bewertungsmethode keine kritischen Belastungen entstehen.

Die Anteile der Weichenwerke Zeltweg und Wörth an den Umweltwirkungen werden durch die beiden Kategorien UE Zeltweg und UE Wörth abgebildet. Der im Vergleich sehr kleine Anteil vom Weichenwerk Wörth lässt sich damit erklären, dass es gewisse Produktionsprozesse, wie die Bearbeitung der Zungenvorrichtung und des Herzstückes in Wörth gar nicht gibt. Darüber hinaus gibt es in Wörth ein besseres Standortklima, weniger Bürokomplexe und die Gebäude wurden thermisch saniert.

Es ist anzumerken, dass der Transport, der im Zuge des Herstellungsprozesses entsteht, kaum Einfluss auf die Umwelt hat.

Betrachtet man zu guter Letzt die Betonschwellenbesohlung, fällt auf, dass die Umweltwirkungen, gemessen am Verhältnis zwischen dem Gesamtgewicht der Weiche und dem Gewicht der kompletten Schwellenbesohlung, sehr hoch ausfallen.

Bisher konnte nur die Frage beantwortet werden, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind. Innerhalb dieser Bewertungsmethode muss man zwischen Holz- und Betonschwellenweiche unterscheiden. Für die Holzschwellenweiche sind folgende Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser:

- Holzschwelle
- Alle Metallkomponenten zusammengefasst

Für Betonschwellenweichen gilt folgendes Ergebnis:

- Alle Metallkomponenten zusammengefasst
- Betonschwelle
- Schotter

Man erkennt, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Bewertungsmethoden doch deutlich voneinander abweichen.

Für die Beantwortung der Fragen, welche Lebensphasen einer Weiche die größten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten Umweltwirkungen verantwortlich ist, müssen die jährlichen Umweltwirkungen des kompletten Lebensweges einer Weiche herangezogen werden.

Würde man versuchen auf Basis von absoluten Werten eine Reihung der Oberbautypen bezüglich den geringsten Umweltwirkungen durchzuführen, würde man dadurch folgendes Ergebnis erhalten:

- Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Doch diese Reihung ist wegen der Vernachlässigung der Nutzungsdauer nicht korrekt. Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz. Und nur unter der Berücksichtigung der Nutzungsdauer können Reihungen und Vergleiche sinnvoll durchgeführt werden.

Im nächsten Abschnitt werden nun die Ergebnisse der Ökobilanz auf der Basis von jährlichen Umweltwirkungen mit Hilfe verschiedener Darstellungsformen ausgewertet.

7.2.2 Lifecycle Impact Assessment (LCIA)

Nachdem im vorherigem Abschnitt dieses Kapitels die Frage geklärt wurde, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind, beschäftigt sich dieser Abschnitt damit, welche Lebensphasen einer Weiche die meisten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten negativen Umwelteinflüsse sorgt. Hierfür werden 2 Darstellungsformen der Ökobilanzergebnisse verwendet. Einerseits die Gegenüberstellung aller Oberbautypen bezogen auf eine einzige Belastungsklasse und entsprechender Angabe der Nutzungsdauer. Und Andererseits die Gegenüberstellung aller Belastungsklassen bezogen auf einen einzigen Oberbautyp. In beiden Varianten werden die jährlichen Umweltwirkungen bezogen auf die Lebensphasen für die Auswertung verwendet. Die Lebensphasen werden dabei wie folgt gegliedert:

- Herstellung
- Einbau
- Instandhaltung (Nutzungsphase)
- EOL (End Of Life)

Es wird darauf hingewiesen, dass Transportwege, Maschinenstunden, Energieverbrauch und dergleichen entsprechend dem Ort ihres Entstehens den jeweiligen Lebensphasen zugeordnet und modelliert wurden. Für detailliertere Informationen wird auf das Kapitel 5 verwiesen.

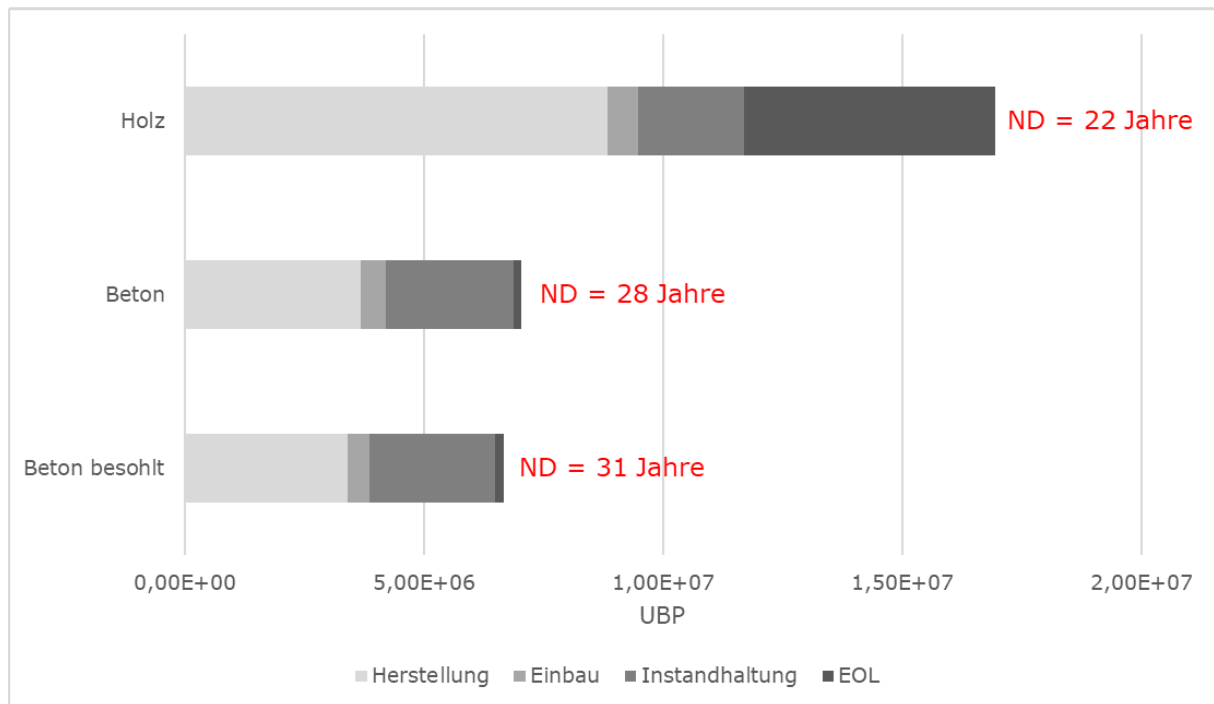


Abbildung 29: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 29 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Auf dem ersten Blick wird klar, dass der Herstellungsprozess den größten Anteil der jährlichen LCI's besitzt.

Bei den Weichen mit Betonoberbau beansprucht die Nutzungsphase bzw. die Instandhaltung den zweitgrößten Anteil für sich. Grund dafür ist der keinesfalls zu vernachlässigte Energie- und Ressourcenverbrauch, hervorgerufen durch den verschleißbedingten Austausch hochbelasteter Komponenten.

Trotz des hohen Instandhaltungsaufwandes bei dieser Belastungsklasse, überwiegt der negative Einfluss der Altholzschwellenverbrennung und sorgt dafür, dass die Abfallbehandlung der Holzschwellenweiche für die zweitgrößten Umweltwirkungen verantwortlich ist. Die Nutzungsphase liegt hier deshalb auf dritter Stelle.

Durch die hohe Recyclingrate der Metallkomponenten von 95 %, und der methodenabhängig geringen Bewertung der Betonschwellendeponierung, fallen die Umweltwirkungen am Ende der Nutzungsdauer von Betonschwellenweichen deutlich am geringsten aus.

Der kleinste Anteil an den jährlichen Umwelteinflüssen von Holzschwellenweichen wird während des Einbaus der Weichen erzeugt.

Auswertung

Nachdem nun die Lebensphasen mit den höchsten Umweltwirkungen identifiziert wurden, gilt es nun den Oberbautyp mit den geringsten Umwelteinflüssen zu bestimmen.

Reiht man die Weichen entsprechend der Oberbauvarianten mit den geringsten Umwelteinflüssen und verwendet dabei die jährlichen Umweltwirkungen, die man durch die Berücksichtigung der Nutzungsdauern erhält, gibt das folgendes Ergebnis:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Absolut betrachtet entstehen bei der Betonschwellenweiche weniger Umweltwirkungen aufgrund des Wegfalls der Betonschwellenbesohlung. Jedoch sind die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche durch die längere Nutzungsdauer geringer.

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

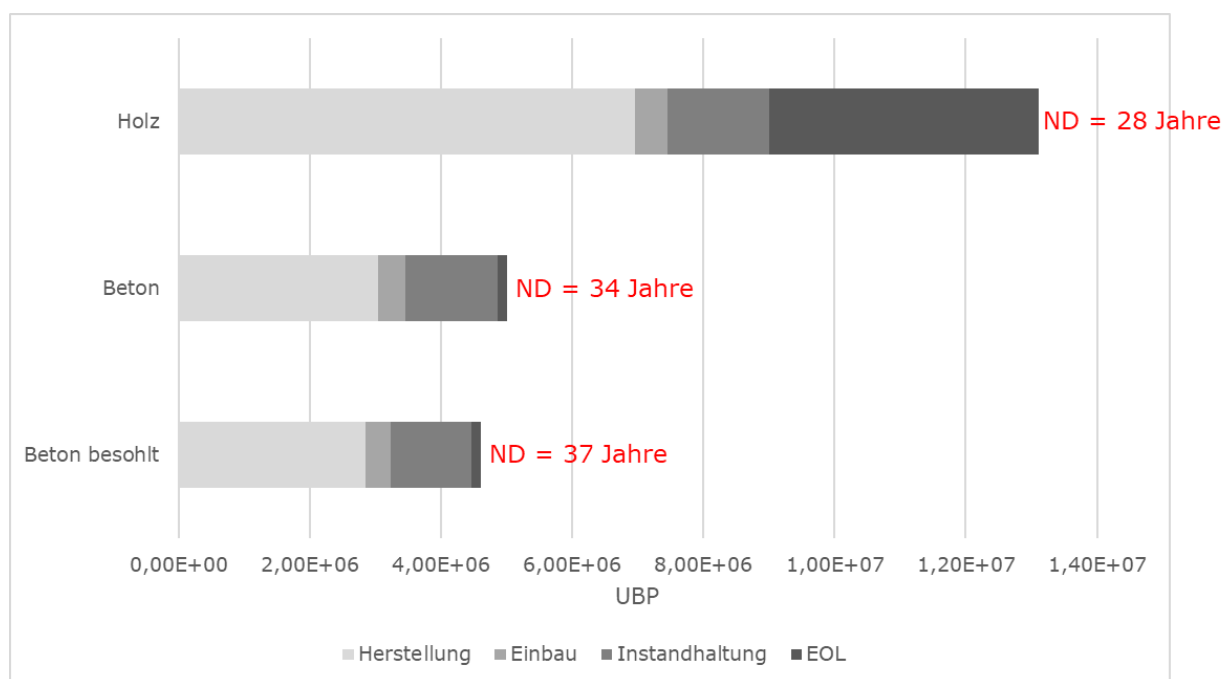


Abbildung 30: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 30 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 55.000 GesBT/Tag.

Auswertung

Bei der Bestimmung der kritischen Lebensphasen sowie der umweltfreundlichsten Oberbautypen liefert das Modell dieselben Ergebnisse wie bei einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Die Herstellung erzeugt bei allen Oberbautypen erneut die größten Umweltwirkungen. Bei der Holzschwellenweiche bildet die Entsorgung, bei den Betonschwellenweichen die Nutzungsphase den zweitgrößten Anteil ab. Methodenbedingt hat die Entsorgung der Betonschwellenweichen wieder den kleinsten Einfluss auf die Umwelt. Während wiederum bei Holzschwellenweichen der Einbau für die geringsten Umwelteinflüsse sorgt.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt wie bei der zuvor analysierten Belastung von 90.000 GesBT/Tag:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

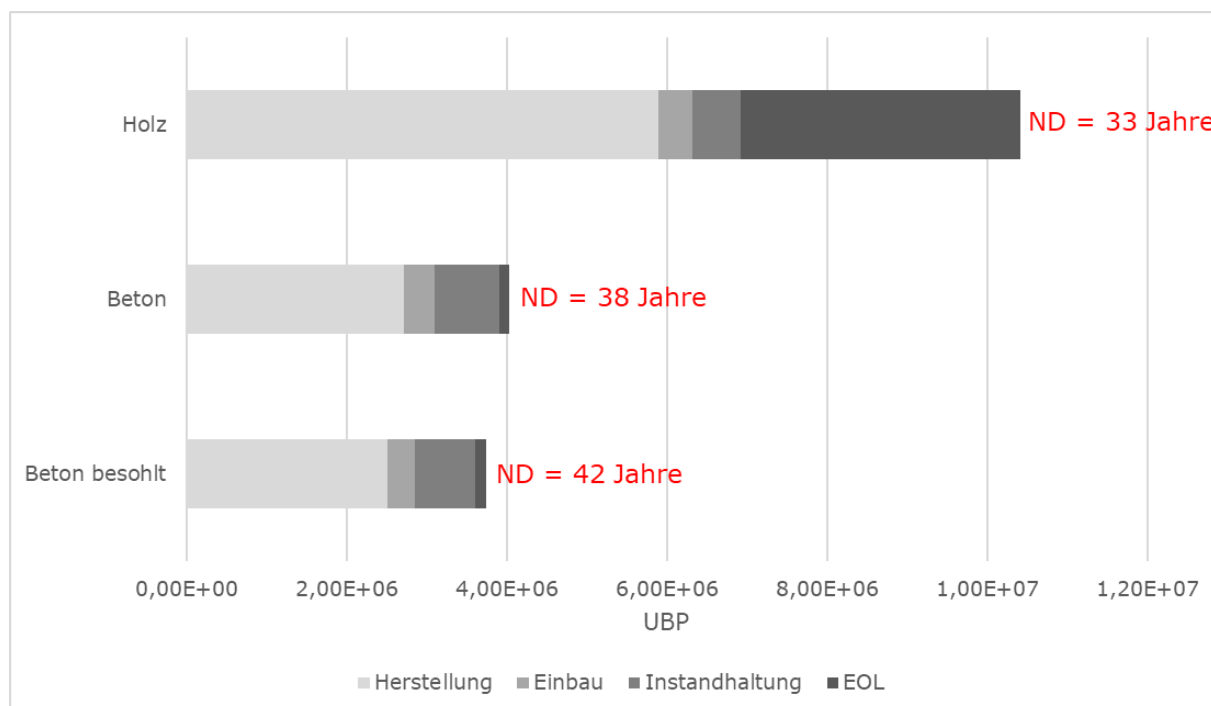


Abbildung 31: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 31 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 33.000 GesBT/Tag.

Bei der Bestimmung der kritischen Lebensphasen sowie der umweltfreundlichsten Oberbautypen liefert das Modell dieselben Ergebnisse wie bei den beiden Gleisbelastungen zuvor.

Die Herstellung erzeugt bei allen Oberbautypen erneut die größten Umweltwirkungen. Die Holzschwellenweiche weist die Entsorgung, bei den Betonschwellenweichen die Nutzungsphase den zweitgrößten Anteil auf. Methodenbedingt hat die Entsorgung der Betonschwellenweichen wieder den kleinsten Einfluss auf die Umwelt. Während wiederum bei Holzschwellenweichen der Einbau für die geringsten Umwelteinflüsse sorgt.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt wie bei den zuvor analysierten Belastungsklassen:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

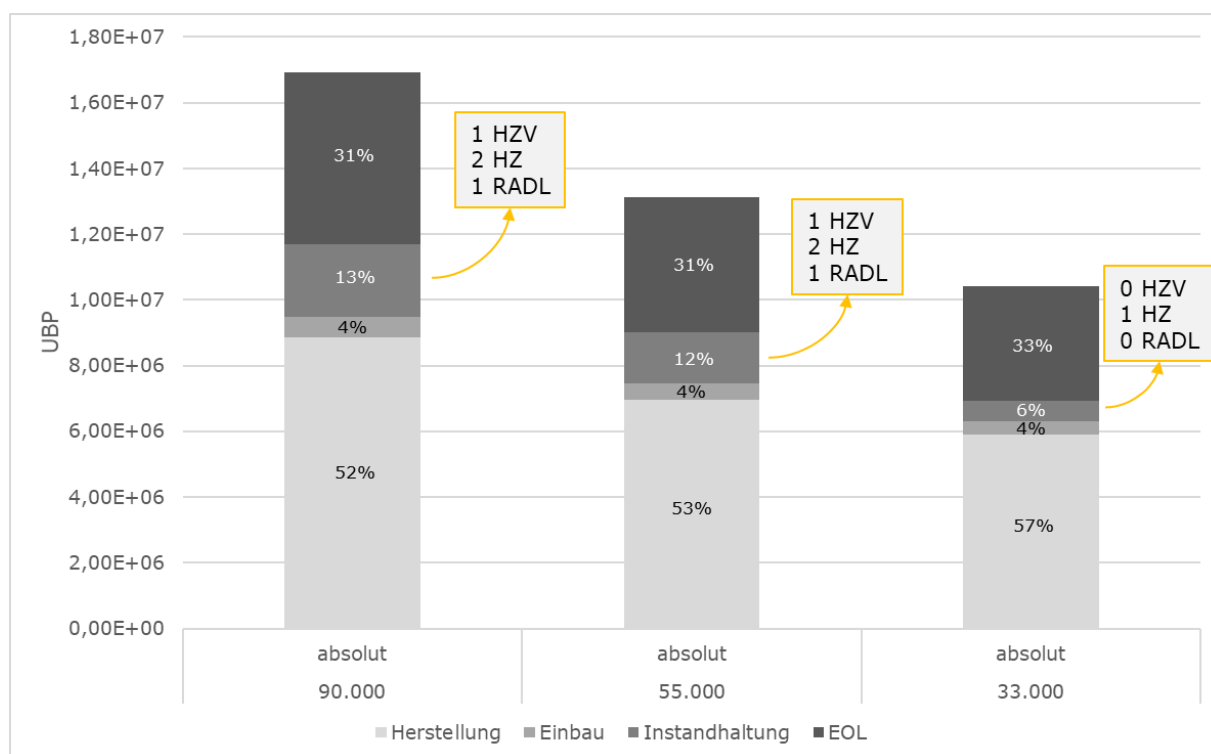


Abbildung 32: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 32 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Holzschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Die Ergebnisse verhalten sich gleich wie in Kapitel 7.1.2. Sinkende Gleisbelastungen erhöhen die Nutzungsdauer der Weiche und senken somit die negativen jährlichen Umwelteinflüsse.

Jedoch ist auch hier auf eine korrekte Interpretation zu achten (vgl. Kapitel 7.1.2). Um die jährlichen Umweltwirkungen nachhaltig zu senken, muss die Qualität der Weichenkomponenten verbessert und dadurch die Nutzungsdauer erhöht werden.

Dieses wichtige Prinzip der Nutzungsdauerverlängerung durch verbesserte Komponentenqualität kann auch während der Nutzungsphase sinnvoll angewendet werden. *Abbildung 32* zeigt, dass der Instandhaltungsbedarf und somit die Umweltbelastung einer Weiche steigt, je höher diese belastet wird. Im Falle einer mit 90.000 GesBT/Tag belasteten Holzschwellenweiche, muss im Laufe der gesamten Nutzungsdauer das Herzstück aus verschleißtechnischen Gründen zwei Mal gewechselt werden. Der damit verbundene Ressourcen- und Energieverbrauch kann reduziert werden, indem durch eine höhere Komponentenqualität der Instandhaltungsbedarf verringert wird. Darüber hinaus spielt eine adäquate Zustandsbeschreibung und Prognose der Weiche für einen optimierten Instandhaltungsplan eine wichtige Rolle.

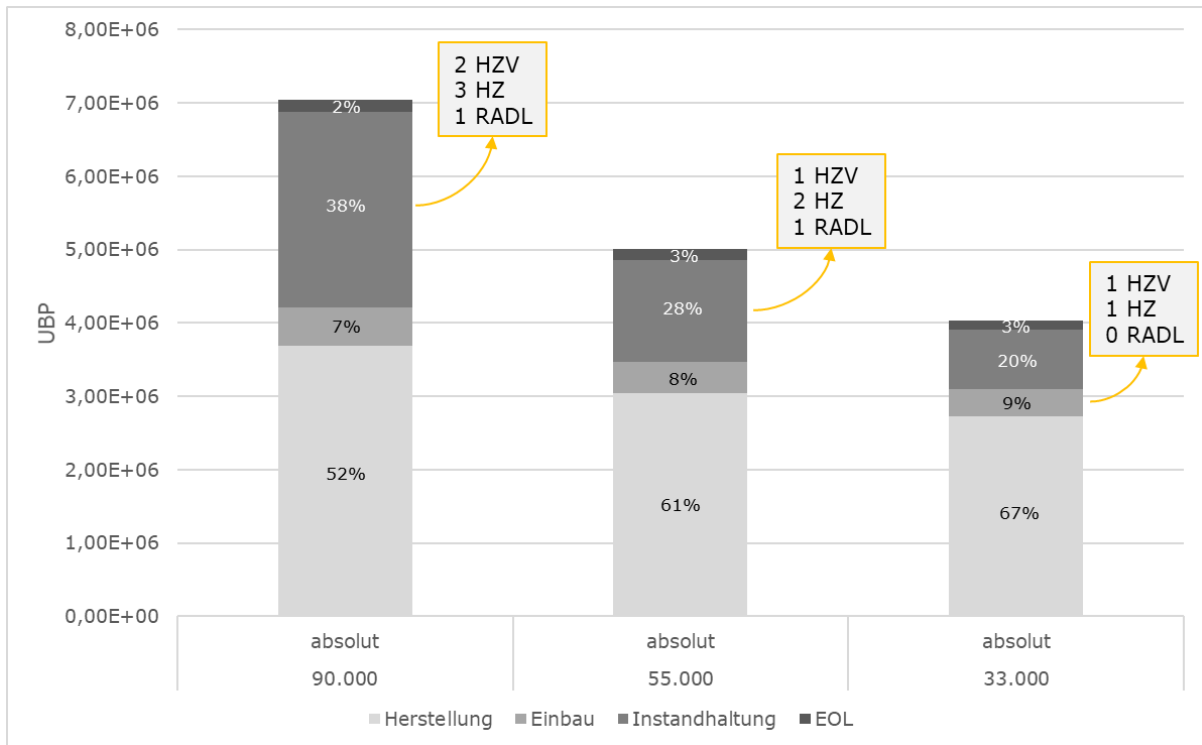


Abbildung 33: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 33 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken erkennt man einen deutlich erhöhten Instandhaltungsbedarf der Betonschwellenweiche gegenüber der Holzschwellenweiche. Dabei darf jedoch keinesfalls außer Acht gelassen werden, dass die Betonschwellenweiche eine um sechs Jahre höhere Nutzungsdauer aufweist. Nichtsdestotrotz gibt es hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

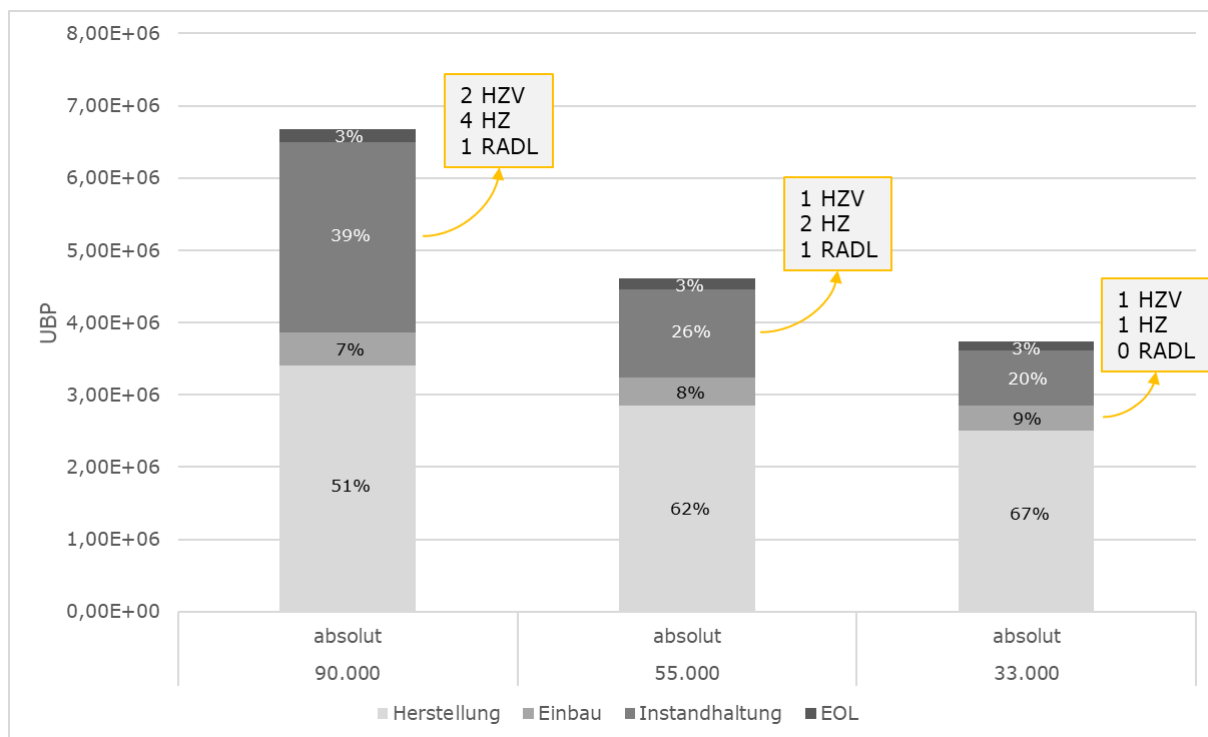


Abbildung 34: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity LCI/Jahr der besohlte Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 34 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken weist die besohlte Betonschwellenweiche den größten Instandhaltungsbedarf gegenüber allen anderen Oberbautypen auf. Jedoch ist die Nutzungsdauer mit 31 Jahren deutlich am höchsten, wodurch sich gesamtheitlich betrachtet die geringsten jährlichen Umweltwirkungen ergeben. Nichtsdestotrotz gibt es auch hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

7.3 Ökologischer Fußabdruck

Die Auswertung erfolgt mit den charakterisierten Ergebnissen aus SimaPro. Durch die Charakterisierung werden die Werte der einzelnen Wirkungskategorien als benötigte Fläche pro Jahr (siehe Kapitel 6.1.3) ausgedrückt und können so miteinander verglichen und aggregiert werden.

Es soll darauf hingewiesen werden, dass die Sensitivitätsanalyse bei dieser Bewertungsmethode nicht mehr angewendet wird. Bereits im Kapitel 6.1.1 wurde bewiesen, dass eine Verdoppelung des Polyurethananteils für die Betonschwellenbesohlung zu keiner Änderung der Reihung für die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen führt.

7.3.1 Cradle-to-Gate

Die berechneten Ergebnisse der einzelnen Oberbautypen werden in *Abbildung 35* gegenübergestellt.

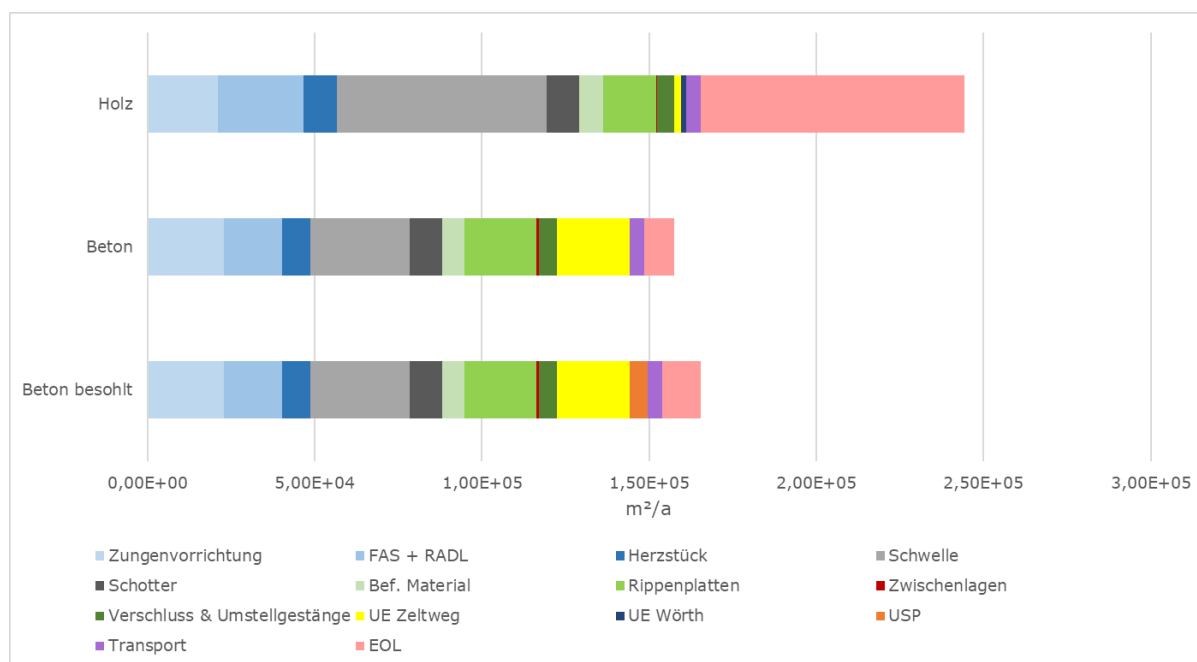


Abbildung 35: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint gesamter LCI für Herstellung und Entsorgung

Es ist deutlich erkennbar, dass die Schwellen und die Abfallbehandlung der Holzschwellenweiche für die mit Abstand größten Umweltwirkungen verantwortlich sind. Bezieht man die Einzelergebnisse der Wirkungskategorien in die Auswertung mit ein und berücksichtigt gleichzeitig den Schwerpunkt auf den Flächenverbrauch dieser Bewertungsmethode, ist dieses Ergebnis plausibel erklärbar.

Die Wirkungskategorie Flächenverbrauch ist der maßgebende Treiber von negativen Umwelteinflüssen der Holzschwelle. Für dessen Herstellung werden große Mengen an geeignetem Holz benötigt, welches wiederum nur durch sehr große Waldflächen abgedeckt werden kann. Holzschwellen sind bei der Herstellung die größten Umweltsünder der Ökobilanz innerhalb dieser Bewertungsmethode.

Die Holzschwelle wirkt sich jedoch auch auf das Lebensende (EOL) der Weiche am negativsten aus. Wieder ist der Flächenverbrauch die kritischste Wirkungskategorie. Diesmal begründet durch die enorme Waldfläche, die benötigt wird, um das CO₂ zu binden, welches durch die Verbrennung der mit Bitumen imprägnierten Altholzschwellen entsteht.

Beim Betonoberbau sind nach wie vor alle zusammengefasst betrachteten Metallerzeugnisse die größten Treiber. Doch die Betonschwellen besitzen einen auffallend großen Anteil an den gesamten negativen Umwelteinflüssen. Dieses Ergebnis ist wieder der großen Gewichtung der Flächennutzung innerhalb dieser Bewertungsmethode zuzuschreiben. Während der Betonproduktion werden große Mengen an CO₂ freigesetzt, die nur durch ein entsprechend großes Landstück wieder gebunden werden können.

Bezüglich der Altstoffbehandlung entstehen bei Weichen mit Betonoberbau keine großen Umweltwirkungen, da die Metallkomponenten zu 95 % recycelt werden und durch die Deposition von Schotter und der Schwelle innerhalb dieser Bewertungsmethode keine kritischen Belastungen entstehen.

Die Anteile der Weichenwerke Zeltweg und Wörth an den Umweltwirkungen werden durch die beiden Kategorien UE Zeltweg und UE Wörth abgebildet. Der im Vergleich sehr kleine Anteil vom Weichenwerk Wörth lässt sich damit erklären, dass gewisse Produktionsprozesse, wie die Bearbeitung der Zungenvorrichtung und des Herzstückes in Wörth nicht durchgeführt werden. Darüber hinaus gibt es in Wörth ein besseres Standortklima, weniger Bürokomplexe und die Gebäude wurden thermisch saniert. Der relativ große Anteil des Weichenwerkstandortes Zeltweg kommt von der benötigten Landfläche, die gebraucht wird, um das entstandene CO₂ während des Weichenzusammenbaus der Betonschwellenweiche zu binden.

Es ist anzumerken, dass der Transport, der im Zuge des Herstellungsprozesses entsteht, kaum Einfluss auf die Umwelt hat.

Betrachtet man zu guter Letzt die Betonschwellenbesohlung, fällt auf, dass die Umweltwirkungen, gemessen am Verhältnis zwischen dem Gesamtgewicht der Weiche und dem Gewicht der kompletten Schwellenbesohlung, sehr hoch ausfallen.

Bisher konnte die Frage beantwortet werden, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind. Innerhalb dieser Bewertungsmethode muss man zwischen Holz- und Betonschwellenweiche unterscheiden. Für die Holzschwellenweiche sind folgenden Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser:

- Holzschwelle
- Alle Metallkomponenten zusammengefasst

Für Betonschwellenweichen gilt folgendes Ergebnis:

- Alle Metallkomponenten zusammengefasst
- Betonschwelle
- Weichenwerk Zeltweg (UE Zeltweg)

Man erkennt, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Bewertungsmethoden doch deutlich voneinander abweichen.

Für die Beantwortung der Fragen, welche Lebensphasen einer Weiche die größten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten Umweltwirkungen verantwortlich ist, müssen die jährlichen Umweltwirkungen des kompletten Lebensweges einer Weiche herangezogen werden.

Würde man versuchen auf Basis von absoluten Werten eine Reihung der Oberbautypen bezüglich der geringsten Umweltwirkungen durchzuführen, würde man dadurch folgendes Ergebnis erhalten:

- Betonschwellenweiche
- Besohlte Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Doch diese Reihung erfolgt ohne Berücksichtigung der Nutzungsdauer, wodurch Fehlinterpretationen entstehen können. Die Ökobilanz ist ein relativer Ansatz. Nur unter der Berücksichtigung der Nutzungsdauer können Reihungen und Vergleiche sinnvoll durchgeführt werden.

Im nächsten Abschnitt werden nun die Ergebnisse der Ökobilanz auf der Basis von jährlichen Umweltwirkungen mit Hilfe verschiedener Darstellungsformen ausgewertet.

7.3.2 Lifecycle Impact Assessment (LCIA)

Nachdem im vorherigem Abschnitt dieses Kapitels die Frage geklärt wurde, welche Komponenten die maßgebenden Emissionsauslöser sind, beschäftigt sich dieser Abschnitt damit, welche Lebensphasen einer Weiche die meisten Umweltwirkungen verursachen und welcher Oberbautyp für die geringsten negativen Umwelteinflüsse sorgt. Hierfür werden 2 Darstellungsformen der Ökobilanzergebnisse verwendet. Einerseits die Gegenüberstellung aller Oberbautypen bezogen auf eine einzige Belastungsklasse und entsprechender Angabe der Nutzungsdauer. Und Andererseits die Gegenüberstellung aller Belastungsklassen bezogen auf einen einzigen Oberbautyp. In beiden Varianten werden die jährlichen Umweltwirkungen bezogen auf die Lebensphasen für die Auswertung verwendet. Die Lebensphasen werden dabei wie folgt gegliedert:

- Herstellung
- Einbau
- Instandhaltung (Nutzungsphase)
- EOL (End Of Life)

Es wird darauf hingewiesen, dass Transportwege, Maschinenstunden, Energieverbrauch und dergleichen entsprechend dem Ort ihres Entstehens den jeweiligen Lebensphasen zugeordnet und modelliert wurden. Für detailliertere Informationen wird auf das Kapitel 5 verwiesen.

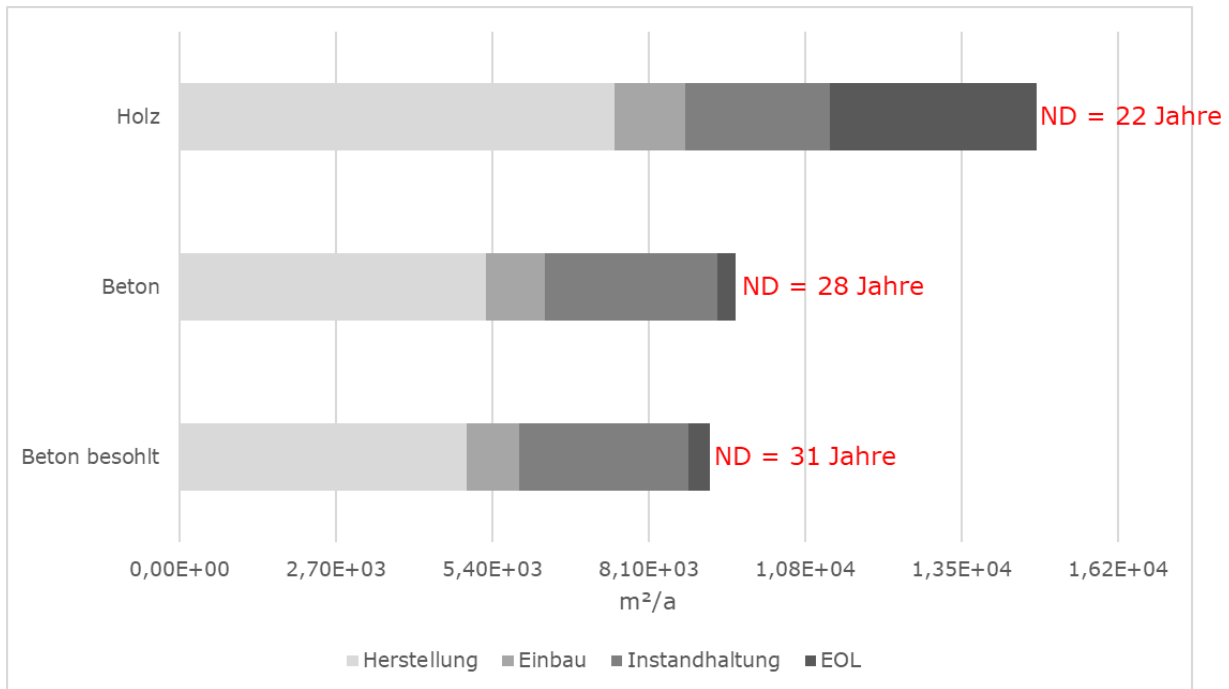


Abbildung 36: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint
LCI/Jahr für 90.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 36 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Auf dem ersten Blick wird klar, dass der Herstellungsprozess den größten Anteil der jährlichen LCI's besitzt.

Bei den Weichen mit Betonoberbau beansprucht die Nutzungsphase bzw. die Instandhaltung den zweitgrößten Anteil für sich. Grund dafür ist der keinesfalls zu vernachlässigte Energie- und Ressourcenverbrauch, hervorgerufen durch den verschleißbedingten Austausch hochbelastender Komponenten.

Trotz des hohen Instandhaltungsaufwandes innerhalb dieser Belastungskategorie, überwiegt der negative Einfluss der Altholzschwellenverbrennung und sorgt dafür, dass die Abfallbehandlung der Holzschwellenweiche für die zweitgrößten Umweltwirkungen verantwortlich ist. Die Nutzungsphase liegt hier deshalb auf dritter Stelle.

Durch die hohe Recyclingrate der Metallkomponenten von 95 %, und der methodenabhängig geringen Bewertung der Betonschwellendeponierung, fallen die Umweltwirkungen am Ende der Nutzungsdauer von Betonschwellenweichen deutlich am geringsten aus.

Der kleinste Anteil an den jährlichen Umwelteinflüssen von Holzschwellenweichen wird während des Einbaus der Weichen erzeugt.

Auswertung

Nachdem nun die Lebensphasen mit den höchsten Umweltwirkungen identifiziert wurden, gilt es nun den Oberbautyp mit den geringsten Umwelteinflüssen zu bestimmen.

Reiht man die Weichen entsprechend der Oberbauvarianten mit den geringsten Umwelteinflüssen und verwendet dabei die jährlichen Umweltwirkungen, die man durch die Berücksichtigung der Nutzungsdauern erhält, gibt das folgendes Ergebnis:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Absolut betrachtet entstehen bei der Betonschwellenweiche weniger Umweltwirkungen aufgrund des Wegfalls der Betonschwellenbesohlung. Jedoch sind die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche durch die längere Nutzungsdauer geringer.

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

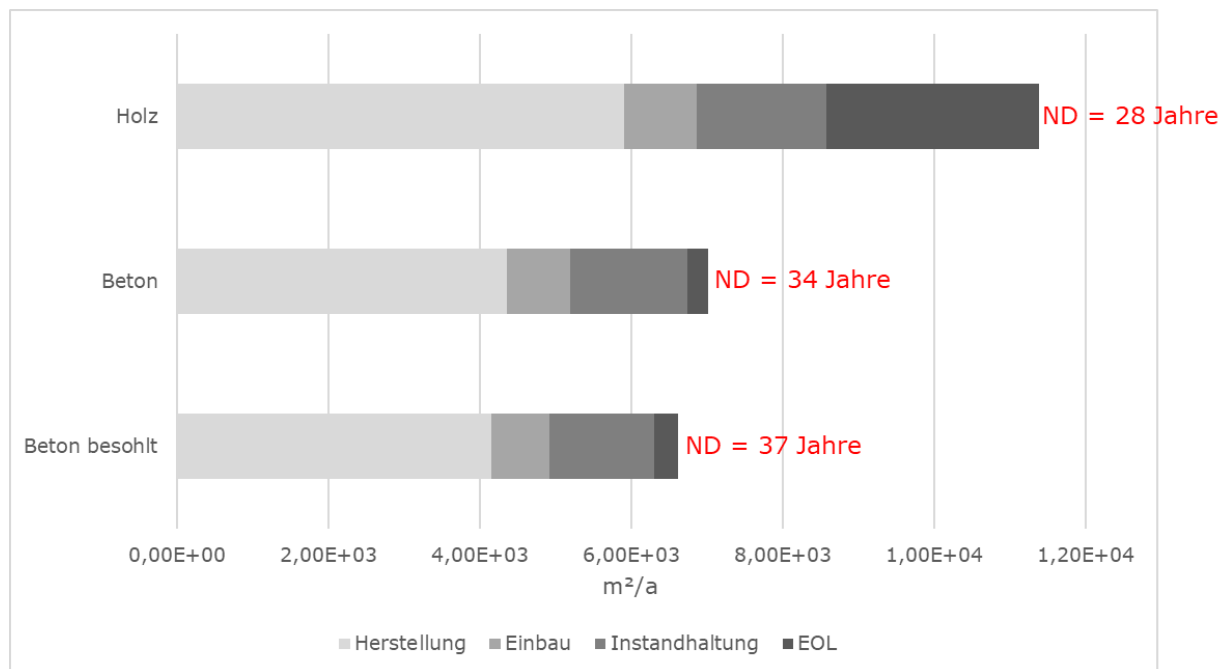


Abbildung 37: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint
LCI/Jahr für 55.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 37 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 55.000 GesBT/Tag.

Auswertung

Bei der Bestimmung der kritischen Lebensphasen sowie der umweltfreundlichsten Oberbautypen liefert das Modell dieselben Ergebnisse wie bei einer Gleisbelastung von 90.000 GesBT/Tag.

Die Herstellung erzeugt bei allen Oberbautypen erneut die größten Umweltwirkungen. Bei der Holzschwellenweiche bildet die Entsorgung, bei den Betonschwellenweichen die Nutzungsphase den zweitgrößten Anteil ab. Methodenbedingt hat die Entsorgung der Betonschwellenweichen wieder den kleinsten Einfluss auf die Umwelt. Während wiederum bei Holzschwellenweichen der Einbau für die geringsten Umwelteinflüsse sorgt.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt wie bei der zuvor analysierten Belastung von 90.000 GesBT/Tag:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

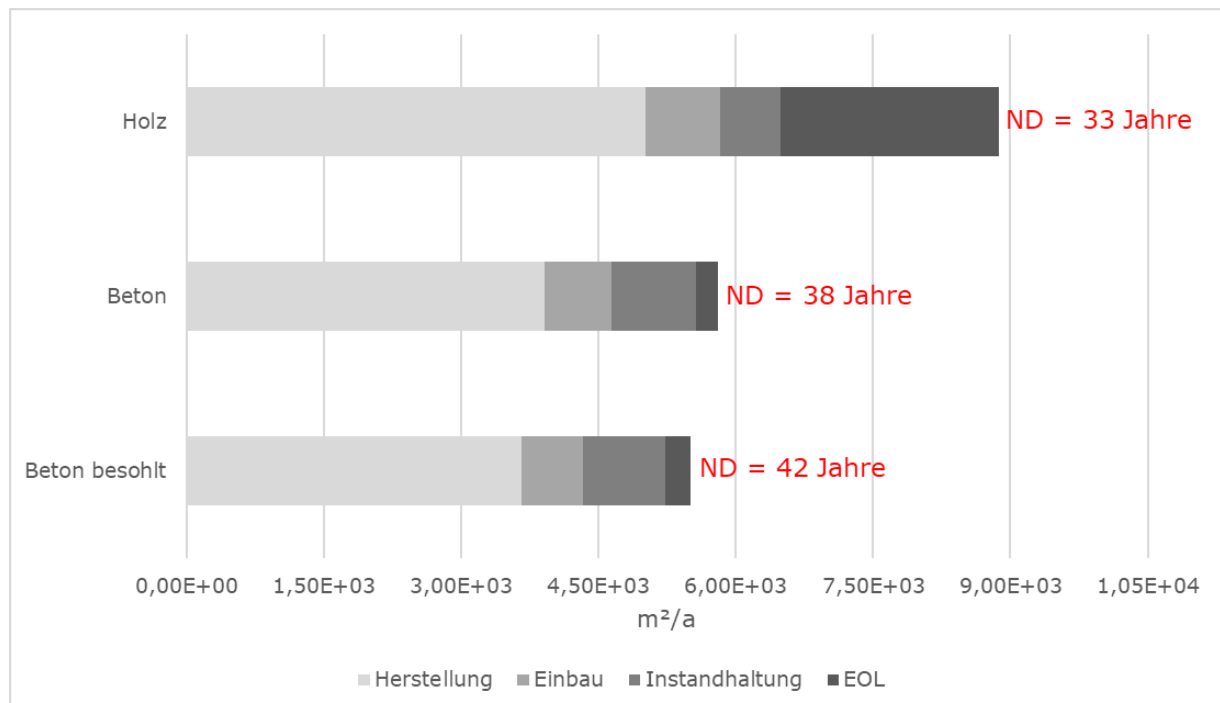


Abbildung 38: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr für 33.000 GesBT/Tag, Gleis

Abbildung 38 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen aller Oberbautypen mit einer Gleisbelastung von 33.000 GesBT/Tag.

Bei der Bestimmung der kritischen Lebensphasen liefert das Modell im Vergleich zu den beiden anderen Gleisbelastungen nur geringe Unterschiede bei den Ergebnissen.

Die Herstellung erzeugt bei allen Oberbautypen erneut die größten Umweltwirkungen. Bei der Holzschwellenweiche bildet die Entsorgung, bei den Betonschwellenweichen die Nutzungsphase den zweitgrößten Anteil ab. Methodenbedingt hat die Entsorgung der Betonschwellenweichen wieder den kleinsten Einfluss auf die Umwelt. Während aufgrund des geringen Instandhaltungsbedarfes der Holzschwellenweiche bei dieser Belastungsklasse, die Nutzungsphase für die geringsten Umwelteinflüsse sorgt.

Die Reihung im Hinblick auf die umweltfreundlichsten Weichenoberbautypen verbleibt wie bei den zuvor analysierten Belastungsklassen:

- Besohlte Betonschwellenweiche
- Betonschwellenweiche
- Holzschwellenweiche

Der Vorteil einer längeren Nutzungsdauer überwiegt auch hier die Umwelteinflüsse von zusätzlich verbauten Materialien, welche die Qualität einer Weiche verbessern.

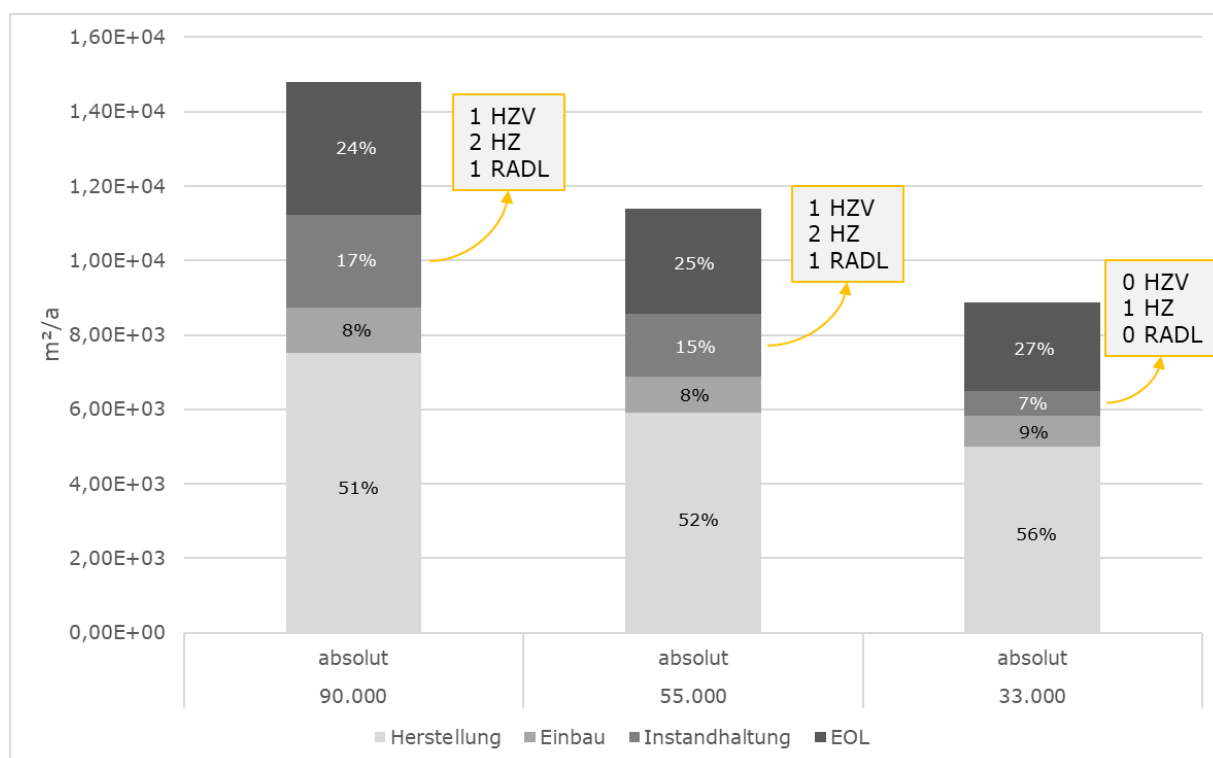


Abbildung 39: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der Holzschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 39 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Holzschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Die Ergebnisse verhalten sich gleich wie in Kapitel 7.1.2. Sinkende Gleisbelastungen erhöhen die Nutzungsdauer der Weiche und senken somit die negativen jährlichen Umwelteinflüsse.

Jedoch ist auch hier auf eine korrekte Interpretation zu achten (vgl. Kapitel 7.1.2). Um die jährlichen Umweltwirkungen nachhaltig zu senken, muss die Qualität der Weichenkomponenten verbessert und dadurch die Nutzungsdauer erhöht werden.

Dieses wichtige Prinzip der Nutzungsdauerverlängerung durch verbesserte Komponentenqualität kann auch während der Nutzungsphase sinnvoll angewendet werden. *Abbildung 39* zeigt, dass der Instandhaltungsbedarf und somit die Umweltbelastung einer Weiche steigt, je höher diese belastet wird. Im Falle einer mit 90.000 GesBT/Tag belasteten Holzschwellenweiche, muss im Laufe der gesamten Nutzungsdauer das Herzstück aus verschleißtechnischen Gründen zwei Mal gewechselt werden. Der damit verbundene Ressourcen- und Energieverbrauch kann reduziert werden, indem durch eine höhere Komponentenqualität der Instandhaltungsbedarf verringert wird. Darüber hinaus spielt eine adäquate Zustandsbeschreibung und Prognose der Weiche für einen optimierten Instandhaltungsplan eine wichtige Rolle.

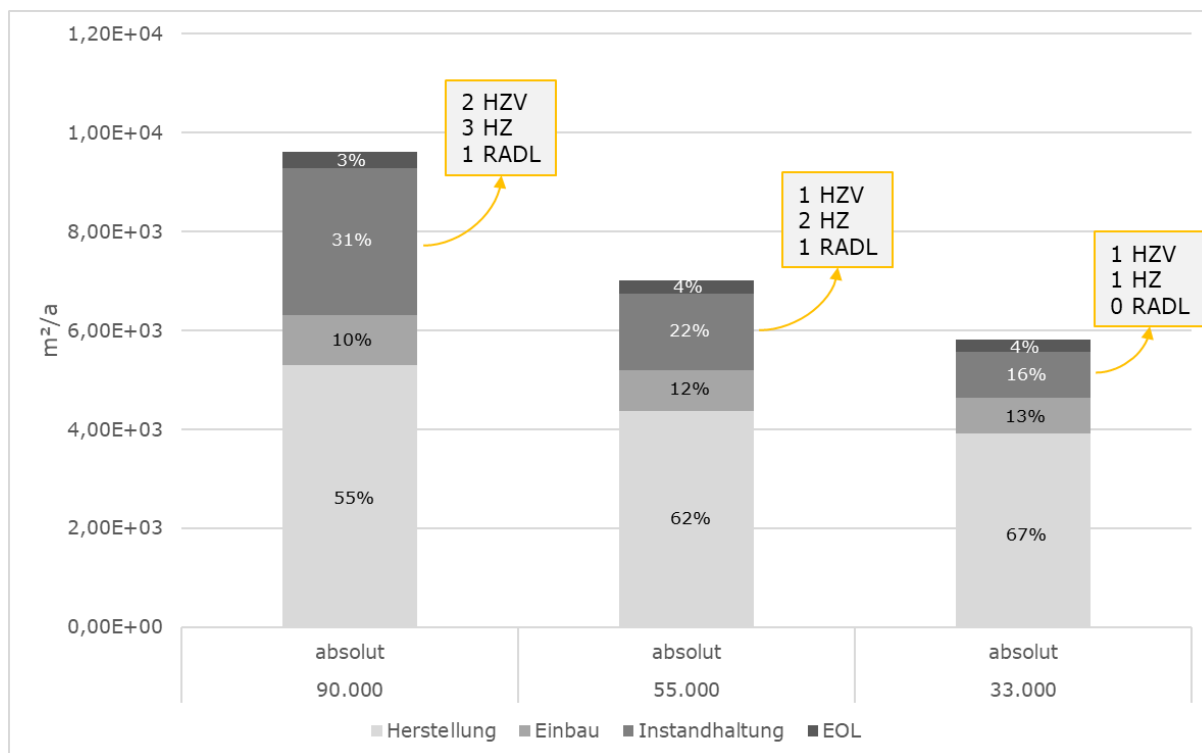


Abbildung 40: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 40 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken erkennt man einen deutlich erhöhten Instandhaltungsbedarf der Betonschwellenweiche gegenüber der Holzschwellenweiche. Dabei darf jedoch keinesfalls außer Acht gelassen werden, dass die Betonschwellenweiche eine um 6 Jahre höhere Nutzungsdauer aufweist. Nichtsdestotrotz gibt es hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

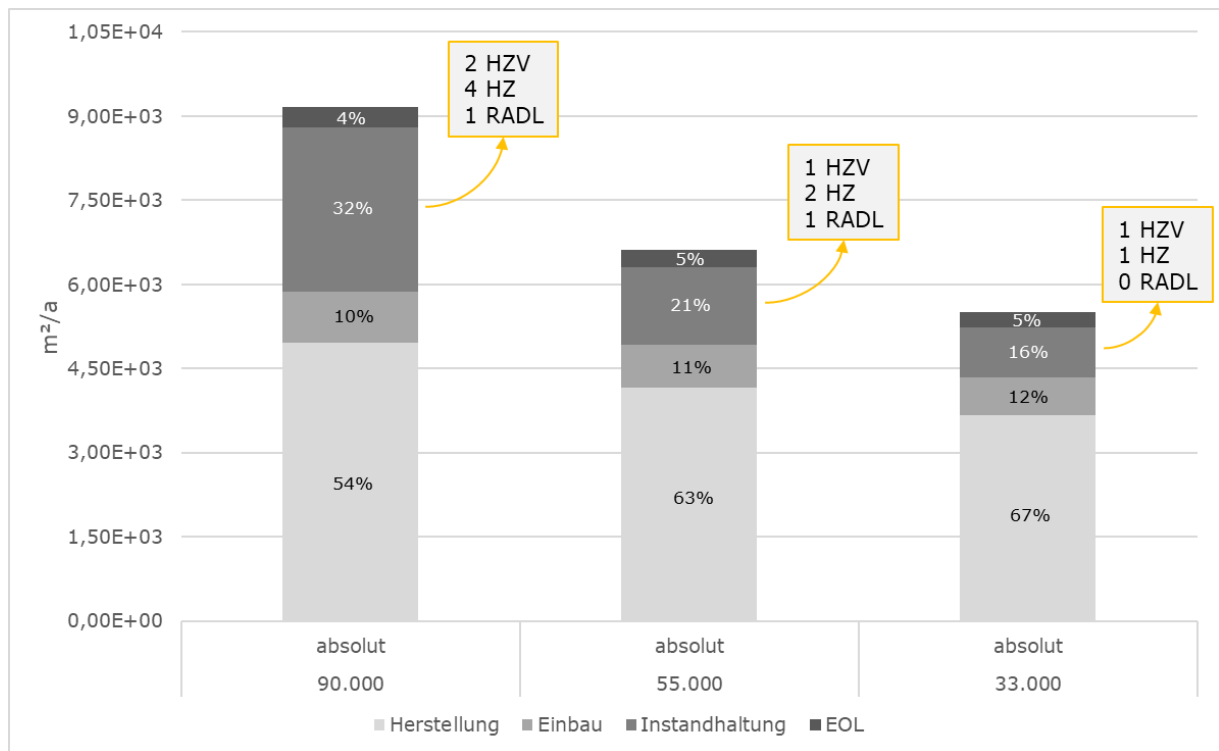


Abbildung 41: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint LCI/Jahr der besohlte Betonschwellenweiche für verschiedene Belastungsklassen

Abbildung 41 zeigt die jährlichen Umweltwirkungen der besohnten Betonschwellenweiche für alle Belastungsklassen.

Auch in dieser Darstellung erkennt man das Potential zur Reduktion der negativen Umwelteinflüsse durch Anhebung der Nutzungsdauer.

Bei hochbelasteten Strecken weißt die besohlte Betonschwellenweiche den größten Instandhaltungsbedarf gegenüber allen anderen Oberbautypen auf. Jedoch ist die Nutzungsdauer mit 31 Jahren deutlich am höchsten, wodurch sich gesamtheitlich betrachtet die geringsten jährlichen Umweltwirkungen ergeben. Nichtsdestotrotz gibt es auch hier Optimierungspotential, um den verschleißbedingten Komponententausch in Zukunft zu reduzieren.

7.4 Ergebniszusammenfassung

In den folgenden Abbildungen werden alle bereits bekannten Umweltwirkungen der Oberbautypen je Bewertungsmethode gemeinsam und unter Vernachlässigung der komponentenspezifischen sowie Lebensphasenabhängigen Unterteilungen dargestellt. Auf diese Weise können alle Ergebnisse einer Bewertungsmethode entsprechend ihres Auswertungsansatzes (CtG oder LCIA) einander gegenübergestellt und direkt verglichen werden. Es soll dabei der Einfluss des Auswertungsansatzes auf das Ranking der Weichenoberbautypen bezüglich der geringsten negativen Umweltwirkungen gezeigt werden.

Zusätzlich zu den bereits bekannten Ergebnissen werden die Umweltwirkungen der Cradle-to-Gate Analyse ohne Berücksichtigung der Abfallbehandlung (EOL) und somit der reine Herstellungsprozesses dargestellt. Es soll damit der Einfluss der Altstoffentsorgung auf die Umweltbilanz der CtG-Analyse verdeutlicht und auf eine mögliche Rangänderung im Hinblick auf die geringsten negativen Umweltwirkungen geprüft werden.

Die Darstellungen beruhen auf der Belastungsklasse von 90.000 GesBT/Tag. Da die Ergebnisse der anderen Belastungsklassen die gleichen Verhältnisse wie in dieser Auswertung aufweisen, werden sie nicht extra angeführt.

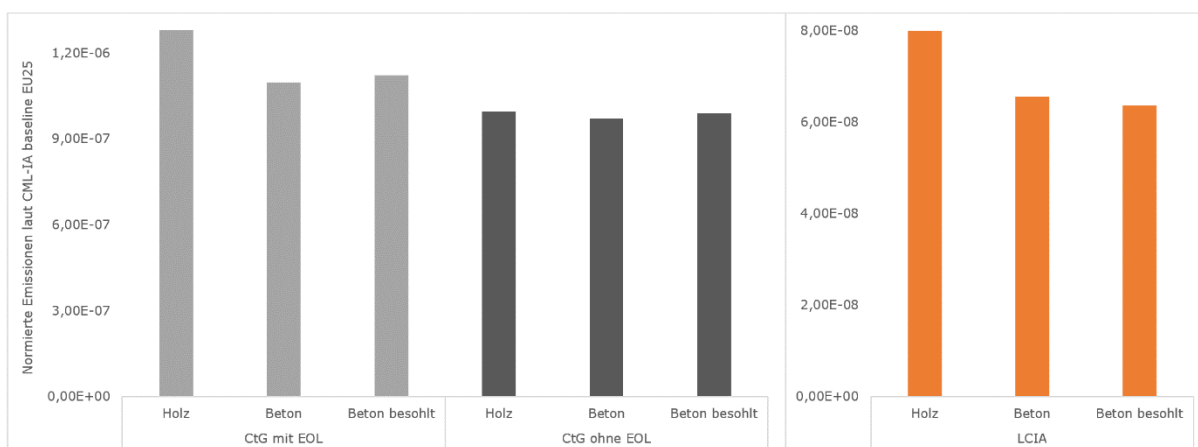


Abbildung 42: Normierte Emissionen laut CML-IA baseline EU25
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA

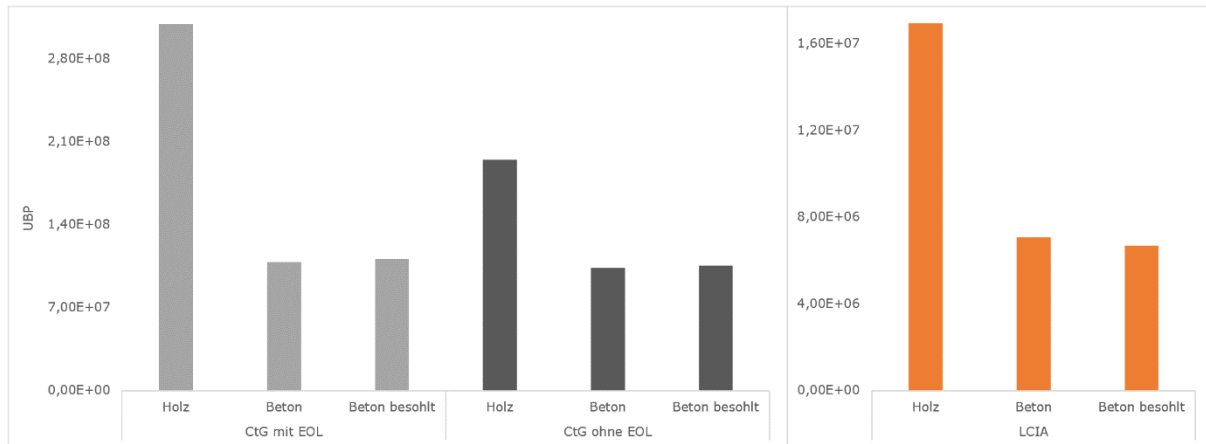
Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse aller Auswertungsansätze und Oberbautypen für die Bewertungsmethode CML-IA baseline. Betrachtet man den Herstellungsprozess ohne Berücksichtigung der Altstoffentsorgung, ergeben sich kaum Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Weichenoberbautypen hinsichtlich ihrer Umwelteinflüsse. Erst durch die zusätzliche Bewertung der Abfallbehandlung werden diese deutlich. Dadurch wird klar, dass die Entsorgung der Holzschwellenweiche kritischere Umweltwirkungen im Vergleich zur besohlenen und unbesohlenen Betonschwellenweiche verursacht. Das liegt an der Verbrennung der mit Bitumen imprägnierten Holzschwellen und dem dadurch freigesetztem CO₂.

Da die CtG-Analyse keine Nutzungsdauer berücksichtigt, erscheint die unbesohlte Betonschwellenweiche als jene mit den geringsten Umwelteinwirkungen. Die LCIA-Analyse hingegen betrachtet die kompletten Lebenszyklen unter Berücksichtigung der spezifischen Nutzungsdauern und stellt die jährlichen Umweltwirkungen der Weichen dar. Erst durch diese Betrachtungsweise ist ein Vergleich unterschiedlicher Weichensysteme überhaupt möglich.

| Ranking - CML-IA | | | |
|------------------|---------------|---------------|---------------|
| Position | CtG mit EOL | CtG ohne EOL | LCIA |
| 1 | Beton | Beton | Beton besohlt |
| 2 | Beton besohlt | Beton besohlt | Beton |
| 3 | Holz | Holz | Holz |

*Tabelle 59: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – CML-IA
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA*

Auf Basis von *Abbildung 42* werden in *Tabelle 59* die Rangfolgen der Oberbautypen mit den geringsten negativen Umweltwirkungen, bezogen auf die zuvor beschriebenen Auswertungsansätze, dargestellt. Dieses Ranking bezieht sich dabei auf die Bewertungsmethode CML-IA. Die Holzscharrenweiche verursacht bei jeder Betrachtungsweise die größten Umwelteinflüsse. Wird die Nutzungsdauer vernachlässigt, schneidet die besohlte Betonscharrenweiche aufgrund des zusätzlichen Materialaufwandes für die Scharrenbesohlung ökologisch schlechter ab als die unbesohlte Betonscharrenweiche. Behält man jedoch die Tatsache im Auge, dass durch den Einsatz der Scharrenbesohlung eine längere Nutzungsdauer der Weiche erzielt wird, ergeben sich für die besohlte Betonscharrenweiche die kleinsten jährlichen Umweltbelastungen.



*Abbildung 43: Charakterisierte Emissionen laut Ecological Scarcity
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA*

Abbildung 43 zeigt die Ergebnisse aller Auswertungsansätze und Oberbautypen für die Bewertungsmethode Ecological Scarcity. Es ist erkennbar, dass die Holzschwellenweiche innerhalb dieser Bewertungsmethode ökologisch deutlich am schlechtesten bewertet wird. Dies gilt sowohl für den Herstellungsprozess als auch für die Abfallentsorgung. Bei der Betrachtung der CtG-Analyse kann für die Weichen mit Betonschwellenoberbau hingegen kaum ein Einfluss der Altstoffentsorgung nachgewiesen werden. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Nutzungsdauer gegenüber den anderen Oberbautypen, liefert die Holzschwellenweiche auch innerhalb der LCIA-Analyse die ökologisch schlechtesten Ergebnisse. Diese Bewertungscharakteristik lässt sich durch den starken Fokus auf Ressourcen- und Flächenverbrauch innerhalb der Ecological Scarcity Methode erklären.

Für die Herstellung von Holzschwellen werden große Mengen an geeignetem Holz benötigt. Dieser Sachverhalt führt zu stark negativen Bewertungen in den Wirkungskategorien Ressourcenverbrauch, Flächenverbrauch und Potential der globalen Erwärmung. Die enorme Menge an benötigten Schwellenholz verursacht einen starken Ressourcenverbrauch. Die Aufforstung der dafür benötigten Wälder bewirkt einen hohen Flächenverbrauch und die Rodung großer Waldflächen verhindert die Bindung von Kohlendioxid, wodurch das Potential der globalen Erwärmung steigt.

Bei der Entsorgung bzw. Verbrennung der imprägnierten Holzschwellen werden große Mengen an Kohlendioxid freigesetzt. Dies führt einerseits zur Erhöhung des Erderwärmungspotentials und andererseits zu einem hohen Waldflächenbedarf, um diese CO₂ Emissionen zu binden.

| Ranking - Ecological Scarcity | | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Position | CtG mit EOL | CtG ohne EOL | LCIA |
| 1 | Beton | Beton | Beton besohlt |
| 2 | Beton besohlt | Beton besohlt | Beton |
| 3 | Holz | Holz | Holz |

Tabelle 60: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – Ecological Scarcity
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA

Auf Basis von *Abbildung 43* werden in *Tabelle 60* die Rangfolgen der Oberbautypen mit den geringsten negativen Umweltwirkungen, bezogen auf die zuvor beschriebenen Auswertungsansätze, dargestellt. Dieses Ranking bezieht sich dabei auf die Bewertungsmethode Ecological Scarcity. Trotz der stark unterschiedlichen Bewertungscharakteristik im Vergleich zur CML-IA Methode, ergeben sich exakt dieselben Rangfolgen.

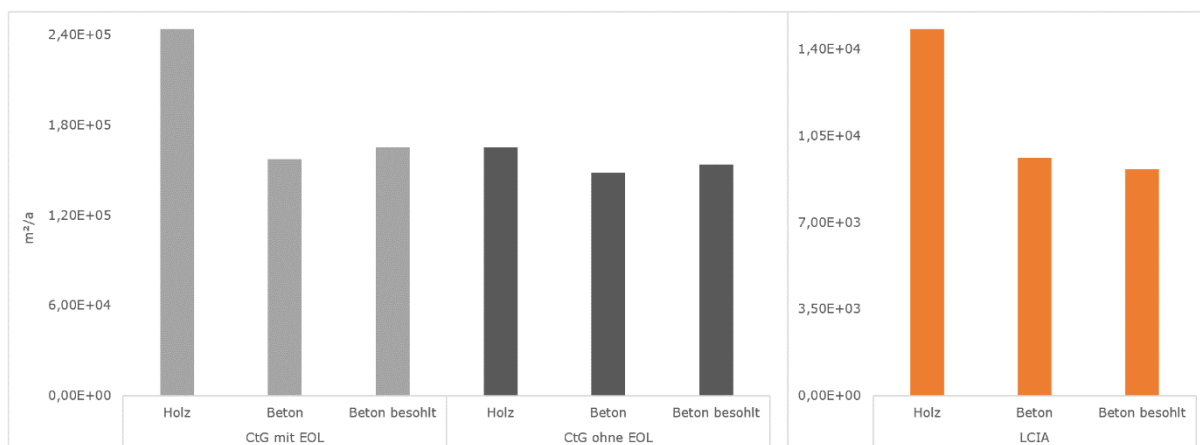


Abbildung 44: Charakterisierte Emissionen laut Ecological footprint
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA

Abbildung 44 zeigt die Ergebnisse aller Auswertungsansätze und Oberbautypen für die Bewertungsmethode Ecological footprint. Die Umweltwirkungen weisen gewisse Ähnlichkeiten zu den beiden anderen Methode auf. Ohne Berücksichtigung der Abfallbehandlung innerhalb der CtG-Analyse gibt es wie bei der CML-IA Methode kaum Unterschiede zwischen den Weichenoberbautypen. Mit der Bewertung der Altstoffentsorgung hebt sich die Holzschwelenweiche jedoch deutlich von den anderen ab, wie es auch bei der Ecological Scarcity Methode der Fall ist. Da der Ecological footprint starken Fokus auf den Flächenverbrauch legt, können die Ergebnisse dieser Berechnung wie bei der Bewertungsmethode Ecological Scarcity erklärt werden.

| Ranking - Ecological footprint | | | |
|--------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Position | CtG mit EOL | CtG ohne EOL | LCIA |
| 1 | Beton | Beton | Beton besohlt |
| 2 | Beton besohlt | Beton besohlt | Beton |
| 3 | Holz | Holz | Holz |

*Tabelle 61: Oberbautyp-Ranking nach geringsten Umweltwirkungen – Ecological footprint
Gegenüberstellung Cradle-to-Gate zu LCIA*

Auf Basis von *Abbildung 44* werden in *Tabelle 61* die Rangfolgen der Oberbautypen mit den geringsten negativen Umweltwirkungen, bezogen auf die zuvor beschriebenen Auswertungsansätze, dargestellt. Dieses Ranking bezieht sich dabei auf die Bewertungsmethode Ecological footprint. Das Ranking verändert sich im Vergleich zu den beiden zuvor betrachteten Bewertungsmethoden jedoch nicht.

Alle drei Bewertungsmethoden liefern exakt dasselbe Ergebnis. Die besohlte Betonschwellenweiche verursacht aufgrund der höchsten Nutzungsdauer durch qualitativ hochwertige Weichenkomponenten die geringsten jährlichen Umweltwirkungen. Dennoch wird empfohlen, die CML-IA baseline Methode für Auswertungszwecke zu verwenden. Grund dafür ist die zu starke Fokussierung der beiden anderen Bewertungsmethoden auf einzelne Wirkungskategorien. Dadurch wird die imprägnierte Holzschwelle aus einem zum Teil erneuerbaren Rohstoff im Vergleich zu den Ressourcen- und Energieaufwendigen Stahlerzeugnissen völlig überbewertet. Nichtsdestotrotz ist bei der CML-IA baseline Methode das vollständige Fehlen einer Bewertung des Ressourcenverbrauches aus erneuerbaren Quellen zu bemängeln. Des Weiteren wird nochmals auf die kritische Betrachtung von Toxizitäten aufgrund deren fehlenden Robustheit, die innerhalb dieser Methode bewertet werden, hingewiesen (vgl. Kapitel 6.1.1).

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ökobilanz ist ein mächtiges Instrument, um die Umweltwirkungen verschiedener Produktsysteme zu bestimmen und miteinander zu vergleichen. Der Aufwand einer Ökobilanzierung steigt mit zunehmender Komplexität des Produktsystems stark an, jedoch ist es von entscheidender Bedeutung bei einer Vielzahl an Elementen und Prozessen, den Material-, Energie- und Emissionsfluss gesamtheitlich über den kompletten Lebenszyklus zu verstehen, um maßgebende Emissionsauslöser bestimmen und daraus strategische Maßnahmen für Prozess- und Materialoptimierungen setzen zu können.

Die Bestimmung des Ziels und des Untersuchungsrahmens bilden den Auftakt einer jeden Ökobilanz. Abhängig davon was untersucht werden soll ist die Wahl der funktionellen Einheit für die spätere Vergleichbarkeit von entscheidender Bedeutung. Diesbezüglich wurde für die Weiche folgende funktionelle Einheit gewählt:

- Bereitstellung einer EW 500 für 1 Jahr

Durch die Berücksichtigung einer zeitlichen Komponente innerhalb der funktionellen Einheit, können Weichen mit unterschiedlichen Nutzungsdauern, bedingt durch den Oberbautyp und die Belastungsklasse, vergleichbar gemacht werden.

Den größten Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse einer Ökobilanz hat die Bestandaufnahme der Sachbilanz. Je nach Datengrundlage kann sich diese als sehr schwierig und zeitaufwendig erweisen. Dennoch ist es wichtig bei der Datenerhebung gewissenhaft vorzugehen, um eine hohe Belastbarkeit des Modells und somit die Sinnhaftigkeit der Ökobilanz sicherzustellen. Allein die Wahl der Abfallbehandlung, ob Verbrennung oder Deponierung, hat großen Einfluss auf das Endergebnis. Darüber hinaus ist es Wichtig, dass Modell gut durchstrukturiert und adaptierbar zu gestalten. Die Modellierungssoftware SimaPro bietet hierfür eine großartige Übersicht aller Prozessmodule.

Den Sachbilanzergebnissen werden in der Wirkungsabschätzungsphase Wirkungskategorien zugeordnet. Hierfür bietet SimaPro eine große Auswahl an unterschiedlichen Bewertungsmethoden an. Je nach festgelegtem Ziel und Produktsystem, muss eine passende Wahl getroffen. Die Vergleichbarkeit der Ökobilanz ist stark von der gewählten Bewertungsmethode und den darin enthaltenen Wirkungskategorien abhängig. Im Zuge dieser Arbeit wurden folgende Bewertungsmethoden verwendet:

- CML-IA baseline
- Ökologische Knappheit
- Ökologischer Fußabdruck

Bei der Auswertung der Ergebnisse wird klar, dass die Methode der Ökologischen Knappheit und jene des Ökologischen Fußabdruckes sehr starken Fokus auf die Umweltwirkungen Ressourcenverbrauch und Flächenverbrauch legen. Dies führt bei der Bewertung der Holzschwellen zu deutlich höheren Umweltwirkungen als jene der unter hohem Aufwand produzierten Schienenstahlkomponenten. Deshalb wird trotz der nicht robusten Toxizitätsbewertungen die Verwendung der CML-IA baseline Methode empfohlen.

Die Auswertungsphase zeigt, dass

- unterschiedliche Auswertungsmethoden zu stark unterschiedlichen Komponentenbewertungen führen können,
- der Herstellungsprozess die Lebensphase mit den meisten Umweltwirkungen ist,
- die Schienenkomponenten und die Holzschwellen die maßgebenden Emissionsauslöser der verbauten Komponenten sind
- die jährlichen Umweltbelastungen mit abnehmender Streckenbelastung sinken, da die Nutzungsdauern aufgrund niedriger Belastungen steigen,
- die jährlichen Umweltbelastungen mit steigender Nutzungsdauer sinken und
- der jährliche Umwelteinfluss der Nutzungsphase auf hoch belasteten Weichen aufgrund des hohen Instandhaltungstechnischen Aufwandes sehr hoch ist.

Aufgrund der teilweisen sehr hohen Gewichtungen einzelner Wirkungskategorien innerhalb der Methoden der Ökologischen Knappheit und des Ökologischen Fußabdruckes, wird die Bewertungsmethode CML-IA für die Auswertung der Ökobilanz empfohlen. Sie beinhaltet zudem die 10 meist verwendeten Wirkungskategorien, was sich wiederum sehr positiv auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auswirkt.

Da der Herstellungsprozess für den größten Anteil an Umweltwirkungen verantwortlich ist, wird empfohlen, die Herstellungsprozesse, sofern möglich, hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen zu optimieren.

Ebenso sollen die maßgebenden Komponenten hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen optimiert werden. Das gilt besonders für die Imprägnierung von Holzschwellen.

Die beste Lösung, die jährlichen Umweltwirkungen zu reduzieren liegt darin, die Nutzungsdauer des Produktsystems Weiche zu erhöhen. Die Auswertung ergibt bei allen geprüften Varianten sinkende jährliche Umwelteinflüsse bei steigender Nutzungsdauer. Es wird deshalb empfohlen, qualitativ hochwertige Produkte mit einer langen Lebensdauer zu produzieren, um nachhaltig den Life Cycle Impact zu reduzieren. Diese Schlussfolgerung lässt

sich jedoch nur aus dem LCIA-Ansatz eindeutig ableiten. Ergebnisanalysen durch die eingeschränkte Sicht des Cradle-to-Gate Ansatzes können zu Fehlinterpretationen und somit zu falschen Schlussfolgerungen führen.

Da Weichen an hochbelasteten Strecken einem hohen Verschleiß unterliegen, birgt dessen Nutzungsphase hohe Einsparungspotentiale bezüglich der negativen Umwelteinflüsse. Wird der verschleißbedingte Komponententausch durch qualitativ hochwertige und somit langlebige Komponenten minimiert, kann die Ökobilanz der Weiche nachhaltig verbessert werden. Durch eine optimierte Instandhaltungsplanung mittels einer adäquaten Zustandsbeschreibung und Prognose der Weichenkomponenten, kann dieses Einsparungspotenzial weiter gesteigert werden.

Auf den Erkenntnissen der in dieser Arbeit durchgeführten Ökobilanzen kann aus ökologischer Sicht eine klare Empfehlung der beschriebenen Betonschwellenweiche abgegeben werden.

Aufgrund des Umfangs dieser Arbeit konnten die Weichenantriebssysteme nicht berücksichtigt werden. Generell erfordert die Komplexität eines Weichenantriebs eine eigene Ökobilanzierung. Darüber hinaus ist es sinnvoll verschiedene Weichenantriebssysteme hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen zu vergleichen, um auch hier eine ökologisch optimale Lösung zu finden.

Ebenfalls wäre zu prüfen, welchen Einfluss die Kunstholzschwellenweiche auf die jährlichen Umweltwirkungen und somit auf das Ranking der Oberbautypen einer Weiche hat.

Des Weiteren gilt es, die Skalierbarkeit dieser Ökobilanz zu prüfen, indem die Ergebnisse einer eigens erstellten Ökobilanz eines Weichensystems mit derselben Grundform, aber unterschiedlichen Abzweigradius, mit jenen dieser Arbeit verglichen werden.

9 Literaturverzeichnis

- [1] ON EN ISO 14040:2009, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen
- [2] Bernhard, Lichtberger: *Handbuch Gleis*, DW Media Group GmbH, 2010, Hamburg
- [3] Günter, Berg; Horst, Henker: *Eisenbahnbau Weichen*, Transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1978, Berlin
- [4] <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/weiche/grundlagen-der-weichen/>, entnommen am: 11.03.2019
- [5] <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/weiche/weichenarten/>, entnommen am: 11.03.2019
- [6] <https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/weiche/weichenfahrbahn/>, entnommen am: 11.03.2019
- [7] Walter Klöpffer, Birgit Grahl: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*, WILEY-VCH Verlag, 2009, Weinheim
- [8] Lena, Klambauer (2017), *Ökobilanz Gleis*, Masterarbeit, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz
- [9] voestalpine VAE GmbH: *Weichenstückliste Holzschwellenweiche*, 17.08.2018
- [10] Persönliche Mitteilung Manfred Torschitz, voestalpine VAE GmbH, per Mail, 06.09.2018
- [11] voestalpine VAE GmbH: *Weichenstückliste Betonschwellenweiche*, 03.08.2018
- [12] Persönliche Mitteilung Erich Wipfler, voestalpine VAE GmbH, per Mail, 22.10.2018
- [13] voestalpine VAE GmbH: *Umwelterklärungen Weichenwerk Zeltweg 2015-2017*
- [14] Getzner Werkstoffe GmbH: *Produktdatenblatt Sylomer Under Sleeper Pad SLB 2210 G*, 22.10.2018
- [15] ÖBB Infrastruktur GmbH: *Weichen Form 60E1, Lageplan BA15, EW 500-1:12 Fz (Be) 1437 mm Spur, Spherolock-NG+PGS*, 20.04.2015
- [16] MABA Fertigteileindustrie GmbH: *Produktinformation Strecken- und Weichenschwelle*, 20.11.2015

- [17] Silvio Klügel, Klaus Lieberenz, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH: Ökobilanz zur Unterbausanierung Gleisgebundener vs. Konventioneller Umbau, 30.09.2016
- [18] Bauverlag BV GmbH: *Österreichische Baugeräteliste 2009 - Technisch-wirtschaftliche Baumaschinendaten*, 1. Aufl., Mohn media Mohndruck GmbH, 2009, Gütersloh
- [19] https://de.wikipedia.org/wiki/Vossloh_G_1700-2_BB, entnommen am: 11.03.2019
- [20] http://auto-umwelt.at/_gesetzg/gesvs_abg.htm, entnommen am: 03.12.2018
- [21] Veit, Peter; Marschnig, Stefan; Enzi, Markus; Neuper, Georg (2013), *LCC Weichen – Fahrweg – Aktualisierung 2013*, Projektbericht, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz
- [22] Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz: Standardelemente Weichen
- [23] PRé et al: *SimaPro Database Manual Methods Library*, Februar 2019
- [24] <https://de.wikipedia.org/wiki/CML-Methode>, entnommen am: 05.03.2019

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at