

Dr. Frank Werner

Umwelt & Entwicklung

Idaplatz 3

CH-8003 Zürich

Schweiz

Tel.: ++41-(0)44-241 39 06

e-mail: frank@frankwerner.ch

Web: www.frankwerner.ch

Arbeitsbericht

Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände

Eine Studie im Auftrag des

Bundesamtes für Strassen ASTRA

Lignum, Verband der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft

11. September 2019

Projektnehmer:

Dr. Frank Werner, Werner Umwelt & Entwicklung, Zürich

Projektbegleitgruppe

Jean-Paul Balz, Balz Holz AG,

Jean-Bernard Duchoud, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern

Urs Luginbühl, Holzindustrie Schweiz (HIS), Bern

Hansueli Schmid, Lignum, Zürich

Guido Thalman, Imprägnierwerk Willisau

Jean-Marc Waeber, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern

Unter Mitwirkung von:

Stefan Zöllig, Timbatec Holzbauingenieure Schweiz AG, Thun

Hanspeter Gloor, Departement Bau Verkehr und Umwelt des Kanton Aargau, Aarau

Inhaltsverzeichnis

1	Geltungsbereich.....	5
2	Ziel der Studie.....	10
3	Umfang der Studie.....	13
3.1	Deklarierte/funktionale Einheit.....	13
3.2	Systemgrenzen der Ökobilanz.....	14
3.1	Datenerhebung und Berechnungsverfahren.....	14
3.2	Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs und deren Anwendung.....	15
3.3	Allokationen und verwendeter Strommix.....	15
3.3.1	Co-Produkt Allokation	15
3.3.2	Allokation bei Multi-Input Prozessen	16
3.3.3	Allokationsverfahren für Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung.....	16
3.3.4	Strommix	17
3.4	Weitere methodische Setzungen	17
3.5	Auswahl der Daten/Hintergrunddaten	17
3.6	Datenqualität der Hintergrunddaten	17
3.7	Betrachtete Umweltwirkungen.....	17
4	Lärmschutzwände aus Holz	18
4.1	Produktbeschreibung	18
4.2	Herstellung	19
4.3	Einbau.....	24
4.4	Unterhalt/Nutzungsphase.....	24
4.5	Rückbau	26
4.6	Entsorgung.....	26
4.7	Potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze.....	27
4.7.1	Energetische Nutzung von Produktionsabfällen	27
4.7.2	Energetische Nutzung von Abfällen aus dem Unterhalt.....	28
4.7.3	Energetische Nutzung des Produktes am Ende des Lebenszyklus.....	29
5	Lärmschutzwände aus haufporigem Leichtbeton	30
5.1	Produktbeschreibung	30
5.2	Herstellung	30
5.3	Einbau.....	33
5.4	Unterhalt/Nutzungsphase.....	34

5.5	Rückbau	35
5.6	Entsorgung.....	36
5.7	Potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze.....	36
6	Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung	38
6.1	Resultate für das Ausfachungselement aus Holz	38
6.2	Resultate für das Ausfachungselement aus Beton.....	41
7	Interpretation.....	43
7.1	Hot spot-Analyse: Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz	43
7.2	Hot spot-Analyse: Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton.....	44
7.3	Vergleich der Umweltwirkung der untersuchten Ausfachungselemente.....	46
8	Sensitivitätsanalysen	49
8.1	Import von Nadelholz aus Sibirien/Russland für Ausfachungselemente aus Holz	49
8.2	Import von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Beton.....	52
8.3	Lebensdauern.....	54
8.4	Verwendung eines Stahl- statt eines Kupferdaches für die Holzvariante.....	55
8.5	Min/max-Betrachtung.....	60
9	Einschätzung der Datenqualität.....	62
10	Referenzen	63
	Anhang I: Ergänzende Datensätze	66

Z Zusammenfassung

1. Ziel und Rahmenbedingungen

Dieser Bericht umfasst eine Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus imprägniertem Holz bzw. haufporigem Leichtbeton. Die methodische Grundlage für diese Ökobilanz bildet die Norm ISO 14044, wobei im Wesentlichen die methodischen Setzungen nach SN EN 15804 bzw. die methodischen Vorgaben zur Berechnungen der KBOB Empfehlung Nachhaltiges Bauen 2009/1 (KBOB 2016a) berücksichtigt sind.

Die Ökobilanz beschränkt sich auf die einhängbaren Elemente der Lärmschutzwand („Ausfachungselemente“) inklusive Fixierschrauben; die Tragkonstruktion (Verankerung, Stützen, etc.) wird vernachlässigt, da sie für die untersuchten Alternativen identisch konstruiert werden kann und dabei verschiedene konstruktive Möglichkeiten bestehen.

Die zu bilanzierende Dimension des Ausfachungselementes beträgt 3 m in der Höhe und einem fixen Stützenraster von 4 Metern. „Die akustische Lebensdauer (die garantierte Einhaltung der Anforderungen nach Kapitel 4.10) für das Ausfachungselement ist als mindestens 30 Jahre festgelegt“ (ASTRA 2017, Kap. 21 001-11311, S. 1); aus der Praxis geltend gemachte längere (erwartete) Lebensdauern werden in einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die Ökobilanz umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Ausfachungselementes, also:

- Herstellung des Ausfachungselementes inkl. Transport der Rohstoffe
- Transport des Ausfachungselementes zur Verbauung
- Einbau
- Unterhaltsarbeiten; stoffliche Veränderungen während der Nutzungsphase
- Rückbau
- Transport zur Entsorgung
- Entsorgung/Aufbereitung
- Belastungen und Vorteile aus Rezyklierung und der energetischen Verwertung ausserhalb des Produktlebenszyklus.

Leider konnte für die Datenerhebung zu Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Leichtbeton kein Hersteller zur Mitarbeit gewonnen werden. Im Weiteren wurden mangels spezifischer Daten die Szenarien für den Einbau, die Nutzung, den Rückbau und die Entsorgung ausgehend von Annahmen zu Transportdistanzen, weiteren Aufwendungen und Entsorgungsszenarien in Übereinstimmung mit der Schweizerischen Gesetzgebung modelliert.

Entsprechend stellt diese Ökobilanz eine grobe Abschätzung der Umweltwirkungen von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände im Sinne einer erste „hot-spot“-Analyse dar.

2. Wesentliche Treiber des Ökoprotils des Ausfachungselementes aus Holz

Als wesentlicher Treiber für das bilanzierte Ausfachungselement aus Holz stellt sich die Kupferabdeckung mit einem Gesamtbeitrag von 60 % am Total der UBP 2013 der Herstellung heraus. Relevant sind dabei vor allem die Unterkategorien „Schwermetallemissionen“ während der Gewinnung und Aufbereitung in die Luft (47 % des Totals) sowie weitere „Luftmissionen“ (60 %).

Als zweitwichtigster Treiber stellt sich die Sägeware heraus, mit einem Beitrag von 16 % zum Total der UBP 2013 der Herstellung; für die Sägeware schlägt vor allem die Unterkategorie „Landbelegung“ mit 9 % zu Buche; weiter relevant sind die Kupferemissionen während der Gewinnung des Kupfers und aus der Verarbeitung des Kupfers zum eingesetzten Holzschutzmittel (5%).

Die Steinwolle und die Schrauben/Grundplatte aus Chromstahl tragen 3 % bzw. 4% zum Total der UBP 2013 der Herstellung bei.

Der Beitrag aller übrigen Materialien und Prozesse sowie der Transporte liegt individuell jeweils unter 2 %, in der Summe bei rund 7 %.

Für die Optimierung des Ausfachungselementes aus Holz drängt sich somit in erster Linie die Verwendung eines anderen Materials für die Abdeckung auf.

Weitere Möglichkeiten bestehen im Verbau von längeren Ausfachungselementen, um den Aufwand für die Fundamente und Stützen über die verbaute Länge zu reduzieren (im Rahmen dieser Studie nicht untersucht) sowie im Grundsatz jede Massnahme, die zur Verlängerung der Lebensdauer des Elementes führt (s. dazu Kap. 8.3).

3. Wesentliche Treiber des Ökoprofils des Ausfachungselementes aus haufporigem Lavabeton

Der wesentlichste Beitrag zum Total der UBP 2013 aus der Herstellung stammt aus der Herstellung der Rippenplatte mit einem Beitrag von 57 %; als wesentlicher Treiber entpuppt sich der darin verwendete Blähton, wobei die Verbrennung des in der Produktion eingesetzten Schweröls mit rund 40 % zu Buche schlägt, der als Zement eingesetzte CEM I trägt weitere 8 % bei. Die höchsten Beiträge werden somit in den Unterkategorien „Treibhauspotenzial“, verschieden „Emissionen in Luft und Wasser“ aus der Energieerzeugung sowie „Einsatz fossiler energetischer Ressourcen“ verursacht.

Der zweitwichtigste Beitrag stammt aus der Trägerplatte mit rund 27 %, wobei der bilanzierte Zement CEM II/B rund 15 % zum Total beiträgt. Entsprechend stellen die Unterkategorien „Treibhauspotenzial“, die „Emissionen in die Luft“ sowie „Einsatz mineralischer Ressourcen“ die Haupttreiber für dieses Bauteil dar.

In derselben Grössenordnung von 15 % liegt der Beitrag des Armierungsstahls, wobei hier insbesondere die Luftemissionen aus dem Umschmelzen des Schrottes relevant sind.

Optimierungspotenzial für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton liegt in erster Linie bei der Herstellung des Blähtons, insbesondere bei der Wahl des Brennstoffs bzw. des Herstellers für Blähton – wobei für die Modellierung von den Informationen im entsprechenden ecoinvent Datensatz ausgegangen wurde. Möglicherweise kann auch statt Blähton ein anderer Zuschlagstoff verwendet werden; diese Option konnte nicht mit einem Hersteller von Ausfachungselementen aus Beton diskutiert werden. Zu prüfen wäre auch die Wahl eines ökologischeren Zementes aus der Reihe CEM II oder CEM III.

4. Vergleich der Ökopprofile der untersuchten Varianten

In Abbildung Z-1 ist die Entwicklung der Umweltbelastungspunkte über den Lebenszyklus dargestellt, wobei die Säulen jeweils die kumulierte Umweltwirkung inkl. der vorgelagerten Abschnitte des Lebenszyklus enthalten.

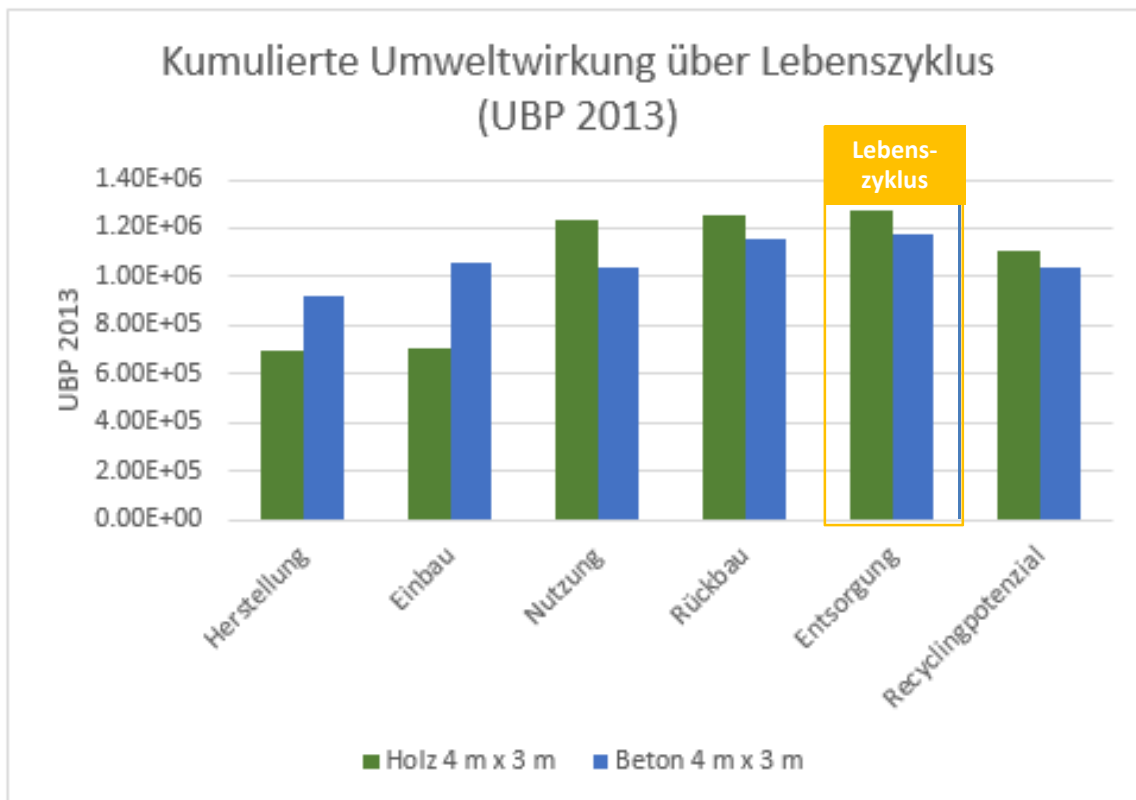


Abbildung Z-1: Kumulierte Umweltwirkung (UBP 2013) für die Ausfachungselemente aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Die Umweltwirkung der Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton liegt rund ein Viertel höher als diejenige des Ausfachungselementes aus Holz. Durch das höhere Gewicht des Betonelementes steigt die Umweltwirkung des Betonelements durch den Transport auf die Baustelle („Einbau“) auch stärker an als diejenige der Holzvariante. Während der Nutzungsphase dreht sich die Situation um, wobei die Umweltwirkung der Holzvariante durch die Auswaschung von Kupfer und Bor stark zunimmt und die Umweltwirkung der Betonvariante durch die Karbonatisierung des Zementes etwas abnimmt. Dadurch liegt die Umweltwirkung der Holzvariante nun rund 20 % höher als diejenige der Betonvariante. Der Rückbau ist in Analogie zum Transport auf die Baustelle aufgrund des Gewichtes für die Betonvariante wieder etwas relevanter, die Entsorgung ändert die Verhältnisse nicht mehr wesentlich.

Damit schneidet die Betonvariante unter Annahme gleicher minimaler Nutzungsdauer von 30 Jahren in der Bilanz von der „Wiege bis zur Entsorgung“ um rund 8 % günstiger ab als die Variante aus Holz. Wird das Recyclingpotenzial mit verrechnet, also die Substitution fossiler Brennstoffe durch die energetische Nutzung des Holzes bzw. die Substitution von Rundkies durch die RC-Gesteinskörnung aus der Betonvariante, so liegen die absoluten Werte für beide Varianten um rund 12 % tiefer, die Verhältnisse ändern sich also nicht.

Angesichtes der Unsicherheiten bei der Modellierung und bei Ökobilanzdaten im Allgemeinen ist der beobachtete Unterschied der Varianten für die Umweltbelastungspunkte UBP 2013 als nicht signifikant einzustufen.

In Abbildung Z-2 ist in analoger Weise das kumulierte Treibhauspotenzial über den Produktlebenszyklus der beiden Ausfachungselemente dargestellt.

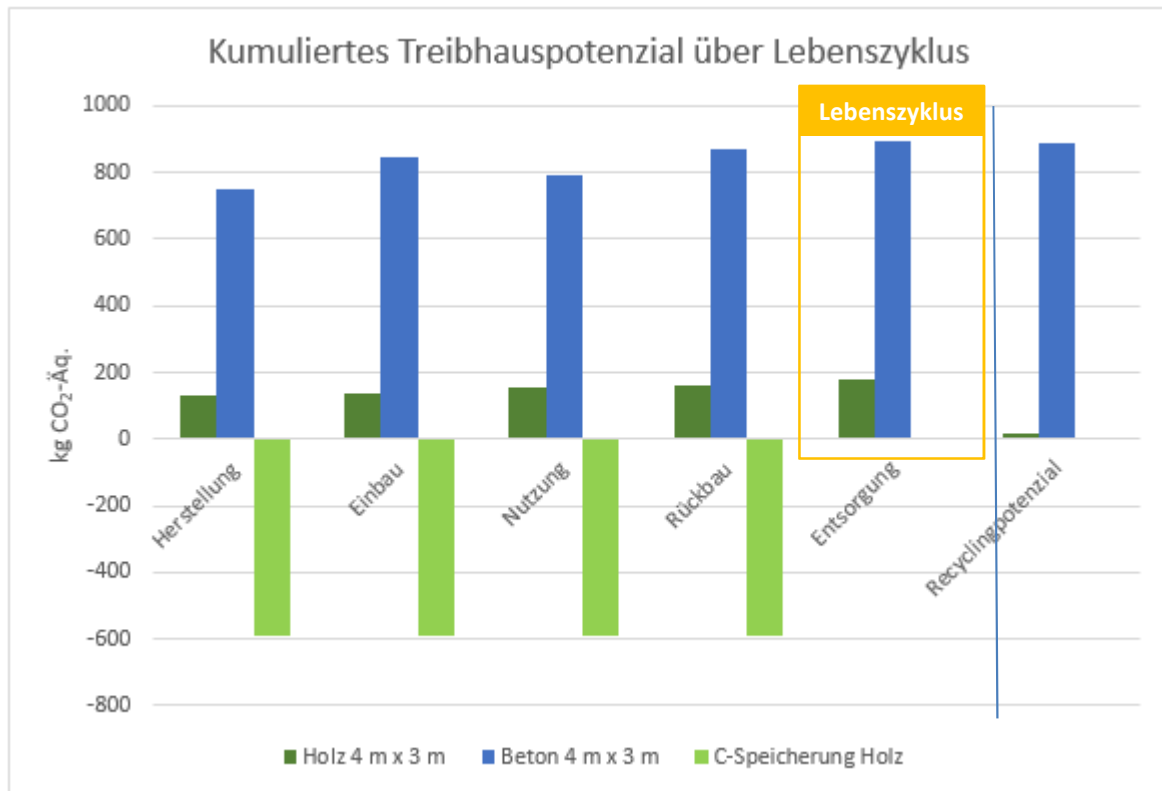


Abbildung Z-2: Kumulierte Treibhausgasemissionen für die Ausfachungselemente aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Beim Treibhausgaspotenzial liegen die kumulierten Werte für die Variante aus Holz über den gesamten Lebenszyklus um ein Mehrfaches unter den Werten der Variante aus Beton. Dies ist im Wesentlichen dem Umstand geschuldet, dass die Herstellung des Klinkers für die Zementvariante sehr CO₂-intensiv ist; ein Teil der geogenen CO₂-Emissionen wird zwar während der Nutzungsphase rückgebunden („karbonatisiert“); über den Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Entsorgung“ ändert sich aber die Treibhausgasbilanz im Vergleich zur Herstellung nur unwesentlich.

Im Falle der Variante aus Holz ist in der Konstruktion rund sechsmal so viel Kohlenstoff in CO₂-Äquivalent gebunden, wie fossile CO₂ Emissionen während der Herstellung freigesetzt werden. Die entsprechende Menge biogenes CO₂ wird bei der thermischen Verwertung des Holzes wieder freigesetzt.

Betrachtet man zusätzlich das Recyclingpotenzial, so kompensieren die eingesparten fossilen CO₂-Emissionen durch die Substitution fossiler Energieträger die über den Lebenszyklus freigesetzten fossilen CO₂-Emissionen fast vollständig. Sowohl für biogenes CO₂ als auch für fossiles CO₂ resultiert also für die Variante aus Holz unter Berücksichtigung der Substitutionswirkung der energetischen Verwertung rechnerisch CO₂-Neutralität.

5. Sensitivitätsanalysen

In Sensitivitätsanalysen werden verschiedene Varianten in den beiden Produktlebenszyklen bilanziert, so:

- der Import von Nadelholz aus Sibirien/Russland für Ausfachungselemente aus Holz
- der Import von Ausfachungselemente für Lärmschutzwände aus Beton
- Erfahrungs-/Erwartungswerte für die Lebensdauern (40 Jahre für Holz; 50 Jahre für Beton)

- die Verwendung eines Stahl- statt eines Kupferdaches für die Holzvariante
- Min/Max-Szenarien für beide Varianten

Bei dieser letzten Sensitivitätsbetrachtung werden diejenigen Szenariokombinationen betrachtet, die für die beiden untersuchten Ausfachungselemente zu den jeweils höchsten bzw. tiefsten Werten eines Indikators führen. Dies sind für die Berechnung der UBP:

Für die Holzvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Holzes aus Russland/Skandinavien

Min: Lebensdauer 40 Jahre, Verwendung von Schweizer Holz in der Variante mit Stahldach

Für die Betonvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Betonelementes (500 km Radius)

Min: Lebensdauer 50 Jahre, Produktion in der Schweiz

In Abbildung Z-3 sind die Ergebnisse dieser Min/Max-Betrachtung für die UBP wieder für die über den Lebenszyklus kumulierten Werte zusammengestellt.

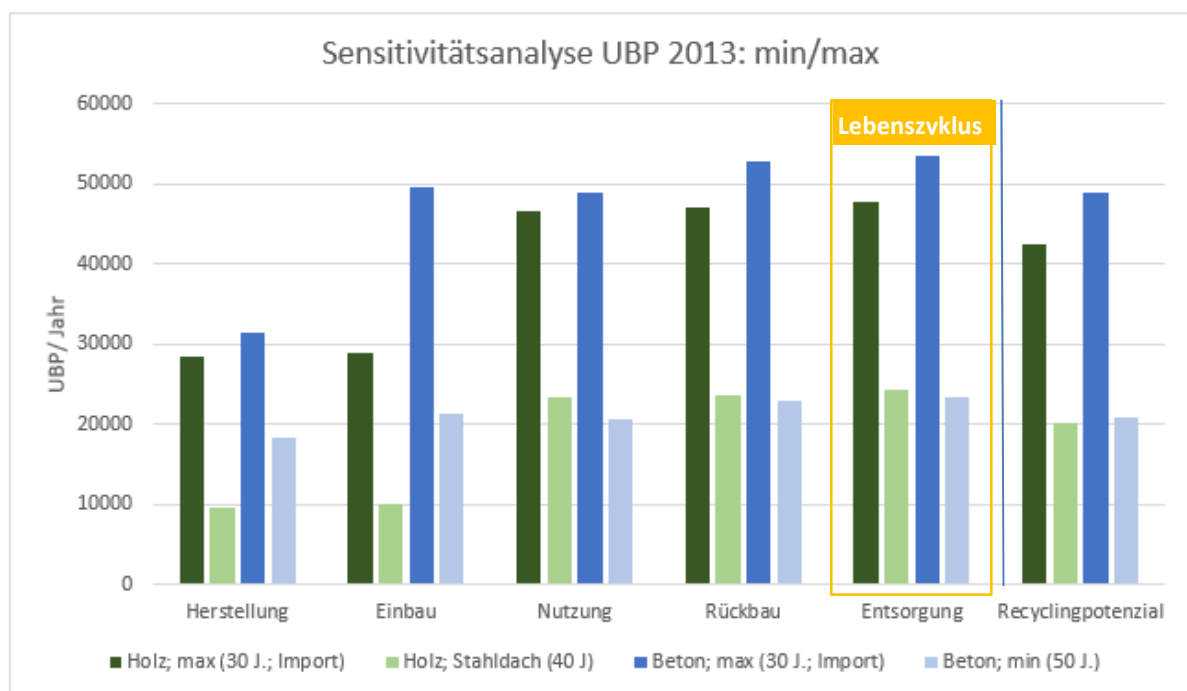


Abbildung Z-3: Sensitivitätsanalyse: Betrachtung der Minimal/Maximalvarianten für die Lärmschutzwände aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Zwischen der Minimal- und der Maximalvariante besteht für jedes Material eine grosse Spanne. Eine sorgfältige Wahl kann die Umweltwirkung auch innerhalb eines Materials stark beeinflussen.

Bei dieser Betrachtung wird ersichtlich, dass sich in der Minimalvariante die Umweltwirkung als UBP 2013 der beiden Varianten bei Verwendung der Erwartungswerte von 50 Jahre Lebensdauer für die Betonvariante und 40 Jahren für die Ausführung in Holz bei „heimischer“ Produktion und einer Stahl- abdeckung nicht signifikant unterscheiden. Bei der Maximalvariante als 30 Jahre Nutzungsdauer bei einem Importszenario liegen die Werte der Ausführung in Beton deutlich über den Umweltwirkungen

der Holzvariante. Dies unterstreicht die Bedeutung lokaler Beschaffung, einer sorgfältigen Materialwahl und einer langen Lebensdauer des Ausfachungselementes.

Für die Berechnung des Treibhauspotenzials (wie auch der Primärenergie gesamt) sind dies folgende Varianten:

Für die Holzvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Holzes aus Russland/Skandinavien

Min: Lebensdauer 40 Jahre, Verwendung von Schweizer Holz in der Variante mit Kupferdach

Für die Betonvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Betonelementes (500 km Radius)

Min: Lebensdauer 50 Jahre, Produktion in der Schweiz

Hinsichtlich des Treibhauspotenzials lässt sich schlussfolgern, dass die Unterschiede zwischen den Varianten derart gross sind, dass die Holzvariante im Vergleich zur Betonvariante deutlich günstiger abschneidet (Abbildung Z-4).

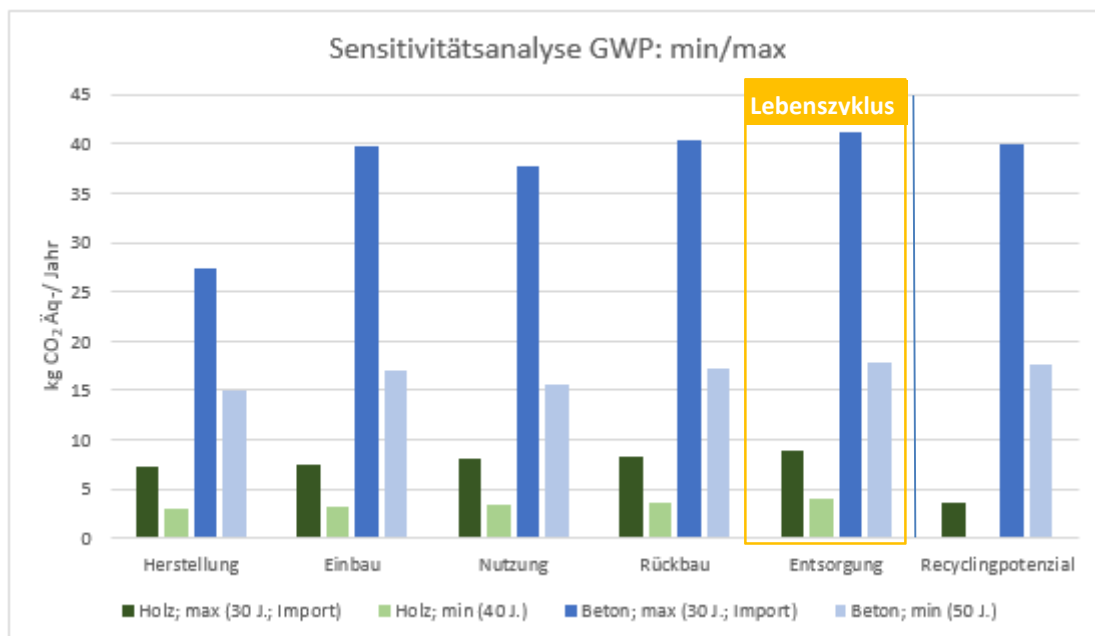


Abbildung Z-4: Sensitivitätsanalyse: Betrachtung der Minimal/Maximalvarianten für die Lärmschutzwände aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

In obiger Darstellung ist die temporäre C-Speicherung im Holz nicht mit berücksichtigt, die sich für die Holzvarianten nicht unterscheidet.

6. Datenqualität

Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie muss berücksichtigt werden, dass sich die Datenqualität der beiden bilanzierten Varianten deutlich unterscheidet. Basieren die Daten für die Produktion der Holzvariante auf realen Produktionsdaten eines Herstellers, so stellen die Daten für die Betonvariante einen – zwar mit einem Betonexperten konsolidierten – „best guess“ dar.

Auf der anderen Seite beruht das Auswaschungsszenario für die Holzvariante – zumindest für die Berechnung der UBP 2013 ein signifikanter Treiber – ebenfalls auf einem „best guess“. Die Ergebnisse der Studie, die der Abschätzung des Emissionsverhaltens zugrunde liegt, sind nicht ohne weitere Annahmen auf die bilanzierten Auswaschungen für die hier bilanzierte Einbringmenge und über die hier angenommene Lebensdauer des Ausfachungselementes übertragbar.

Weitere Szenarioannahmen wie die Transportdistanz auf die Baustelle bzw. zur Entsorgung sind von untergeordneter Bedeutung, und die angenommenen Entsorgungspfade dürften der Realität bzw. den derzeitigen gesetzlichen Anforderungen an die Entsorgung von druckimprägniertem Holz bzw. dem Betonrecycling in der Schweiz entsprechen.

1 Geltungsbereich

Dieser Bericht umfasst eine Ökobilanz von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus imprägniertem Holz bzw. haufporigem Leichtbeton. Die methodische Grundlage für diese Ökobilanz bildet die Norm ISO 14044, wobei im Wesentlichen die methodischen Setzungen nach SN EN 15804 bzw. die methodischen Vorgaben zur Berechnungen der KBOB Empfehlung Nachhaltiges Bauen 2009/1 (KBOB 2016a) berücksichtigt sind. In Fällen, in denen sich die Setzungen dieser beiden Dokumente unterscheiden, wird eine im Sinne der methodischen Konsistenz der Gesamtökobilanz entsprechende Wahl getroffen und die Relevanz dieser Wahl qualitativ abgeschätzt.

Leider konnte für die Datenerhebung zu Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Leichtbeton kein Hersteller zur Mitarbeit gewonnen werden. Im Weiteren wurden mangels spezifischer Daten die Szenarien für den Einbau, die Nutzung, den Rückbau und die Entsorgung ausgehend von Annahmen zu Transportdistanzen, weiteren Aufwendungen und Entsorgungsszenarien in Übereinstimmung mit der Schweizerischen Gesetzgebung modelliert.

In Sensitivitätsbetrachtungen werden die Auswirkungen einzelner für die Ergebnisse relevanter Aspekte detaillierter untersucht, z.B. hinsichtlich der Lebensdauer der betrachteten Lärmschutzwände.

Entsprechend stellt diese Ökobilanz eine grobe Abschätzung der Umweltwirkungen von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände im Sinne einer erste „hot-spot“-Analyse dar.

Für Ökobilanz in diesem Bericht wurde bis dato keiner Kritischen Prüfung nach ISO 14040 durchgeführt.

2 Ziel der Studie

Die Studie verfolgt folgende Zielsetzung:

- Erstellung einer Ökobilanz für Ausfachungselemente von Lärmschutzwänden in Konformität mit ISO 14044 als für Ökobilanzen massgebender Norm.

Im engeren Sinn sind folgende Ziele definiert:

1. Analyse der für die Ökobilanz eines Ausfachungselementes einer Lärmschutzwand relevanten Materialien und Prozesse („hot spot-Analysis“),
2. Ökologischer Vergleich der untersuchten Ausfachungselemente,
3. Abschätzung der Umweltwirkung von importierten Ausfachungselementen.

Es werden folgende Konstruktionen betrachtet:

- Ausfachungselement als Betonrippenplatte aus Lavabeton (Typ 21001-11321)
- Ausfachungselement aus druckimprägniertem Holz (Typ 21001-11327)

Die Ökobilanz beschränkt sich auf die einhängbaren Elemente der Lärmschutzwand („Ausfachungselemente“) inklusive Fixierschrauben; die Tragkonstruktion (Verankerung, Stützen, etc.) wird vernachlässigt, da sie für die untersuchten Alternativen identisch konstruiert werden kann und dabei verschiedene konstruktive Möglichkeiten bestehen.

Die zu bilanzierende Dimension des Ausfachungselementes beträgt 3 m in der Höhe und einem fixen Stützenraster von 4 Metern.

„Die akustische Lebensdauer (die garantierte Einhaltung der Anforderungen nach Kapitel 4.10) für das Ausfachungselement ist als mindestens 30 Jahre festgelegt“ (ASTRA 2017, Kap. 21 001-11311, S. 1);

aus der Praxis geltend gemachte längere (erwartete) Lebensdauern werden in einer Sensitivitätsanalyse untersucht.

Die Ökobilanz umfasst den gesamten Lebenszyklus eines Ausfachungselementes, also:

- Herstellung des Ausfachungselementes inkl. Transport der Rohstoffe
- Transport des Ausfachungselementes zur Verbauung
- Einbau
- Unterhaltsarbeiten; stoffliche Veränderungen während der Nutzungsphase
- Rückbau
- Transport zur Entsorgung
- Entsorgung/Aufbereitung
- Belastungen und Vorteile aus der Rezyklierung und der energetischen Verwertung ausserhalb des Produktlebenszyklus.

Die Studie ist in erster Linie für die interne Verwendung der Projektbeteiligten gedacht.

3 Umfang der Studie

3.1 Deklarierte/funktionale Einheit

Als Basisvarianten werden Lärmschutzwände aus druckimprägniertem Holz und haufporigem Leichtbeton untersucht, die gemäss ASTRA (2017) ausgeschrieben werden:

- Lärmschutzwand als Betonrippenplatte aus Lavabeton (Typ 21001-11321)
- Lärmschutzwand aus druckimprägniertem Holz (Typ 21001-11327)

Dabei wird nur das Ausfachungselement an sich untersucht, da sich die Grundkonstruktion aus Fundament, Sockelplatte und HEA-Profilen nicht in Abhängigkeit des eingesetzten Ausfachungselementes unterscheidet.

Die bilanzierte Dimension des Ausfachungselementes beträgt 4 m Länge x 3 m Höhe.

In der Basisvariante wird als Lebensdauer für beide Varianten von den Mindestanforderungen des ASTRA von 30 Jahren ausgegangen, da bis dato nur begrenzt Erfahrungswerte zu effektiven Lebensdauern vorliegen. Im Rahmen der Sensitivitätsbetrachtungen werden als Lebensdauer die Erwartungswerte des Kantons Aargau von 40 Jahren für Ausfachungselemente aus Holz und 50 Jahren für Ausfachungselemente aus Beton bilanziert.

Es wird weiter angenommen, dass beide Varianten die technischen Anforderungen des ASTRA namentlich an den Schallschutz erfüllen; eine mögliche „Übererfüllung“ der Anforderungen wird derzeit bei der Definition der funktionalen Einheit nicht betrachtet.

3.2 Systemgrenzen der Ökobilanz

Der Lebenszyklus der Lärmschutzwände wird in folgende Abschnitte unterteilt:

- *Herstellung*: die Bilanzierung beginnt mit der Gewinnung der Rohstoffe für die Herstellung der Ausfachungselemente bis hin zum transportfertigen Ausfachungselement am Werkstor. Die Bilanzierung umfasst dabei die Herstellung aller eingesetzter Halbfabrikate, die Stromgeneration, die Bereitstellung von Brenn- und Treibstoffen, den Transport aller Materialien zum Produktionsstandort, die Abfallbehandlung von Produktionsabfällen sowie sämtliche Prozessmissionen.
In Produkten gespeichertes CO₂ wird getrennt bilanziert und in Übereinstimmung mit der Wirkungsabschätzung für die KBOB-Liste nicht als Teil des GWP verrechnet, sondern separat ausgewiesen.
- *Einbau*: der Abschnitt „Einbau“ umfasst die Umweltwirkungen des Transportes des Ausfachungselementes an den Verbauungsort. Weiter wird hier die Herstellung der für den Einbau benötigten Hilfsstoffe bilanziert, die nicht bereits bei der Herstellung des Ausfachungselementes fix mit dem Element verbunden sind. Aufwendungen auf der Baustelle für das Versetzen des Ausfachungselementes werden vernachlässigt.
- *Nutzung*: der Abschnitt „Nutzung“ umfasst stoffliche Veränderungen während der Nutzungsphase. Dies sind Auswaschungen des Holzschutzmittels beim Ausfachungselement aus Holz und die Rückbindung geogener CO₂-Emissionen („Karbonatisierung“) beim Ausfachungselement aus Leichtbeton.
- *Rückbau*: der Abschnitt „Rückbau“ umfasst den Transport zur Entsorgung des Ausfachungselementes.
- *Entsorgung*: der Abschnitt „Entsorgung“ umfasst die Umweltwirkungen der Entsorgung der brennbaren Materialien in einer KVA sowie die Deponierung bzw. Bauschutttaufbereitung für das Recycling des Betons. Die dabei gewählten Systemgrenzen sind in Kap. 3.3.3 beschrieben.
- *Potenzielle Vorteile und Belastungen aus dem Recycling bzw. der Energierückgewinnung*: dieser Abschnitt umfasst potenzielle Belastungen und Vorteile, die sich aus dem Recycling bzw. der Energierückgewinnung ergeben. Dabei werden denjenigen Material- und Energieflüssen, die das Produktsystem verlassen, mögliche Substitutionswirkungen zugewiesen. So werden die Umweltwirkungen abgeschätzt, die:
 - durch die Verwendung von rezykliertem Mischgranulat statt Rundkies bzw.
 - durch die Verwendung von Wärme ab KVA statt einer Erdgasheizung bzw. von Strom ab KVA statt Strom ab Schweizer Stromnetz aus der Energierückgewinnung in einer KVA

vermieden werden könnten. Die Betrachtung dieser Vorteile und Belastungen geht über den in der Schweiz üblichen Bilanzierungsrahmen für Bauprodukte gemäss KBOB (2015) bzw. SIA 2032 hinaus; sie ergänzt diesen Bilanzierungsrahmen aber um einen im Sinne der „Kreislaufwirtschaft“ relevanten Aspekt.

3.1 Datenerhebung und Berechnungsverfahren

Die Daten für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz beruhen auf einer Erhebung der Produktionsdaten und Transportdistanzen eines Herstellers von Lärmschutzwänden aus druckimprägniertem Holz in der Schweiz. Ergänzende Angaben z.B. zum Stromverbrauch wurden abgeschätzt (s.

Kap. 4.2). Die eingebrachte Menge Holzschutzmittel stammt von zwei Imprägnierwerken, die Daten für das eigentliche Imprägnieren sind ecoinvent 3.3 entnommen (Werner et al. 2014).

Die Daten für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Leichtbeton mussten mangels Beteiligung eines Herstellers ausgehend von öffentlich verfügbaren Informationen über Dimensionen, Dichten, etc. als Mengenauszug abgeschätzt und mit Daten zur Herstellung generischer Produkte aus armiertem Beton bzw. Leichtbeton aus Blähton ergänzt werden.

Die Massenbilanz bzw. die prozentualen Anteile der Bestandteile des Ausfachungselementes aus Beton entsprechen als Plausibilisierung in etwa den Informationen aus einer Umweltproduktdeklaration zu vergleichbaren Lärmschutzwänden (IBU 2016).

Damit unterscheidet sich die Qualität der verfügbaren Daten zur Herstellung der Ausfachungselemente für die beiden Varianten deutlich; sie lässt nur eine erste grobe Einschätzung der Umweltwirkung der beiden Varianten zu.

Die Daten für die weiteren Abschnitte des Lebenszyklus beruhen auf Szenarioannahmen.

3.2 Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs und deren Anwendung

Da es sich bei der Ökobilanz um eine grobe Abschätzung handelt, wurden keine spezifischen Kriterien für den Ausschluss von Inputs und Outputs definiert und angewendet. Bei der Bilanzierung der Herstellung wurden eine vollständige Massenbilanz inkl. Abfällen und eine vollständige Energiebilanz für den eigentlichen Produktionsprozess angestrebt. Aufwendungen für die Infrastruktur wurden nur teilweise berücksichtigt.

Weiter wurden in den Szenarien zum Einbau, Nutzung, Rückbau und Entsorgung die für die Umweltwirkung relevanten Prozesse so gut wie möglich als generische Prozesse abgeschätzt.

3.3 Allokationen und verwendeter Strommix

Als Allokation wird die Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Ökobilanzmoduls auf das untersuchte Produktsystem verstanden (ISO EN 14040).

Wenn Produktsysteme mit mehreren Produkten und Recyclingprozessen bilanziert werden, sollten Allokationen so weit wie möglich vermieden werden. Wenn sie nicht vermeidbar sind, sollten Allokationen sorgfältig bedacht und gerechtfertigt werden.

Die folgenden Ausführungen zur Allokation beziehen sich auf Allokationen bei der Modellierung der Datensätze zur Beschreibung des Lebenszyklus der Ausfachungselemente, die in diesem Bericht dokumentiert sind. Die Allokationsgrundsätze für die Hintergrunddaten sind der Dokumentation zu ecoinvent 2.2 zu entnehmen.

3.3.1 Co-Produkt Allokation

Bei der Modellierung des Ausfachungselementes aus Leichtbeton treten keine Prozessschritte auf, die eine Co-Produkt Allokation erfordern würde. Beim Recycling des Betons könnte der Brech- und Sortierprozess als Co-Produktionsprozess betrachtet werden, der die Entsorgungsfunktion, rezyklierte Gesteinskörnung aus Mischabbruch und Armierungsstahl erzeugt. Da im Rahmen dieser Ökobilanz in Anlehnung an SN EN 15804 auch die potenziellen Vorteile und Belastungen ausserhalb des Produktsystems des Recyclings bzw. der Energierückgewinnung betrachtet werden, wird auf eine Allokation des

Brech- und Sortierprozesses verzichtet¹; der Prozess wird dem Produktsystem zugeordnet und dafür mögliche Substitutionsprozesse betrachtet.

Bei der Modellierung des Ausfachungselementes aus druckimprägniertem Holz fällt bei der Verarbeitung des Schnittholzes Restholz an. Da die Erlöse aus Hobelspänen und Hackschnitzeln aus den Kappstücken unter 1.5 % des Gesamterlöses liegen, wird auf eine Allokation des Prozesses auf die Nebenprodukte verzichtet und 100 % des Stromverbrauchs für das Kappen und Hobeln der Lärmschutzwand zugeordnet. Details sind in Kap. 4.2 beschrieben.

3.3.2 Allokation bei Multi-Input Prozessen

Es wurden keine Prozesse modelliert, die eine Multi-Input Allokation erfordert hätten.

3.3.3 Allokationsverfahren für Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung

Wiederverwertung, Recycling und Rückgewinnung wurden in Anlehnung an SN EN 15804 modelliert. Dabei wird angenommen, dass die Abfallverwertung in einer KVA als Abfallentsorgungsprozess zu betrachten ist, wobei die rückgewonnene Energie (Strom, Wärme) das Produktsystem verlässt. Potenzielle Vorteile und Belastungen aus der Substitution von Wärme aus fossilen Energieträgern bzw. Strom ab Netz werden getrennt ausgewiesen.

Druckimprägniertes Holz erreicht nach SN EN 16485 das „Ende der Abfalleigenschaften“ nie und wird als Abfall in einer KVA entsorgt (s. oben).

Für das Ausfachungselement aus Leichtbeton wird in Übereinstimmung mit SIA 2032 angenommen, dass 90 % des Betons recycelt werden. Dabei wird der Aufbereitungsprozess soweit dem Produktsystem zugerechnet, bis das Mischgranulat gebrauchsfertig vorliegt. Als Recyclingpotenzial wird angenommen, dass das Mischgranulat Rundkies ersetzen kann.

Für die Berechnung potenzieller Vorteile und Belastungen ausserhalb des Produktsystems werden nur „Nettoflüsse“ berücksichtigt, also der Output an Rezyklat abzüglich des Inputs an Rezyklat in das Produktsystem. Bei dieser Berechnung werden auch negative „Nettoflüsse“ berücksichtigt, also auch Fälle, in denen weniger Rezyklat das Produktsystem verlässt, als bei der Herstellung eingesetzt wird. Dies trifft namentlich auf Armierungsstahl zu, der entsprechend Schweizer Verhältnissen als aus 100 % Rezyklat hergestellt bilanziert ist; in diesem Fall führt die Berechnung dazu, dass der Materialverlust über den Produktlebenszyklus mit Primärmaterial kompensiert wird, aus der „Gutschrift“ rechnerisch also eine „Schlechtschrift“ resultiert.

Bei der Herstellung des Zementes bzw. Betons wird Klinker eingesetzt. Zur Herstellung von Klinker werden alternative Brenn- und Rohstoffe eingesetzt. Je nach Einstufung der alternativen Brennstoffe als Abfälle (basierend auf SN EN 15804 bzw. CEN/TR 16970) oder als Sekundärbrennstoffe (Praxis bei der Berechnungen für die „KBOB-Liste“) werden die CO₂-Emissionen der Nutzung dieser Brennstoffe im Falle der Klassierung als „Abfälle“ dem vorgelagerten Produktsystem zugerechnet, d.h. der Entsorgungsfunktion dieser Abfälle oder aber – wenn die alternativen Brennstoffe als Sekundärbrennstoffe klassifiziert werden – der Klinkerproduktion. Im Sinne der methodischen Konsistenz mit obiger Systemabgrenzung wird der Methodik nach EN 15804 gefolgt und die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerproduktion dem vorgelagerten Produktsystem zugerechnet. Bei einer

¹ Der Einfluss auf das Ergebnis dieser Allokation ist vernachlässigbar, da bei Mischabbruch die ökonomische Bedeutung der Entsorgungsfunktion deutlich überwiegt (vgl. Tschümperlin & Frischknecht 2016)

Modellierung als Sekundärbrennstoff würde das Treibhauspotenzial (GWP) des Ausfachungselementes aus Beton leicht höher ausfallen.

Hochofenschlacken sind Ko-Produkte der Roheisengewinnung; in Übereinstimmung mit der Bilanzierungspraxis der „KBOB-Liste“ bzw. mit Bezug auf SN EN 16908 wird die Rohschlacke als Nebenprodukt mit sehr geringem ökonomischem Wert betrachtet und verlässt lastenfrei den Hochofenprozess.

3.3.4 *Strommix*

In sämtlichen neu erstellten Datensätzen wurde der Schweizer Strom-Mix (Verbrauchsmix) mit Bezugsjahr 2011 aus der aktualisierten Version von ecoinvent v.2.2 (KBOB 2016b) verwendet.

3.4 Weitere methodische Setzungen

Es wurden keine CO₂-Zertifikate verrechnet.

3.5 Auswahl der Daten/Hintergrunddaten

Als Datenbank für die Hintergrunddaten wurden ausschliesslich die Datensätze aus der aktualisierten Version von ecoinvent v.2.2 (KBOB 2016b) verwendet, deren letzte Aktualisierung 2015 erfolgte. Für die Imprägnierung wurden aktuelle Daten aus ecoinvent 3.3 verwendet, da diese Daten in KBOB (2016b) nicht nachgeführt wurden.

3.6 Datenqualität der Hintergrunddaten

Die Anforderungen an die Datenqualität und die Hintergrunddaten sind wie folgt definiert:

- Die Datensätze beruhen in der Regel auf einem 1-Jahresdurchschnitt.
- Die Zeitperiode, über die Inputs und Outputs berücksichtigt werden, beträgt 100 Jahre von dem Jahr an gerechnet, für das die Daten als repräsentativ deklariert werden. Als Ausnahme werden im Rahmen der Berechnung der UBP 2013 die Langzeitemissionen an TOC aus Depo-nien berücksichtigt.
- Der technologische Hintergrund der erfassten Daten gibt die physikalische Realität für die deklarierten Produkte wieder.

3.7 Betrachtete Umweltwirkungen

Entsprechend den Vorgaben der KBOB-Liste (KBOB et al. 2015) werden folgende Indikatoren ausgewiesen, die in der Schweiz üblicherweise für die Ökobilanzierung von Bauprodukten und Gebäuden verwendet werden:

- Umweltbelastungspunkte gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Bafu, 2013),
- Treibhausgas-Emissionen (IPCC, 2013),
- kumulierter Energieaufwand, gesamt (Frischknecht et al. 2007b),
- kumulierter Energieaufwand, erneuerbar (Frischknecht et al. 2007b),
- kumulierter Energieaufwand, nicht erneuerbar (Frischknecht et al. 2007b).

Bei der Interpretation der Ergebnisse der Treibhausgasemissionen und den Umweltbelastungspunkten muss bedacht werden, dass die Werte relative Ergebnisse („Potenziale“) darstellen und dabei keine Wirkung auf Endpunkte in der Wirkungskette darstellen oder Aussagen zum Überschreiten von Schwellenwerten, Sicherheitsmargen oder zu Risiko machen.

Im Falle der Umweltbelastungspunkte stehen die Ergebnisse in Relation zu den impliziten oder expliziten Zielvorgaben der Schweizer Umweltgesetzgebung als normativem Rahmen dieser Methode.

4 Ausfachungselemente aus Holz

4.1 Produktbeschreibung

Das bilanzierte Ausfachungselement aus Holz basiert auf einem mit Mineralwolle gefüllten Hohlkasten aus druckimprägniertem Nadelholz, der mit vertikalen Staketen versehen ist. Es entspricht in der Auslegung dem Modell „Lärmschutzwand Holz“ (Nr. 21 001-11327) entsprechend den Vorgaben des ASTRA in seinem Fachhandbuch Trasse/Umwelt (ASTRA 2017) und kann in der vom ASTRA vorgegebenen Stützenkonstruktion aus HEA 160 eingefügt und montiert werden.

Die bilanzierte Dimension beträgt 4 m x 3 m. Dazu wird ein Ausfachungselement angenommen.

In Abbildung 4-1 sind der Querschnitt sowie ein stützendeckender bzw. nicht stützendeckender Grundriss dargestellt. Da es sich beim bilanzierten Element um eine generische Abschätzung handelt, dienen diese Bilder nur zur Illustration.

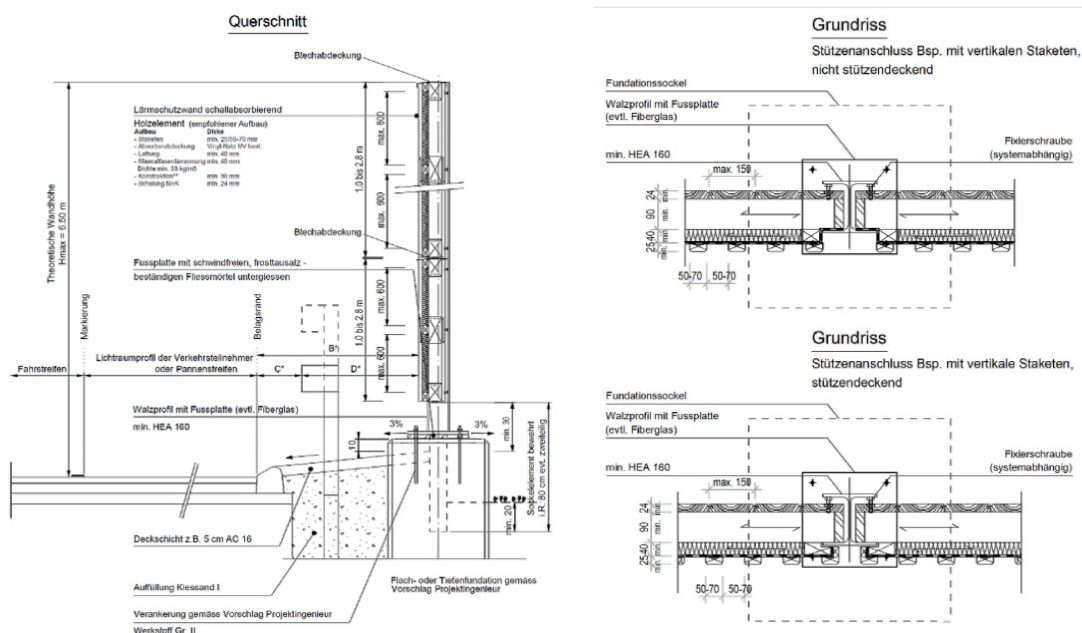


Abbildung 4-1: Querschnitt und Grundrisse einer Lärmschutzwand aus Holz (ASTRA 2017)

Laut ASTRA (2017, s. 208): „Bei LSW aus [...] Holz ist zwingend ein entsprechendes Prüfzeugnis [hinsichtlich der Erfüllung der Anforderungen an den Schallschutz] notwendig.“

4.2 Herstellung

In Tabelle 4-1 ist die Zusammensetzung der bilanzierten Lärmschutzwand aus Holz dokumentiert. Sie besteht im Wesentlichen aus druckimprägniertem Holz als Struktur und Steinwolle als lärmabsorbierendem Material. Das Gittergewebe dient zur Fixierung der Steinwolle; die Nägel werden als Verbindungen benötigt und die Grundplatte plus 8 Schrauben für die Montage bereits bei der Herstellung eingebaut; die Polyamidschlaufen dienen als Tragschlaufen für den Ein- und Ausbau; das EPDM dient als Dichtungsmaterial. Auf das Ausfachungselement wird ein Metalldach montiert, das entweder aus eloxiertem Aluminium, verzinktem Stahl oder Kupfer besteht.

Tabelle 4-1: Zusammensetzung des bilanzierten Ausfachungselementes aus Holz

Bestandteil	Material	Einheit	Menge
Gurte, imprägniert ¹⁾	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.288
Pfosten, imprägniert ¹⁾	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.072
Schalung, imprägniert ¹⁾	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.300
Staketen, imprägniert ¹⁾	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.124
Isolationsleisten, imprägniert ¹⁾	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.032
Gittergewebe	PE mit PVC-Beschichtung	kg	3.28
Isolation	Steinwolle	kg	20.2
Nägel	Cr-Stahl	kg	1.56
Befestigung (Grundplatte plus 8 Schrauben)	Cr-Stahl	kg	0.650
Gurte und Kleinmaterial	Polyamid	kg	0.0500
Dichtungen	EPDM	kg	2.00
Metalldach	Kupfer	kg	6.70
Gewicht total		kg	414.2

¹⁾ angenommene Dichte: $r_{18} = 465 \text{ kg/m}^3$, vgl. Tabelle 4-2

Ausgangsmaterial für die Herstellung sind luftgetrocknete sägeraue Balken, Bretter und Latten mit einer mittleren Rohdichte von 465 kg/m^3 bei 18 % Feuchte (zur Herleitung s. Tabelle 4-2). Nach einer Sichtung der Qualität werden die Hölzer zugeschnitten und gehobelt. Danach werden sie in einem Kesseldruckverfahren mit einer Cr-freien Holzschutzmittel – derzeit impralit-KDS – imprägniert und bis zur Fixierung des Holzschutzmittels gelagert.

Als nächster Schritt wird die Holzkonstruktion zusammengestellt, die Steinwolle und das Armierungsgitter zugeschnitten und mit der Dichtung aus EPDM in die Konstruktion gelegt, die Holzkonstruktion mit der Schalung verschlossen und die Laschen aus Polyamid für den Einbau mit einer Kran befestigt.

Die Lärmschutzwände aus Holz werden nicht verpackt ausgeliefert.

Tabelle 4-2: Herleitung der verwendeten Rohdichten des Holzes, ausgehend von den baumartenspezifischen Dichten und des Vorkommens der Baumarten gemäss Landesforstinventar 3 (Quelle: persönliche elektronische Mitteilung, U. Luginbühl, HIS, 2.12.2013)

Dichte	r_0	% gemäss LVI 3
Fichte	430	44%
Tanne	410	15%
Gemittelt	425	
r_{18}	465	

Beim Hobeln fallen Hobelspäne an, die ein Nebenprodukt darstellen. In Tabelle 4-3 ist der Erlös aus dem Hobeln von Balken und von Brettern ausgehend von Preisschätzungen hergeleitet, wie sie in den Datensätzen zur Holzkette in ecoinvent 3.3 hinterlegt sind.

Für die Berechnung des Hobelaufwandes für die Herstellung der Lärmschutzwand wird der Stromverbrauch und der Infrastrukturbedarf je m³ Hauptprodukt aus den Datensätzen in ecoinvent 3 auf die dabei entstehende Menge Hobelspäne gemäss ecoinvent 3 Datensatz umgerechnet. Die daraus resultierenden Werte („Hobelaufwand pro kg Hobelspan“ für das Hauptprodukt) wird dann in Tabelle 4-3 verwendet, um den realen Hobelaufwand über die bei der Herstellung des Ausfachungselementes anfallenden Hobelspäne abzuschätzen.

Für die Berechnung werden konservativ die höheren Werte zum Stromverbrauch und Infrastrukturbedarf für das Hobeln von Brettern verwendet.

Da die Erlöse der Späne bzw. der Hackschnitzel aus den Kappstücken im Vergleich zu den beiden Hauptprodukten unter 1.5 % des Gesamterlöses liegen, wird der gesamte Aufwand des Kappens und Hobelns (Strom, Infrastruktur) des Ausfachungselementes zugeordnet (wobei der Aufwand für das Hobeln bereits von allozierten Werten ausgeht).

Tabelle 4-3: Herleitung der Inputs aus DS aus ecoinvent 3.3 zum Hobeln von Balken bzw. Brettern basierend auf Datensätzen in ecoinvent 3.3 (Quelle zu Preisen: persönliche elektronische Mitteilung, U. Luginbühl, HIS, 26.8.2014)

	Einheit	Balken	Hobelspäne
Input	m ³		1.064
Output	m ³	1.0	0.0638
	kg atro	421.6	26.9
		94.0%	6.0%
Erlös	CHF/m ³	377.0	
	CHF/kg		0.13
	Total CHF	377.0	3.50
		99.1%	0.9%
Stromverbrauch	kWh/m ³ Output	8.83	
	kWh/kg atro Späne ¹⁾		0.328
Hobelwerk	p/m ³ Output	7.09E-07	
	Einheit	Bretter	Hobelspäne
Input	m ³		1.107
Output	m ³	1	0.107
	kg atro	421.6	45.0
		90.4%	9.6%
Erlös	CHF/m ³	377	
	CHF/kg		0.13
	Total CHF	377	5.85
		98.5%	1.5%
Stromverbrauch	kWh/m ³ Output	19.2	
	kWh/kg atro Späne ¹⁾		0.427
Hobelwerk	p/m ³ Output	7.40E-07	

¹⁾ entspricht dem Stromverbrauch für das Hobeln des Hauptproduktes (Balken bzw. Bretter), umgelegt auf die dabei anfallenden Späne in kg atro

Tabelle 4-4: Abschätzung des Inputs für das Hobeln der Rohwaren für Ausfachungselemente von Lärmschutzwänden aus Holz basierend auf dem Datensatz für das Hobeln von Brettern aus Nadelholz aus ecoinvent 3.3

		Wert ecoinvent 3.3	Hobelware	Späne
Massenbilanz	m ³		0.919	0.173
			84%	16%
	kg atro			66.9
Stromverbrauch	kWh/kg Späne atro	0.427		
<i>alloziert (100/0)</i>	kWh		28.6	0
Hobelwerk	p/m ³ Output	7.40E-07		
<i>alloziert (100/0)</i>	p		6.80E-07	

Die Daten für die Herstellung des Holzschutzmittels, für den Prozess des Imprägnierens und für die für das Kesseldruckverfahren verwendete Infrastruktur sind in Anhang I dokumentiert. Sie sind ecoinvent 3.3 entnommen.

Sowohl beim Öffnen der Kessel nach dem Imprägnieren als auch während der Lagerung zur Fixierung des Holzschutzmittels können Bestandteile des Holzschutzmittels in die Umwelt gelangen. Diese Mengen wurden in ecoinvent 3 über eine Emissionsszenario der OECD (OECD 2000) abgeschätzt. Für die Schweiz wird davon ausgegangen, dass keine Emissionen ins Wasser eingebracht werden, da durch die gesetzlich geforderten bauliche Massnahmen wie Rückhaltevorrichtungen zur Kanalisation, die Asphaltierung von Lager- und Betriebsplätzen, etc. die entsprechenden Vorkehrungen getroffen sind².

Für sämtliche Inputs werden die Transportaufwendungen verrechnet, wie sie in Tabelle 4-6 dokumentiert sind. Dabei wurden die realen Transportdistanzen vom Produktionsort des Inputs bis zum Produktionsort des Herstellers aus „google maps“ bestimmt, sofern der Produktionsort bekannt war. In Fällen, in denen der Produktionsort nicht bekannt war, wurde der Transportaufwand basierend auf den verfügbaren Informationen abgeschätzt. Für den Antransport der Sägeware wurde von 50 km Transportdistanz ausgegangen.

Das Ergebnis der Datenerhebung zur Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz sowie die Modellierung der Ökobilanz mit der nachgetragenen Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b) ist in Tabelle 4-5 dokumentiert.

² Laut eines Imprägnierwerks wurde das Betriebsgelände vor Jahren aus dem Altlastenkataster entfernt.

Tabelle 4-5: Prozessdaten für die Herstellung von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Holz (4 m x 3 m), ausgehend von sägerauem, luftgetrocknetem Nadelholz, inkl. Imprägnierung und deren Modellierung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkte					
Lärmschutzwand 4 m x 3 m			1	p	LSW Holz Herstellung 4 m x 3 m
Hobelspäne	zur internen Verwendung	m ³ fest	0.173		alloziert (0/100)
Inputs: Materialien/Energie					
Gurte	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.331		
Pfosten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.0827		
			0.360	m ³	sawnwood, beam, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Schalung	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.449		sawnwood, board, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Staketen	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.198		
Isolationsleisten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.032		
			0.230	m ³	sawnwood, lath, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Gittergewebe	PE mit PVC-Beschichtung	kg	3.28		
			1.31	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
			1.31	kg	Injection moulding/RER
			1.97	kg	Polyvinylchloride, at regional storage/RER
Isolation	Steinwolle	kg	20.2	kg	Rock wool, at plant/CH
Nägeln	Cr-Stahl	kg	1.56		
Grundplatte inkl. 8 Schrauben	Cr-Stahl	kg	0.650		
			2.21	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
Gurte und Kleinmaterial	Polyamid	kg	0.050	kg	Nylon 6, at plant/RER
Dichtungen	EPDM	kg	2.00	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Metalldach	Kupfer	kg	6.70	kg	Copper, at regional storage/RER
			6.70	kg	Copper product manufacturing, average metal working/RER
Einbringung Holzschutzmittel ¹⁾		kg	3.68	kg	Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration/CH_ohne Emissionen ins Wasser
Stromverbrauch/Hobeln		kWh	28.6	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Infrastruktur/Hobeln		p	6.80E-07	p	Planing mill/RER/I U
Transport LKW international ²⁾		tkm	30.1	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Transport LKW national ²⁾		tkm	25.4	tkm	Transport, lorry >28t, fleet average/CH
Transport LKW zur Abfallbeseitigung		tkm	1.04	tkm	Transport, municipal waste collection, lorry 21t/CH

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Outputs: Abfälle zur Behandlung					
Abfall: Gittergewebe	Entsorgung in KVA	kg	0.156		
			0.0626	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0938	kg	disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Abfall: Steinwolle	Entsorgung in Inertstoffdeponie	kg	0.960	kg	Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH
Restholz, imprägniert	Entsorgung in KVA	m ³ fest	0.103		
			50.7 ³⁾	kg	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0603	kg	disposal, copper, 0% water, to municipal incineration/kg/CH

¹⁾ 4 kg (GK3: 3 kg/m³; GK4: 5 kg/m³): die Einbringmenge wird je nach Imprägnierwerk und erwarteten Ansprüchen (z.B. bei Überwachung u.a.m.) für GK3 oder GK 4 gewählt.

²⁾ Grundlagen, s. Tabelle 4-6

³⁾ auch 20 % Wassergehalt skaliert entsprechen dem im Datensatz angenommenen Wassergehalt

Tabelle 4-6: Transportdistanzen und Transportmittel für die Einsatzstoffe der Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz

Bestandteil	Einheit	Menge	Dichte (kg/m ³)	Menge kg	km LKW	tkm LKW	Anmerkungen
Gurte	m ³	0.331	465	153.9	50	7.69	20-50 km
Pfosten	m ³	0.083	465	38.5	50	1.92	20-50 km
Schalung	m ³	0.449	465	208.7	50	10.44	20-50 km
Staketen	m ³	0.198	465	92.4	50	4.62	20-50 km
Isolationsleisten	m ³	0.032	465	14.9	50	0.74	20-50 km
Gittergewebe	kg	3.276	-	3.28	750	2.46	Import aus D (spezifische Berechnung)
Isolation	kg	20.16	-	20.2	1000	20.16	Europa/GUS; generischer Wert
Nägel	kg	1.56	-	1.56	800	1.25	Herkunft unbekannt; generischer Wert
Grundplatte + Schrauben	kg	0.650	-	0.650	800	0.52	Herkunft unbekannt; generischer Wert
Gurte und Kleinmaterial	kg	0.0500	-	0.0500	500	0.03	Herkunft unbekannt; generischer Wert
Dichtungen	kg	2.00	-	2.00	500	1.00	Herkunft unbekannt; generischer Wert
Imprägniersalz	kg	3.68	-	3.68	360	1.32	Import aus D (spezifische Berechnung)
Metalldach	kg	6.70	-	6.70	500	3.3	Herkunft unbekannt; generischer Wert
Total RER						30.08	
Total CH						25.42	

4.3 Einbau

Für den Transport der Lärmschutzwand auf die Baustelle wird eine mittlere Transportdistanz von 100 km mit der für die Schweiz repräsentativen LKW-Flotte angenommen. Da es sich bei diesem Wert um eine Annahme handelt, wurde der Transportdatensatz nicht hinsichtlich eines möglicherweise erhöhten Anteils an Leerfahrten angepasst.

Für den Transport werden 5 bis 8 Lärmschutzwände mit 3 Spanngurten verzurrt. Die wiederverwendbaren Spanngurte werden in der Bilanzierung vernachlässigt.

Der Energieaufwand für den eigentlichen Einbau wird als Vergleich zum Transport der Lärmschutzwand als nicht signifikant eingeschätzt und vernachlässigt.

Für die Befestigung des Ausfachungselementes an den Metallstützen werden die 8 Fixierschrauben und eine Grundplatte aus Chromstahl verwendet, die bereits bei der Produktion eingebaut wurden.

Die Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) auf die Baustelle in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b) ist in Tabelle 4-7 dokumentiert.

Tabelle 4-7: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) aus Holz auf die Baustelle in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Einbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport auf Baustelle	41.4	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH

4.4 Unterhalt/Nutzungsphase

Laut Auskunft des Tiefbauamtes Aargau werden Lärmschutzwände alle 5 Jahre hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit kontrolliert. Unterhaltsbedarf entsteht vor allem durch Beschädigungen durch Unfälle auf der Strasse oder durch Vandalenakte. Wird Unterhaltsbedarf festgestellt, so wird ein „kleiner Unterhalt“ geplant, d.h. einzelne Komponenten der Lärmschutzwand werden ausgetauscht.

Müssen ganze Ausfachungselemente ersetzt werden, so wird ein „grosser Unterhalt“ geplant, wobei die Ausfachungen ersetzt und der Zustand der Stahlstützen, insbesondere deren Beschichtung, überprüft wird.

Über die Lebensdauer einer Lärmschutzwand geht das Tiefbauamt Aargau bei Ausfachungselementen aus Holz von einem Unterhaltsaufwand von 5 % - 10 % des verbauten Materials aus; als Lebensdauer geht der Kanton Aargau von rund 40 Jahren für Ausfachungselemente von Lärmschutzwänden aus Holz aus (s. Kap. 8-3).

Entsprechend werden als konservativer Ansatz für den Unterhalt 10% des Aufwandes für die Herstellung, den Einbau und den Ausbau sowie die Entsorgung verrechnet (Tabelle 4-11); der potenzielle Nutzen einer energetischen Verwertung des Abfalls in einer KVA wird separat in Kap. 4.7.2 bilanziert.

Zusätzlich zum Unterhalt wird die Auswaschung der Bestandteile des Holzschutzmittels abgeschätzt. Dazu muss in einem ersten Schritt der Gehalt an Kupfer und Bor im Holzschutzmittel pro kg abgeschätzt werden. Dies ist in Tabelle 4-8 ausgehend von den Angaben im Technischen Datenblatt (Quelle: Rüt-

gers 2012) dokumentiert. Da es sich beim Didecylpolyoxyethylammoniumborat um ein Gemisch handelt, also keine fixe chemische Summenformel bekannt ist, wurde dieser Wirkstoff über eine abgeschätzte Summenformel angenähert

Tabelle 4-8: Herleitung des Kupfer- bzw. Borgehaltes des bilanzierten Holzschutzmittels impralit-KDS gemäss Technischem Datenblatt (Quelle: Rütgers 2012)

Zusammensetzung	Gehalt	%-Cu bzw %-B	Cu	B	C	H	O	N	Total
			64.5	10.8	12	1	16	14	Mol
Kupfer(II)hydroxid	10.3%	65.5%	1			2	2		98.5
Kupfer(II)carbonat	10.3%	57.9%	2		1	2	5		223.1
Didecylpolyoxyethyl-ammoniumborat ¹⁾	10.0%	5.3%		4	44	52	11	1	813.2
Borsäure	8.0%	17.5%		1		3	3		61.8
Cu-Gehalt	kg/kg	0.127							
Br-Gehalt	kg/kg	0.0193							

¹⁾ Didecylpolyoxyethylammoniumborat mangels Summenformeln angenähert als: (C20H21)2(C2H3O)2NB4O5(OH)4

Die Einbringmenge für das Holzschutzmittel wird je nach Imprägnierwerk im Hinblick auf die angestrebte Lebensdauer und weitergehende Anforderungen (z.B. durch Bewuchs) unterschiedlich gehandhabt. Daher wird eine Einbringmenge zwischen der im Technischen Datenblatt empfohlenen Einbringmengen für Nadelholz in Gefährdungskategorie GK 3 bzw. GK 4 angenommen. Über die tatsächlich imprägnierte Menge Holz und den Gehalten an Kupfer und Bor des Holzschutzmittels wird in Tabelle 4-9 die Einbringmenge der beiden Metalle berechnet.

Tabelle 4-9: Herleitung der Einbringung von Kupfer bzw. Bor durch die Imprägnierung mit impralit-KDS gemäss Technischem Datenblatt

Einbringmenge Holzschutzmittel ¹⁾	kg/m ³	4.00
eingebraachte Menge Holzschutzmittel	kg/ LSW 3m x 4 m	3.68
Einbringmenge Cu	kg	0.47
Einbringmenge B	kg	0.07

¹⁾ laut Technischem Datenblatt (Rütgers 2012): 3 kg/m³ für GK3, 5 kg/m³ für GK4

Tabelle 4-10: Abschätzung der Auswaschung von Kupfer und Bor, ausgehend von Pfadigan et al. (2014) unter Annahme einer Verdoppelung der ausgewaschenen Mengen aus 2 Jahren über die Lebensdauer des Ausfuchungselementes

	Auswaschung gemäss Pfadigan et al. (2014) über 2 Jahre	Abschätzung über Lebensdauer ¹⁾	kg/RSL
Auswaschung Cu	3.80%	7.6%	0.0354
Auswaschung B	23.20%	46.4%	0.0329

¹⁾ Anmerkung; die kumulierten Emissionen flachen über die Zeit ab; eine Verdoppelung der Auswaschung über 30 Jahre erscheint plausibel; allerdings sind die Einbringmengen im Feldversuch (Pfadigan et al. 2014) mit 13.5 kg/m³ deutlich höher als umgerechnet 8 kg/m³ Splintzone (bei 4 kg/m³ Einbringmenge pro m³ Vollholz); s. e-mail von G. Thalmann vom 16.4.2018.

Zur Abschätzung der Auswaschung von Kupfer und Bor über die Nutzungsphase wurde wie folgt vorgegangen: In einem Feldversuch mit Lärmschutzwänden mit dem in dieser Studie bilanzierten Holz-

schutzmittel wurden über 2 Jahre Auswaschungsraten von 3.8 % des Kupfers und 23 % des Bors gemessen (Pfadigan et al. 2014). Da die Extrapolationen über die Lebensdauer der Lärmschutzwand in der genannten Studie zu wenig realistischen Resultaten führten (Auswaschung > 100 % der Einbringung) wird unter Annahme einer exponentiell abnehmenden Auswaschrates eine Verdoppelung dieser Auswaschrates über die Lebensdauer des Ausfachungselementes bilanziert (Tabelle 4-10).

Tabelle 4-11: Modellierung des Unterhalts des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) abgeschätzt als 10 % des Aufwandes der Herstellung, des Einbaus und der Entsorgung sowie der Auswaschung über die Nutzungsdauer in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Nutzung 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Unterhalt: 10% der Herstellung	0.1	p	LSW Holz Herstellung 4 m x 3 m
Unterhalt: 10% des Einbaus	0.1	p	LSW Holz Einbau 4 m x 3 m
Unterhalt: 10% des Rückbaus	0.1	p	LSW Holz Einbau 4 m x 3 m
Unterhalt: 10% der Entsorgung	0.1	p	LSW Holz Entsorgung 4 m x 3 m
Emissionen ins Wasser			
Auswaschung von Bor über Lebenszeit	0.0329	kg	Boron
Auswaschung von Kupfer über Lebenszeit	0.0354	kg	Copper

4.5 Rückbau

Für den Transport der Lärmschutzwand von der Baustelle zu einer Kehrichtverbrennung wird als Annahme von einer Transportdistanz von 100 km mit der für die Schweiz repräsentativen LKW-Flotte gerechnet. Es wird angenommen, dass die Fixierschrauben und die Grundplatte dem Metallrecycling zugeführt werden und somit den Bilanzraum verlassen.

Der Energieaufwand für den eigentlichen Ausbau wird als Vergleich zum Rücktransport der Lärmschutzwand als nicht signifikant eingeschätzt und vernachlässigt.

Die Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) von der Baustelle in die KVA in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b) ist in Tabelle 4-12 dokumentiert.

Tabelle 4-12: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) aus Holz von der Baustelle zur Entsorgung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Rückbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport zur Entsorgung	41.4	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH
Cr-Stahl zum Recycling	0.650	kg	cut-off

4.6 Entsorgung

Als Entsorgungsszenario wird davon ausgegangen, dass vor der Entsorgung des Ausfachungselementes der Dämmstoff entfernt und einer Inertstoffdeponie zugeführt wird.

Druckimprägnierte Holz erreicht in Anlehnung an EN 16485 das Ende der Abfalleigenschaften nicht und wird in einer KVA thermisch verwertet (Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13: Modellierung der Entsorgung eines Ausfachungselementes aus Holz (4 m x 3 m) in einer KVA in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Entsorgung 4 m x 3 m
Outputs: Abfälle zur Behandlung			
Entsorgung Gittergewebe: PE	1.32	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Gittergewebe: PVC	1.97	kg	disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Dämmstoff	20.2	kg	Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH
Entsorgung Holz	402	kg	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Holzschutzmittel	0.417	kg	disposal, copper, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Stahlnägel	1.97	kg	disposal, steel, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Kupferdach	6.70	kg	cut-off

4.7 Potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze

In den folgenden Prozessen werden in Anlehnung an das Konzept des „Modul D“ nach EN 15804 potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze bilanziert, wie sie sich z.B. aus dem Recycling von Primärmaterial oder durch eine Energierückgewinnung aus Abfällen ergeben können. Im Rahmen des hier bilanzierten Produktsystems werden folgende Flüsse betrachtet, die das Produktsystem verlassen:

- Strom & Wärme aus der energetischen Nutzung von Produktionsabfällen in einer KVA
- Strom & Wärme aus der energetischen Nutzung von Abfällen aus dem Unterhalt in einer KVA
- Strom & Wärme aus der energetischen Nutzung des Ausfachungselementes aus Holz nach dem Rückbau

Das Kupferdach besteht teilweise aus rezykliertem Kupfer. Allerdings stammen die Daten zur Kupferherstellung in ecoinvent 2.2 (KBOB 2015) aus dem Jahr 1994. Aufgrund der Daten zur Kupferproduktion in ecoinvent 2.2 ist davon auszugehen, dass bei einer Berechnung der Nettomengen an Kupferschrott über den Lebenszyklus eine positive Schrottmenge resultieren würde, die Verrechnung der Vorteile des Kupferrecyclings also zu einer Gutschrift führen würden. Da die verfügbaren Daten aber unzuverlässig sind, wird auf eine Berücksichtigung dieser Vorteil verzichtet.

Ebenso wird aufgrund der geringen Mengen der potenzielle Nutzen aus dem Recycling des Cr-Stahls vernachlässigt.

4.7.1 Energetische Nutzung von Produktionsabfällen

In Tabelle 4-14 ist die Herleitung des unteren Heizwertes der Produktionsabfälle aus der Herstellung (s. Tabelle 4-3) dokumentiert. Weiter wird die rückgewinnbare Energie als Strom und Wärme abgeschätzt, wobei die Effizienz einer KVA zugrunde gelegt ist, wie sie in ecoinvent 3.3 dokumentiert ist.

Tabelle 4-14: Herleitung des unteren Heizwertes der Produktionsabfälle für die Holzvariante, die in einer KVA entsorgt werden und Abschätzung der rückgewonnenen Energie (basierend auf ecoinvent 3.3 Datensätzen)

Bestandteil	Material	Einheit	Menge	kg	MJ/kg (Hu)	
Restholz, imprägniert	Entsorgung in KVA	m ³ fest	0.103	47.9	15.8	758.1
Abfall: Gittergewebe	Entsorgung in KVA	kg	0.156	0.156	31.0	4.83
Total				46.8		763
			Effizienz Energierückgewinnung		39%	
			wovon Wärme		66%	
			wovon Strom		34%	
Wärme				MJ/m ³	205.0	
Strom				MJ/m ³	104.2	
				kWh/m ³	28.9	

Als möglicher Nutzen aus der rückgewonnenen Energie wird angenommen, dass der rückgewonnene Strom den Bezug von Strom ab Netz in der Schweiz und die rückgewonnene Wärme eine moderne industrielle Gasfeuerung substituieren (Tabelle 4-15).

Tabelle 4-15: Modellierung der Belastungen und Vorteile aus der Energierückgewinnung aus der Entsorgung des Produktionsabfalls aus der Herstellung eines Ausfachungselementes aus Holz (4 m x 3 m) in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierück-gewinnung Produktionsabfälle 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Substitut: Wärme aus Erdgas	-205.0	MJ	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Substitut: Strom ab Netz	-28.9	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH

4.7.2 Energetische Nutzung von Abfällen aus dem Unterhalt

Der potenzielle Nutzen aus der energetischen Nutzung von Abfällen aus dem Unterhalt wird in Anlehnung an die Annahmen zum Unterhalt (s. Kap. 4-4) als 10 % des Nutzens aus der energetischen Nutzung des Ausfachungselementes nach dessen Rückbau bilanziert (Tabelle 4-16).

Tabelle 4-16: Modellierung der Belastungen und Vorteile aus der Energierückgewinnung aus den Abfällen aus dem Unterhalt eines Ausfachungselementes aus Holz (4 m x 3 m) in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierück-gewinnung Unterhalt 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Substitution von Wärme/Strom: Produktionsabfälle	0.1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierück-gewinnung Produktionsabfälle 4 m x 3 m
Substitution von Wärme/Strom: Abfälle aus End-of-life	0.1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierück-gewinnung im EoL 4 m x 3 m

4.7.3 Energetische Nutzung des Produktes am Ende des Lebenszyklus

In Tabelle 4-17 ist die Herleitung des unteren Heizwertes für das Ausfachungselement am Ende des Lebenszyklus dargestellt; die Materialisierung entspricht der Zusammensetzung des Ausfachungselements, wie sie in Tabelle 4-3 dokumentiert ist.

Weiter wird die rückgewinnbare Energie als Strom und Wärme abgeschätzt, wobei die Effizienz einer KVA zugrunde gelegt ist, wie sie in ecoinvent 3.3 dokumentiert ist.

Tabelle 4-17: Berechnung des unteren Heizwertes des in der KVA zu entsorgenden Ausfachungselementes aus Holz (4 m x 3 m) und der rückgewinnbaren Energie (Effizienz der KVA gemäss ecoinvent 3.3)

Bestandteil	Material	Einheit	Menge	kg	MJ/kg		
Gurte	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.288	134.0	15.8	2123	
Pfosten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.0720	33.5	15.8	530.7	
Schalung	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.300	139.6	15.8	2211	
Staketen	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.124	57.8	15.8	916.3	
Isolationsleisten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.032	14.9	15.8	235.9	
Gittergewebe	PE mit PVC-Beschicht.	kg	3.28	3.28	28.8	94.3	
Isolation	Steinwolle	kg	20.2	20.2	0	0	
Nägel	Cr-Stahl	kg	1.56	1.56	0	0	
Befestigung	Cr-Stahl	kg	0.650	0.650	0	0	
Gurte und Kleinmaterial	Polyamid	kg	0.0500	0.0500	31.0	1.55	
Dichtungen	EPDM	kg	2.00	2.00	40.3	80.6	
Total				406.90		6193	
					Effizienz Energierückgewinnung		39%
					wovon Wärme		66%
					wovon Strom		34%
					Wärme	MJ/m ³	1583.6
					Strom	MJ/m ³	805.1
						kWh/m ³	223.6

Als möglicher Nutzen aus der rückgewonnenen Energie wird angenommen, dass der rückgewonnene Strom den Bezug von Strom ab Netz in der Schweiz und die rückgewonnene Wärme eine moderne industrielle Gasfeuerung substituieren (Tabelle 4-18).

Tabelle 4-18: Modellierung der Belastungen und Vorteile aus der Energierückgewinnung aus der Entsorgung einer Lärmschutzwand aus Holz (4 m x 3 m) in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierückgewinnung im EoL 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Substitut: Wärme aus Erdgas	-1583.6	MJ	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Substitut: Strom ab Netz	-223.6	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH

5 Ausfuchungselemente aus haufporigem Leichtbeton

5.1 Produktbeschreibung

Das bilanzierte Ausfuchungselement aus haufporigem Leichtbeton setzt sich aus einer Rippenplatte aus haufporigem Leichtbeton als schallabsorbierendem Element und einem Trägerelement („Tragschale“) zusammen. Es entspricht in der Auslegung dem Modell „Betonrippenplatte“ (Nr. 21 001-11321) entsprechend den Vorgaben des ASTRA in seinem Fachhandbuch Trasse/Umwelt (ASTRA 2017) und kann in derselben Stützenkonstruktion aus HEA 160 eingefügt und montiert werden.

Die bilanzierte Dimension beträgt 4 m x 3 m. Dazu werden 2 vertikal gestapelte Ausfuchungselemente angenommen.

In Abbildung 5-1 sind der Querschnitt sowie ein stützendeckender bzw. nicht stützendeckender Grundriss dargestellt. Da es sich beim bilanzierten Element um eine generische Abschätzung handelt, dienen diese Bilder nur zur Illustration.

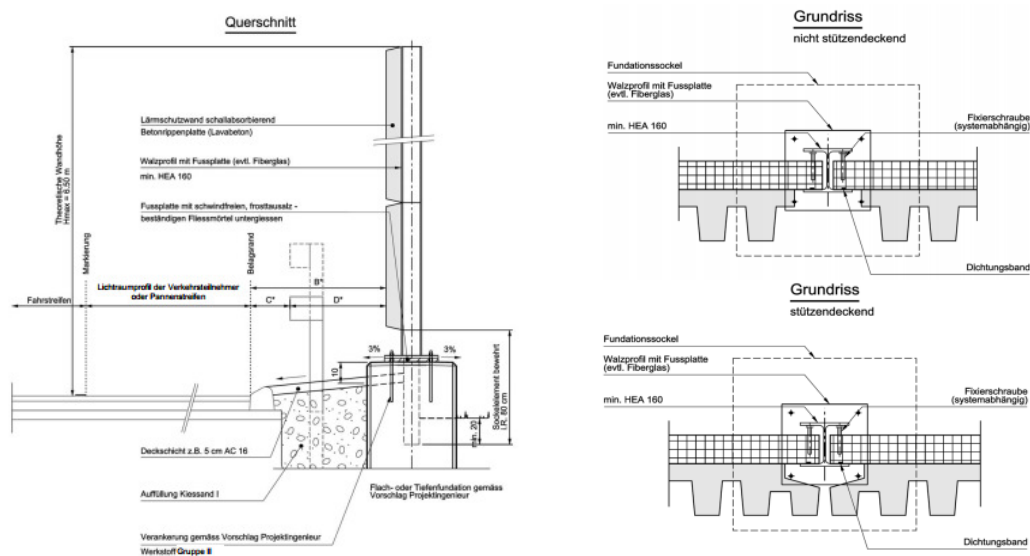


Abbildung 5-1: Querschnitt und Grundrisse einer Lärmschutzwand aus haufporigem Leichtbeton (ASTRA 2017)

Laut ASTRA (2017, s. 208): „Die Anforderungen an die Schalldämmung werden von den LSW aus Lava- oder Leichtbeton aufgrund ihres hohen Flächengewichtes (in der Regel ca. 400 kg/m²) problemlos weit übertroffen, weshalb in der Regel kein spezifisches Prüfzeugnis notwendig ist.“

5.2 Herstellung

In Tabelle 5-1 ist die Zusammensetzung des bilanzierten Ausfuchungselementes aus haufporigem Leichtbeton dokumentiert. Es besteht im Wesentlichen aus einer tragenden Rückwand („Tragschale“) aus armiertem frost- und tausalzbeständigem Beton der Festigkeitsklasse C30/37 und einem aufgesetzten Element aus haufporigem Leichtbeton, der in dieser Betrachtung aus Blähton hergestellt wird.

Tabelle 5-1: Zusammensetzung des bilanzierten Ausfachungselementes aus haufporigem Leichtbeton (Abschätzung basierend auf Müller-Steinag Elemente AG 2018)

	l (m)	h (m)	b (m)	m ³	kg/m ³	kg	
Tragschale							
Beton ¹⁾	4	3	0.1	1.2	2400 ²⁾	2880	
Armierung				1.2	40 ³⁾	54	
<i>total</i>						2928	70.5%
Leichtbeton							
	4	3	0.113	1.36	900 ²⁾	1224	29.5%
Total						4152	100.0%

¹⁾ C 30/37, forst- und tausalzbeständig

²⁾ Dichten gemäss Umweltproduktdeklaration für Schallschutzwände EPD-NEO-20150056-CBA1-D, veröffentlicht beim Institut Bauen und Umwelt, Berlin (IBU 2015)

³⁾ entsprechend ca. 1.2 % Armierung gemäss Umweltproduktdeklaration für Schallschutzwände EPD-NEO-20150056-CBA1-D, veröffentlicht beim Institut Bauen und Umwelt, Berlin (IBU 2015)

Die Herstellung des Ausfachungselementes aus haufporigem Leichtbeton ist nicht im Detail bekannt; sie wird getrennt für die Herstellung des armierten Betons sowie für die Herstellung des Leichtbetons ausgehend von entsprechenden Datensätzen in der KBOB-konformen Datenbank (KBOB 2015) modelliert. Die Grunddaten für die Herstellung von Tiefbaubeton mit CEM II/B finden sich in Tabelle 5.2, die Grunddaten für die Herstellung von Leichtbeton mit Blähton in Tabelle 5-3.

Tabelle 5-2: Herstellung von „Tiefbaubeton“ mit CEM II/B, pro m³ (Werner 2015 für KBOB 2016a)

Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)	Menge	Einheit
Produkt		
Beton, Tiefbaubeton CEM II/B 2009-2013_2015	1	m ³
Inputs: Material/Energie		
Concrete mixing plant/CH/I	4.17E-07	p
Diesel, burned in building machine/GLO	0.5	MJ
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH	4.9	kWh
Gravel, round, at mine/CH	1240	kg
Heavy fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH	0	MJ
Light fuel oil, burned in industrial furnace 1MW, non-modulating/CH	9.5	MJ
Lubricating oil, at plant/RER	0.02	kg
Natural gas, burned in industrial furnace low-NOx >100kW/RER	8.8	MJ
CEM II B, KBOB 2009-2013_2015	310	kg
Synthetic rubber, at plant/RER	0.12	kg
tap water, at user/kg/CH	150	kg
Transport, barge/RER	4.79	tkm
Transport, freight, rail/CH	73	tkm
Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH	32.6	tkm
Betonverflüssiger	2	kg
Polycarboxylates, 40% active substance, at plant/RER	1	kg
Sand, at mine/CH	697	kg
Outpus: Abfälle zur Behandlung		
Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH	5.39	kg
disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/kg/CH	0.05	kg

Tabelle 5-3: Herstellung von Leichtbeton aus Blähton (KBOB 2015, basierend auf ecoinvent 2.2)

Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)	Menge	Einheit
Produkt		
Lightweight concrete block, expanded clay, at plant/CH	1	p
Inputs: Material/Energie		
Diesel, burned in building machine/GLO	0.0158	MJ
electricity, medium voltage, production CH, at grid/kWh/CH	0.0065	kWh
Expanded clay, at plant/DE	0.9	kg
Mine, clay/CH/l	1.67E-10	p
Packing, clay products/CH	1	kg
Portland cement, strength class Z 42.5, at plant/CH	0.1	kg
tap water, at user/kg/RER	0.05	kg
Transport, lorry >16t, fleet average/RER	0.0769	tkm
Output: Abfälle zur Behandlung		
disposal, municipal solid waste, 22.9% water, to municipal incineration/kg/CH	0.000125	kg
Treatment, concrete production effluent, to wastewater treatment, class 3/CH	0.0000833	m ³

Hinweis: Verwendung des CH-Strommixes

Weitere Hilfsmaterialien für den Einbau wie Dichtungsbänder, Schrauben und PE-Platten werden im Zusammenhang mit dem Einbau in Kapitel 5.3 bilanziert.

Für sämtliche Inputs werden die Transportaufwendungen verrechnet, wie sie in Tabelle 5-4 dokumentiert sind. Dabei werden die Transportmittel und -entfernungen aus dem cemsuisse-Bericht zur Bilanzierung von Betonen für die KBOB-Liste übernommen, für die Armierung direkt abgeschätzt. Die Transportdistanzen für die Herstellung des Leichtbetons sind im Datensatz bereits enthalten.

Tabelle 5-4: Abschätzung der Transportaufwendungen für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Leichtbeton

	kg	Transport LKW km (Anteil)	Transport Bahn km (Anteil)	Transport LKW tkm	Transport Bahn tkm	Grundlage
Tragschale (Beton C30/37)						
Sand	836.4	20 (70 %)	100 (30 %)	11.7	25.1	KBOB (Werner 2015); ohne Schiffstransport
Kies	1488	20 (70 %)	100 (30 %)	20.8	44.6	
Zement	372	40 (50 %)	100 (50 %)	7.44	18.6	KBOB (Werner 2015)
Wasser	180					
Additive	3.6	500		1.80	0	KBOB (Werner 2015)
Armierung	48	75		3.60	0	eigene Abschätzung
Leichtbeton						
Blähton	1101.6	in DS	in DS			
Zement	122.4	in DS	in DS			

Das Ergebnis der Datenerhebung zur Herstellung des Ausfachungselementes aus haufporigem Leichtbeton sowie deren ökobilanzielle Modellierung in der nachgetragenen Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b) ist in Tabelle 5-5 dokumentiert.

Tabelle 5-5: Prozessdaten für die Herstellung der Lärmschutzwand aus haufporigem Leichtbeton (4 m x 3 m) in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Herstellung 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Trageschale	1.2	m ³	Beton, Tiefbaubeton CEM II/B 2009-2013_2015
Rippenplatte	1224	kg	Lightweight concrete block, expanded clay, at plant/CH
Armierungsstahl	48	kg	KBOB/EPD Reinforcing steel, at plant/RER (100% rec.)
CH-Transporte mit LKW	43.5	tkm	Transport, lorry >28t, fleet average/CH
EU-Transport der Betonzusatzmittel mit LKW	1.8	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
CH-Transporte mit Bahn	88.3	tkm	Transport, freight, rail/CH

Aufwendungen für Schalungen, etc. werden vernachlässigt.

5.3 Einbau

Das Ausfachungselement wird zusammen mit dem Hilfsmaterial für den Einbau auf die Baustelle gefahren.

Für den Einbau werden folgende Mengen an Hilfsmaterialien ausgehend von Müller-Steinag Elemente AG (2018) abgeschätzt (Tabelle 5-6).

Tabelle 5-6: Abschätzung des Bedarfs an Hilfsmaterialien für den Einbau des Ausfachungselementes aus Leichtbeton (4 m x 3 m) auf der Baustelle basierend auf Müller-Steinag Elemente AG (2018)

		Stück	l (m)	b (m)	h (m)	Dichte (kg/m ³)	Gewicht (kg/Stk.)	Gewicht total
Dichtungsband vertikal	Gummi	2	3.00	0.0200	0.0150	940		1.69
Dichtungsband horizontal	Gummi	2	4.00	0.0200	0.0200	940		3.01
Stellschrauben M12 ¹⁾	Cr-Stahl	8					0.0782	0.626
Kunststoffkappe	Polyamid	8					0.0100	0.0800
PE-Platte	HDPE	4	0.10	0.100	0.0200	960		0.768
Total								6.17

¹⁾ 8 cm Rundstahl mit d = 1.2 cm, zuzüglich 10 % für Mutter

Für den Transport der Lärmschutzwand auf die Baustelle wird als Annahme von einer Transportdistanz von 100 km mit der für die Schweiz repräsentativen LKW-Flotte gerechnet. Da es sich bei diesem Wert um eine Annahme handelt, wurde der Transportdatensatz nicht hinsichtlich eines möglicherweise erhöhten Anteils an Leerfahrten angepasst.

Wiederverwendbare Transportsicherungen werden in der Bilanzierung vernachlässigt.

Für den Transport der Hilfsmaterialien werden pauschal 500 km Transport in die Schweiz plus 100 km Transport vom Zwischenlager auf die Baustelle bilanziert.

Der Energieaufwand für den eigentlichen Einbau wird als Vergleich zum Transport der Lärmschutzwand als nicht signifikant eingeschätzt und vernachlässigt.

Die Modellierung des Transports und Einbaus des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) auf der Baustelle ist in Tabelle 5-7 dokumentiert.

Tabelle 5-7: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes aus Leichtbeton (4 m x 3 m) auf die Baustelle in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Einbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport der LSW & Hilfsmaterial auf Baustelle	416	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH
EU-Transporte der Hilfsmaterialien in CH	3.08	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Dichtungsband, Gummi	4.7	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Herstellung Cr-Schrauben	0.626	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
	0.626	kg	Chromium steel product manufacturing, average metal working/RER
Herstellung PE-Platten	0.768	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
	0.768	kg	Extrusion, plastic pipes/RER
Kunststoffkappen, Polyamid	0.08	kg	Nylon 6, at plant/RER

5.4 Unterhalt/Nutzungsphase

Über die Lebensdauer betrachtet geht das Tiefbauamt Aargau bei Lärmschutzwänden aus Leichtbeton von einem sehr geringen Unterhaltsaufwand aus, da höchstens die Rippenplatte durch einen Vandalenakt zerstört werden kann; als Lebensdauer geht der Kanton Aargau von rund 50 Jahren für Ausfachungselemente aus Leichtbeton aus (siehe dazu Kap. 8.3).

Entsprechend werden für die Lärmschutzwand aus Leichtbeton für den Unterhalt keine Aufwendungen bilanziert.

Bei der Herstellung von Klinker als Bestandteil des Zementes werden geogene CO₂-Emissionen aus der Kalzinierung des Kalksteins freigesetzt. Diese werden während der Nutzungsphase in Abhängigkeit der Verwendung des Betons teilweise rückgebunden – der Beton karbonatisiert.

Tabelle 5-8: Abschätzung der Karbonatisierung des Ausfachungselementes aus haufporigem Leichtbeton über 30 Jahre

			Tragschale	Leichtbeton ¹⁾
			CEM II/B	CEM II/B
Karbonatisierungsgrad	a _c	abs	0.5	0.5
Lebensdauer	SL	y	30	30
Dicke der Betonschicht	x	mm	100	
<i>Aussenseite</i>				
Karbonatisierungskoeffizient überdeckt	K _{N,bewittert}	abs	6.63	
Karbonatisierungstiefe Oberseite	dc (OS)	mm	36.3	
<i>Innenseite</i>				
Karbonatisierungskoeffizient unbewittert	K _{N,unbewittert}	abs	3.12	
Karbonatisierungstiefe Unterseite	dc (US)	mm	17.1	
Karbonatisierungstiefe gesamt	dc (tot)	mm	53.4	
Anteil Rückbindung geogene Emissionen			26.7%	50.0%
Emissionen		kg CO ₂ /kg Zement	0.357	0.357
Zementgehalt		kg	372.0	122.4
Karbonatisierung über Lebensdauer		kg CO ₂	35.4	21.8
			57.3	

¹⁾ aufgrund der Haufporigkeit maximale Karbonatisierung von 50 %

Die Karbonatisierung der Lärmschutzwand aus Leichtbeton wird für die Tragschale und die Rippenplatte beruhend auf der Methodik von Leemann et al. (2018) getrennt über 30 Jahre als Minimalanforderung des ASTRAs berechnet – der Einfluss längerer Lebensdauern wird in Kap. 8.3 im Sinne einer Sensitivitätsanalyse abgeschätzt. Für die Tragschale wird von einer bewitterten und einer unbewitterten Seite ausgegangen; für die Rippenplatte wird angenommen, dass aufgrund der Haufporigkeit der (hypothetische) Karbonatisierungsgrad von 0.5 ausgeschöpft wird (Tabelle 5-8).

Die Modellierung der Nutzungsphase, i.e. die Karbonatisierung über die Lebensdauer von 30 Jahren ist in Tabelle 5-9 dokumentiert.

Tabelle 5-9: Modellierung des Unterhalts des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) bzw. der Karbonatisierung des Betons über die Nutzungsdauer in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Nutzung 4 m x 3 m
Outputs: Emissionen in die Luft			
Karbonatisierung während Nutzung (30 Jahre)	-57.3	kg	Carbon dioxide, fossil

5.5 Rückbau

Für den Transport der Lärmschutzwand zu einer Baustoffaufbereitung bzw. einer KVA (für die Kunststoffteile) wird als Annahme mit einer Transportdistanz von 100 km mit der für die Schweiz repräsentativen LKW-Flotte gerechnet.

Es wird weiter angenommen, dass die Fixierschrauben dem Metallrecycling zugeführt werden und somit den Bilanzraum verlassen.

Der Energieaufwand für den eigentlichen Ausbau wird als Vergleich zum Rücktransport der Lärmschutzwand als nicht signifikant eingeschätzt und vernachlässigt.

Die Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) zu deren Entsorgung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b) ist in Tabelle 5-10 dokumentiert.

Tabelle 5-10: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes aus Leichtbeton (4 m x 3 m) von der Baustelle zu deren Entsorgung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			Products
	1	p	LSW Beton Rückbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport der LSW + Hilfsstoffe zu Sortieranlage	416	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH
Outputs: Abfälle zur Behandlung			
Recycling der Cr-Schrauben (cut-off)	0.626	kg	cut-off

5.6 Entsorgung

Als Entsorgungsszenario wird in Übereinstimmung mit der SIA 2032 angenommen, dass 90 % des rückgebauten Betons als Mischabbruch rezykliert und 10 % deponiert werden. Die Dichtungsbahnen, Kunststoffkappen und die PE-Platten werden in einer KVA entsorgt (Tabelle 5-11).

Tabelle 5-11: Modellierung der Entsorgung des Ausfachungselementes aus Leichtbeton (4 m x 3 m) über eine Betonsortierung bzw. einer KVA in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Entsorgung 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Stromverbrauch für Brecher ¹⁾	15.4	kWh	electricity, low voltage, at grid/kWh/CH
Infrastruktur für Sortieranlage ¹⁾	4.16E-07	p	Sorting plant for construction waste/CH/l
Transport der Betonreste auf Deponie	6.16	tkm	Transport, lorry >28t, fleet average/CH
Outputs: Abfälle zur Behandlung			
Entsorgung Dichtbänder in KVA	4.7	kg	disposal, rubber, unspecified, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung PE-Platten in KVA	0.772	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Polyamid in KVA	0.0802	kg	disposal, polystyrene, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung von 10 % Beton in Deponie	432	kg	Disposal, concrete, 5% water, to inert material landfill/CH
Recycling des Armierungsstahls	54	kg	Recycling steel and iron/RER (leerer Prozess)
Recycling von 90 % des Betons	3580	kg	Recycling concrete/RER (leerer Prozess)

¹⁾ Wert für den Betrieb einer Sortieranlage aus dem ecoinvent DS „Disposal, building, concrete, not reinforced, to sorting plant/CH U“

Bei der Modellierung des Betonrecyclings wird auf eine Allokation der Aufwendungen auf die Entsorgungsfunktion, das rückgewonnene Mischgranulat und das rückgewonnene Armierungseisen verzichtet, damit potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze konsistent berücksichtigt werden können. Eine ökonomische Allokation würde nicht zu einer signifikanten Veränderung des Beitrags des Entsorgungsprozesses führen, da die Entsorgungsfunktion bei Mischgranulat den Grossteil der Umweltlasten übernehmen würde (Tschümerlin & Frischknecht 2016).

5.7 Potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze

In den folgenden Prozessen werden in Anlehnung an das Konzept des „Modul D“ nach EN 15804 potenzielle Belastungen und Vorteile ausserhalb der Systemgrenze bilanziert, wie sie sich z.B. aus dem Recycling von Primärmaterial oder durch eine Energierückgewinnung aus Abfällen ergeben können.

Im Rahmen des hier bilanzierten Produktsystems werden folgende Flüsse betrachtet, die das Produktsystem am Ende des Lebenszyklus verlassen:

- Mischgranulat aus dem rezyklierten Anteil des Ausfachungselementes als Mischabbruch
- Recycling des Armierungsstahls
- Strom und Wärme aus der energetischen Nutzung der Hilfsmaterialien aus Kunststoff

Für das rückgewonnene Mischgranulat wird angenommen, dass es im Strassenbau Rundkies ersetzt.

Da der Armierungsstahl zu 100 % aus Recyclingschrott hergestellt wird, ergibt sich bei der Nettobetrachtung der Schrottmengen über den Lebenszyklus aus der Kompensation der Umschmelzverluste ein Input von rund 10 % Roheisen und eine rechnerische Vermeidung des Umschmelzens derselben Menge (Tabelle 5-12)³.

Tabelle 5-12: Modellierung der Belastungen und Vorteile aus dem Betonrecycling und der Energierückgewinnung aus der Entsorgung eines Ausfachungselementes aus Leichtbeton (4 m x 3 m) in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Potenzial im EoL 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Substitut: Wärme aus Erdgas	-58.1	MJ	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Substitut: Strom ab Netz	-8.3	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Substitut: Rundkies	-3580	kg	Gravel, round, at mine/CH
Umschmelzen der Nettomenge des Schrottes	(-4.8)	kg	EPD Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER
Substitut: Roheisen	-(-4.8)	kg	Pig iron, at plant/GLO U

In Tabelle 5-13 ist die Herleitung des unteren Heizwertes für die Hilfsmaterialien aus Kunststoff am Ende des Lebenszyklus dargestellt; die Mengen entsprechen den eingebauten Mengen, wie sie in Tabelle 5-7 dokumentiert sind. Weiter wird die rückgewinnbare Energie als Strom und Wärme abgeschätzt, wobei die Effizienz einer KVA zugrunde gelegt ist, wie sie in ecoinvent 3.3 dokumentiert ist.

Tabelle 5-13: Berechnung des unteren Heizwertes der in der KVA zu entsorgenden Lärmschutzwand aus Leichtbeton (4 m x 3 m) und der rückgewinnbaren Energie (Effizienz der KVA gemäss ecoinvent 3.3)

	kg	MJ/kg	MJ
Gummi	4.70	40.3	189.4
Polyamid	0.0800	31.0	2.5
HDPE	0.768	43.9	33.7
Total	5.55	115.2	225.6
	Effizienz Energierückgewinnung		39%
	wovon Wärme		66%
	wovon Strom		34%
	Wärme	MJ/m ³	58.1
	Strom	MJ/m ³	29.9
		kWh/m ³	8.3

Als möglicher Nutzen aus der rückgewonnenen Energie wird angenommen, dass der rückgewonnene Strom den Bezug von Strom ab Netz in der Schweiz und die rückgewonnene Wärme eine moderne industrielle Gasfeuerung substituieren (Tabelle 5-13).

Der potenzielle Nutzen aus dem Recycling des Cr-Stahls vernachlässigt.

³ Die Frage, ob auch „negative“ Nettooutputmengen in Modul D verrechnet werden sollen, wird im Rahmen von CEN TC 350 kontrovers diskutiert – der Einfluss dieser Setzung auf den UBP-Wert des Recyclingpotenzials liegt bei < 1%. Beim GWP verdoppelt sich der negative Wert des Recyclingpotenzials auf rund -14 kg CO₂-eq., was angesichts des Totals über den gesamten Lebenszyklus von rund 900 kg CO₂-Äq. keinen signifikanten Einfluss auf die Schlussfolgerungen hat.

6 Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung

6.1 Resultate für das Ausfachungselement aus Holz

Die folgenden Tabellen 6-1 bis 6-3 fassen die Resultate der Berechnungen für die Indikatoren Primärenergie, Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte UBP 2013 für den Lebenszyklus des Ausfachungselementes aus Holz zusammen.

Tabelle 6-1: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Holz (4 m x 3 m): Primärenergie

LSW Holz 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recycling-potenzial
	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Non renewable, fossil	1969.3	125.4	230.5	125.4	84.8	2535.4	-2527.6
Non-renewable, nuclear	631.1	6.8	65.0	6.8	5.3	715.0	-2066.5
Non-renewable, biomass	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Renewable, biomass	6502.3	0.2	650.3	0.2	0.4	7153.5	-19.5
Renewable, wind, solar, geothe	11.1	0.1	1.2	0.1	0.2	12.7	-17.1
Renewable, water	177.0	1.5	18.1	1.5	1.4	199.5	-430.2
CED nicht erneuerbar	2600.3	132.2	295.5	132.2	90.2	3250.3	-4594.1
CED erneuerbar	6690.4	1.8	669.6	1.8	2.0	7365.7	-466.8
CED total	9290.7	134.0	965.1	134.0	92.2	10616.0	-5060.9
davon Energiegehalt des Holzes	6565.3						

Tabelle 6-2: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Holz (4 m x 3 m): Treibhausgasemissionen

LSW Holz 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recycling-potenzial
	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.
Treibhauspotenzial	129.5	8.0	16.0	8.0	14.9	176.4	-158.4

Tabelle 6-3: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Holz (4 m x 3 m): Umweltbelastungspunkte

LSW Holz 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recycling-potenzial
	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Water resources	6.80E+02	2.81E+00	7.04E+01	2.81E+00	1.88E+01	7.75E+02	-1.56E+02
Energy resources	1.63E+04	4.61E+02	1.75E+03	4.61E+02	3.11E+02	1.92E+04	-1.61E+04
Mineral resources	2.26E+04	3.33E+02	2.36E+03	3.33E+02	3.34E+02	2.60E+04	-5.23E+02
Land use	6.19E+04	2.51E+01	6.20E+03	2.51E+01	2.80E+01	6.81E+04	-7.20E+01
Global warming	5.94E+04	3.68E+03	7.36E+03	3.68E+03	6.92E+03	8.10E+04	-7.23E+04
Ozone layer depletion	1.21E+02	2.42E+00	1.29E+01	2.42E+00	2.70E+00	1.42E+02	-1.75E+02
Main air pollutants and PM	9.07E+04	3.54E+03	1.02E+04	3.54E+03	4.06E+03	1.12E+05	-9.58E+03
Carcinogenic substances into air	2.25E+04	1.92E+02	2.54E+03	1.92E+02	2.50E+03	2.80E+04	-1.32E+03
Heavy metals into air	3.49E+05	2.76E+02	3.50E+04	2.76E+02	1.14E+03	3.85E+05	-2.78E+03
Water pollutants	7.78E+03	4.92E+02	1.03E+03	4.92E+02	1.50E+03	1.13E+04	-1.10E+03
POP into water	7.31E+03	2.22E+02	7.80E+02	2.22E+02	5.00E+01	8.58E+03	-9.05E+01
Heavy metals into water	3.19E+04	6.06E+02	4.64E+05	6.06E+02	2.16E+03	4.99E+05	-4.47E+03
Pesticides into soil	3.13E+02	1.31E-01	3.13E+01	1.31E-01	3.20E-02	3.44E+02	-3.91E-01
Heavy metals into soil	8.05E+02	1.29E+02	1.07E+02	1.29E+02	1.00E+01	1.18E+03	-2.82E+02
Radioactive substances into air	5.19E-03	5.86E-05	5.35E-04	5.86E-05	4.39E-05	5.88E-03	-1.88E-02
Radioactive substances into water	4.59E+02	5.20E+00	4.75E+01	5.20E+00	4.86E+00	5.22E+02	-1.38E+03
Noise	4.08E+03	1.54E+03	7.29E+02	1.54E+03	1.30E+02	8.02E+03	-1.17E+02
Non radioactive waste to deposit	1.07E+03	7.97E+00	5.17E+02	7.97E+00	4.09E+03	5.69E+03	-6.84E+01
Radioactive waste to deposit	1.64E+04	1.85E+02	1.69E+03	1.85E+02	1.60E+02	1.86E+04	-5.31E+04
Total	6.93E+05	1.17E+04	5.34E+05	1.17E+04	2.34E+04	1.27E+06	-1.64E+05

Die Hot spot-Analyse basierte auf einer detaillierten Betrachtung der Umweltbelastungspunkte UBP 2013 für die Herstellung der Ausfachungselemente. Für die Lärmschutzwand aus Holz sind die Ergebnisse in Tabelle 6-4 zusammengestellt.

Tabelle 6-4: Ergebnisse der Ökobilanz für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz (4 m x 3 m): Umweltbelastungspunkte

	Sägeware	Imprägnierung	Steinwolle	Kupferabdeckung	Cr-Schrauben	Transporte	andere
	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Water resources	3.06E+01	4.33E+01	1.90E+01	5.13E+02	7.95E+00	2.97E+00	6.32E+01
Energy resources	9.05E+03	9.83E+02	1.30E+03	1.32E+03	5.02E+02	4.90E+02	2.60E+03
Mineral resources	2.30E+03	1.07E+03	1.79E+02	1.29E+04	4.89E+03	3.44E+02	9.38E+02
Land use	6.10E+04	8.96E+01	9.10E+01	4.67E+02	5.23E+01	2.43E+01	1.95E+02
Global warming	1.32E+04	7.06E+03	9.88E+03	1.09E+04	4.51E+03	3.91E+03	9.83E+03
Ozone layer depletion	1.18E+01	4.64E+01	5.73E+00	1.04E+01	1.92E+00	2.01E+00	4.30E+01
Main air pollutants and PM	1.39E+04	4.56E+03	6.42E+03	5.01E+04	6.70E+03	3.62E+03	5.30E+03
Carcinogenic substances into air	8.04E+02	6.89E+03	1.10E+03	8.34E+03	1.54E+03	2.59E+02	3.58E+03
Heavy metals into air	1.18E+03	1.54E+04	1.15E+03	3.25E+05	3.24E+03	3.30E+02	2.34E+03
Water pollutants	2.92E+03	1.44E+03	3.85E+02	1.65E+03	1.84E+02	5.86E+02	6.06E+02
POP into water	7.02E+02	5.84E+03	5.83E+01	2.10E+02	3.21E+01	2.36E+02	2.22E+02
Heavy metals into water	2.03E+03	2.38E+04	3.89E+02	1.63E+03	1.82E+03	6.20E+02	1.58E+03
Pesticides into soil	3.10E+02	3.32E-01	4.20E-01	1.95E+00	5.23E-02	1.36E-01	1.70E-01
Heavy metals into soil	5.48E+02	3.04E+01	2.07E+01	4.62E+01	5.25E+00	1.06E+02	4.51E+01
Radioactive substances into air	1.19E-03	6.01E-04	4.90E-04	5.80E-04	1.43E-04	5.71E-05	2.13E-03
Radioactive substances into wat.	9.11E+01	6.17E+01	4.04E+01	7.57E+01	1.87E+01	5.20E+00	1.66E+02
Noise	2.09E+03	1.73E+02	1.81E+02	1.89E+02	4.83E+01	1.21E+03	1.57E+02
Non radioactive waste to deposit	3.44E+01	4.05E+01	2.15E+01	1.90E+02	1.88E+02	9.23E+00	5.82E+02
Radioactive waste to deposit	3.44E+03	2.09E+03	1.48E+03	2.37E+03	5.85E+02	1.83E+02	6.23E+03
Total	1.14E+05	6.96E+04	2.27E+04	4.16E+05	2.43E+04	1.19E+04	3.45E+04

6.2 Resultate für das Ausfachungselement aus Beton

Die Ergebnisse der Ökobilanz für die Indikatoren Primärenergie, Treibhausgasemissionen und Umweltbelastungspunkte UBP 2013 über den Lebenszyklus des Ausfachungselementes aus Beton sind in den Tabellen 6-5 bis 6-7 zusammengestellt.

Die Ergebnisse der Berechnung der Umweltbelastungspunkte für die Herstellung der Lärmschutzwand aus Holz als Grundlage für die Hot spot-Analyse sind in Tabelle 6-8 zusammengestellt.

Tabelle 6-5: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Beton (4 m x 3 m): Primärenergie

LSW Beton 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recyclingpotenzial
	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ	MJ
Non renewable, fossil	7659.5	1766.9	0.0	1258.8	118.2	10803	-115.1
Non-renewable, nuclear	1078.1	117.7	0.0	68.2	124.1	1388	-143.5
Non-renewable, biomass	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0
Renewable, biomass	146.4	9.0	0.0	2.5	1.3	159	-2.0
Renewable, wind, solar, geother	22.7	2.9	0.0	1.2	1.0	28	-1.5
Renewable, water	277.4	30.3	0.0	14.7	25.8	348	-30.1
CED nicht erneuerbar	8737.6	1884.6	0.0	1326.9	242.2	12191	-258.6
CED erneuerbar	446.5	42.2	0.0	18.5	28.1	535	-33.6
CED total	9184.1	1926.8	0.0	1345.4	270.3	12726.7	-292.2

Tabelle 6-6: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Beton (4 m x 3 m): Treibhausgasemissionen

Beton 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recyclingpotenzial
	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.	kg CO ₂ -eq.
Treibhauspotenzial	749.1	100.3	-57.3	80.6	23.0	895.7	-7.4

Tabelle 6-7: Ergebnisse der Ökobilanz für das Ausfachungselement aus Beton (4 m x 3 m): Umweltbelastungspunkte

LSW Beton 4 m x 3 m	Herstellung	Einbau	Nutzung	Rückbau	Entsorgung	Total Lebenszyklus	Recyclingpotenzial
	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP	UBP
Water resources	4.97E+02	9.71E+01	0.00E+00	2.82E+01	1.57E+01	6.37E+02	-3.14E+02
Energy resources	3.02E+04	6.58E+03	0.00E+00	4.63E+03	8.59E+02	4.22E+04	-9.19E+02
Mineral resources	7.94E+04	5.76E+03	0.00E+00	3.35E+03	1.59E+03	9.00E+04	-1.12E+05
Land use	2.15E+03	3.12E+02	0.00E+00	2.52E+02	2.41E+02	2.96E+03	-3.21E+03
Global warming	3.44E+05	4.59E+04	2.64E+04	3.69E+04	1.06E+04	4.11E+05	-3.42E+03
Ozone layer depletion	9.80E+01	2.75E+01	0.00E+00	2.43E+01	8.13E+00	1.58E+02	-1.16E+01
Main air pollutants and PM	1.56E+05	4.11E+04	0.00E+00	3.55E+04	2.40E+03	2.35E+05	-1.19E+03
Carcinogenic substances into air	3.46E+04	3.03E+03	0.00E+00	1.93E+03	1.61E+02	3.97E+04	6.62E+02
Heavy metals into air	1.10E+05	5.98E+03	0.00E+00	2.77E+03	8.43E+02	1.20E+05	-3.52E+03
Water pollutants	3.44E+04	5.55E+03	0.00E+00	4.94E+03	4.00E+02	4.53E+04	-5.46E+02
POP into water	1.13E+04	2.67E+03	0.00E+00	2.22E+03	1.74E+02	1.64E+04	-1.72E+02
Heavy metals into water	7.24E+04	7.41E+03	0.00E+00	6.08E+03	3.84E+02	8.63E+04	-4.86E+03
Pesticides into soil	1.20E+01	1.47E+00	0.00E+00	1.32E+00	6.38E-02	1.48E+01	-6.29E-02
Heavy metals into soil	7.91E+02	1.32E+03	0.00E+00	1.29E+03	4.64E+01	3.45E+03	-2.46E+01
Radioactive substances into air	9.23E-03	8.86E-04	0.00E+00	5.88E-04	1.12E-03	1.18E-02	-1.29E-03
Radioactive substances into wat.	8.79E+02	9.11E+01	0.00E+00	5.22E+01	8.30E+01	1.11E+03	-9.90E+01
Noise	1.02E+04	1.57E+04	0.00E+00	1.55E+04	3.69E+02	4.17E+04	-2.23E+01
Non radioactive waste to deposit	5.77E+02	1.75E+02	0.00E+00	8.00E+01	1.25E+02	9.57E+02	2.46E+01
Radioactive waste to deposit	3.04E+04	3.07E+03	0.00E+00	1.86E+03	3.19E+03	3.85E+04	-3.74E+03
Total	9.18E+05	1.45E+05	-2.64E+04	1.17E+05	2.15E+04	1.18E+06	-1.33E+05

Tabelle 6-8: Ergebnisse der Ökobilanz für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton (4 m x 3 m): Umweltbelastungspunkte

	Beton Tragschale	Armierung	Rippenplatte	Transporte
	UBP	UBP	UBP	UBP
Water resources	3.04E+02	4.72E+01	1.40E+02	2.33E+00
Energy resources	5.40E+03	2.12E+03	2.21E+04	3.51E+02
Mineral resources	7.40E+04	5.29E+02	4.31E+03	2.98E+02
Land use	5.95E+02	1.15E+02	1.38E+03	1.70E+01
Global warming	1.04E+05	1.49E+04	2.22E+05	2.72E+03
Ozone layer depletion	3.32E+01	1.11E+01	5.10E+01	1.85E+00
Main air pollutants and PM	3.08E+04	1.00E+04	1.12E+05	2.49E+03
Carcinogenic substances into air	2.02E+03	1.90E+04	1.32E+04	1.65E+02
Heavy metals into air	5.94E+03	3.29E+04	7.08E+04	2.33E+02
Water pollutants	2.44E+03	7.28E+02	3.08E+04	3.65E+02
POP into water	8.66E+02	1.82E+02	1.01E+04	1.66E+02
Heavy metals into water	3.19E+03	5.14E+04	1.72E+04	4.49E+02
Pesticides into soil	6.69E-01	2.01E-01	1.10E+01	9.97E-02
Heavy metals into soil	2.02E+02	6.41E+01	4.38E+02	8.09E+01
Radioactive substances into air	4.59E-03	9.61E-04	3.34E-03	4.28E-05
Radioactive substances into water	3.61E+02	1.25E+02	3.55E+02	3.89E+00
Noise	3.38E+03	6.10E+02	3.87E+03	9.65E+02
Non radioactive waste to deposit	9.12E+01	2.24E+02	2.48E+02	7.21E+00
Radioactive waste to deposit	1.34E+04	3.92E+03	1.19E+04	1.37E+02
Total	2.47E+05	1.37E+05	5.21E+05	8.46E+03

7 Interpretation

7.1 Hot spot-Analyse: Herstellung des Ausfachungselementes aus Holz

Die Hot spot-Analyse dient zur Identifizierung von Materialien und Prozessen, die wesentlich zur Umweltwirkung des untersuchten Produktes beitragen.

In Tabelle 7-1 sind die wesentlichen Beiträge der Materialien und Prozesse für die Herstellung des Ausfachungselementes einer Lärmschutzwand aus Holz für die Umweltbelastungspunkte 2013 ausgewertet.

Als wesentlicher Treiber für das bilanzierte Ausfachungselement aus Holz stellt sich die Kupferabdeckung mit einem Gesamtbeitrag von 60 % am Total der UBP 2013 der Herstellung heraus. Relevant sind dabei vor allem die Unterkategorien „Schwermetallemissionen“ während der Gewinnung und Aufbereitung in die Luft (47 % des Totals) sowie weitere „Luftemissionen“ (7 %).

Als zweitwichtigster Treiber stellt sich die Sägeware heraus, mit einem Beitrag von 16 % zum Total der UBP 2013 der Herstellung; für die Sägeware schlägt vor allem die Unterkategorie „Landbelegung“ mit 9 % zu Buche; weiter relevant sind die Kupferemissionen während der Gewinnung des Kupfers und aus der Verarbeitung des Kupfers zum eingesetzten Holzschutzmittel (5%).

Tabelle 7-1: Relative Beiträge der Materialien und Prozesse zur Herstellung des Ausfachungselementes einer Lärmschutzwand aus Holz zu den Unterkategorien der Umweltbelastungspunkte UBP 2013 (rot: Beträge über 2 %)

	Sägeware	Imprägnierung	Steinwolle	Kupferabdeckung	Cr-Schrauben	Transporte	andere
Water resources	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Energy resources	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Mineral resources	0%	0%	0%	2%	1%	0%	0%
Land use	9%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Global warming	2%	1%	1%	2%	1%	1%	1%
Ozone layer depletion	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Main air pollutants and PM	2%	1%	1%	7%	1%	1%	1%
Carcinogenic substances into air	0%	1%	0%	1%	0%	0%	1%
Heavy metals into air	0%	2%	0%	47%	0%	0%	0%
Water pollutants	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
POP into water	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
Heavy metals into water	0%	3%	0%	0%	0%	0%	0%
Pesticides into soil	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Heavy metals into soil	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Radioactive substances into air	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Radioactive substances into water	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Noise	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Non-radioactive waste to deposit	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Radioactive waste to deposit	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Total	16%	10%	3%	60%	4%	2%	5%

Die Steinwolle und die Schrauben/Grundplatte aus Chromstahl tragen 3 % bzw. 4% zum Total der UBP 2013 der Herstellung bei.

Der Beitrag aller übrigen Materialien und Prozesse sowie der Transporte liegt individuell jeweils unter 2 %, in der Summe bei rund 7 %.

Für die Optimierung des Ausfachungselementes aus Holz drängt sich somit in erster Linie die Verwendung eines anderen Materials für die Abdeckung auf.

Weitere Möglichkeiten bestehen im Verbau von längeren Ausfachungselementen, um den Aufwand für die Fundamente und Stützen über die verbaute Länge zu reduzieren (im Rahmen dieser Studie nicht untersucht) sowie im Grundsatz jede Massnahme, die zur Verlängerung der Lebensdauer des Elementes führt (s. dazu Kap. 8.3).

7.2 Hot spot-Analyse: Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton

In Tabelle 7-2 sind die wesentlichen Beiträge der Materialien und Prozesse für die Herstellung des Ausfachungselementes einer Lärmschutzwand aus Beton für die Umweltbelastungspunkte 2013 ausgewertet.

Tabelle 7-2: Relative Beiträge der Materialien und Prozesse zur Herstellung des Ausfachungselementes einer Lärmschutzwand aus Beton zu den Unterkategorien der Umweltbelastungspunkte UBP 2013 (rot: Beiträge über 2 %)

	Beton Tragschale	Armierung	Rippenplatte	Transporte
Water resources	0%	0%	0%	0%
Energy resources	1%	0%	2%	0%
Mineral resources	8%	0%	0%	0%
Land use	0%	0%	0%	0%
Global warming	11%	2%	24%	0%
Ozone layer depletion	0%	0%	0%	0%
Main air pollutants and PM	3%	1%	12%	0%
Carcinogenic substances into air	0%	2%	1%	0%
Heavy metals into air	1%	4%	8%	0%
Water pollutants	0%	0%	3%	0%
POP into water	0%	0%	1%	0%
Heavy metals into water	0%	6%	2%	0%
Pesticides into soil	0%	0%	0%	0%
Heavy metals into soil	0%	0%	0%	0%
Radioactive substances into air	0%	0%	0%	0%
Radioactive substances into water	0%	0%	0%	0%
Noise	0%	0%	0%	0%
Non radioactive waste to deposit	0%	0%	0%	0%
Radioactive waste to deposit	1%	0%	1%	0%
Total	27%	15%	57%	1%

Der wesentlichste Beitrag zum Total der UBP 2013 aus der Herstellung stammt aus der Herstellung der Rippenplatte mit einem Beitrag von 57 %; als wesentlicher Treiber entpuppt sich der darin verwendete Blähton, wobei die Verbrennung des in der Produktion eingesetzten Schweröls mit rund 40 % zu Buche schlägt, der als Zement eingesetzte CEM I trägt weitere 8 % bei. Die höchsten Beiträge werden somit in den Unterkategorien „Treibhauspotenzial“, verschieden „Emissionen in Luft und Wasser“ aus der Energieerzeugung sowie „Einsatz fossiler energetischer Ressourcen“ verursacht.

Der zweitwichtigste Beitrag stammt aus der Trägerplatte mit rund 27 %, wobei der bilanzierte Zement CEM II/B rund 15 % zum Total beiträgt. Entsprechend stellen die Unterkategorien „Treibhauspotenzial“, die „Emissionen in die Luft“ sowie „Einsatz mineralischer Ressourcen“ die Haupttreiber für dieses Bauteil dar.

In derselben Größenordnung von 15 % liegt der Beitrag des Armierungsstahls, wobei hier insbesondere die Luftemissionen aus dem Umschmelzen des Schrottes relevant sind.

Optimierungspotenzial für die Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton liegt in erster Linie bei der Herstellung des Blähtons, insbesondere bei der Wahl des Brennstoffs bzw. des Herstellers für Blähton – wobei für die Modellierung von den Informationen im entsprechenden ecoinvent Datensatz ausgegangen wurde. Möglicherweise kann auch statt Blähton ein anderer Zuschlagstoff verwendet werden; diese Option konnte nicht mit einem Hersteller von Ausfachungselementen aus Beton diskutiert werden. Zu prüfen wäre auch die Wahl eines ökologischeren Zementes aus der Reihe CEM II oder CEM III.

7.3 Vergleich der Umweltwirkung der untersuchten Ausfachungselemente

In Abbildung 7-1 ist die Entwicklung der Umweltbelastungspunkte über den Lebenszyklus dargestellt, wobei die Säulen jeweils die kumulierte Umweltwirkung inkl. der vorgelagerten Abschnitte des Lebenszyklus enthalten.

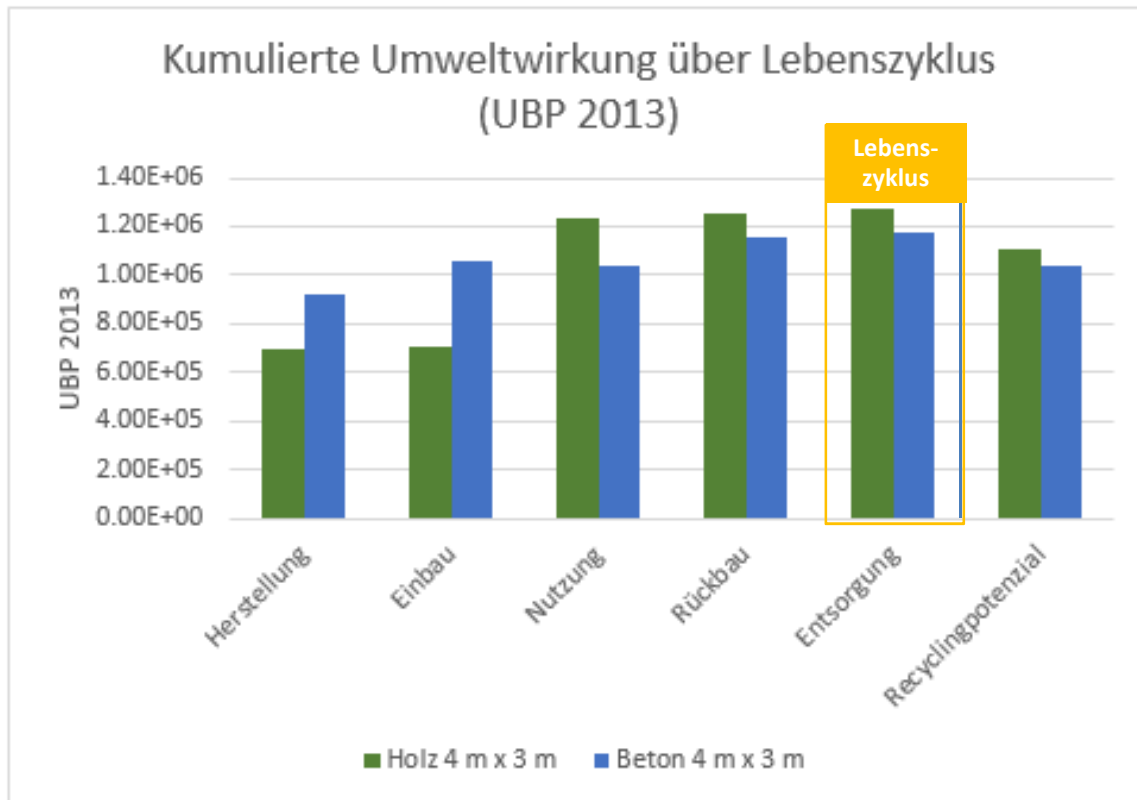


Abbildung 7-1: Kumulierte Umweltwirkung (UBP 2013) für die Ausfachungselemente aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Die Umweltwirkung der Herstellung des Ausfachungselementes aus Beton liegt rund ein Viertel höher als diejenige des Ausfachungselementes aus Holz. Durch das höhere Gewicht des Betonelementes steigt die Umweltwirkung des Betonelements durch den Transport auf die Baustelle („Einbau“) auch stärker an als diejenige der Holzvariante. Während der Nutzungsphase dreht sich die Situation um, wobei die Umweltwirkung der Holzvariante durch die Auswaschung von Kupfer und Bor stark zunimmt und die Umweltwirkung der Betonvariante durch die Karbonatisierung des Zementes etwas abnimmt. Dadurch liegt die Umweltwirkung der Holzvariante nun rund 20 % höher als diejenige der Betonvariante. Der Rückbau ist in Analogie zum Transport auf die Baustelle aufgrund des Gewichtes für die Betonvariante wieder etwas relevanter, die Entsorgung ändert die Verhältnisse nicht mehr wesentlich.

Damit schneidet die Betonvariante unter Annahme gleicher minimaler Nutzungsdauer von 30 Jahren in der Bilanz von der „Wiege bis zur Entsorgung“ um rund 8 % günstiger ab als die Variante aus Holz. Wird das Recyclingpotenzial mit verrechnet, also die Substitution fossiler Brennstoffe durch die energetische Nutzung des Holzes bzw. die Substitution von Rundkies durch die RC-Gesteinskörnung aus der Betonvariante, so liegen die absoluten Werte für beide Varianten um rund 12 % tiefer, die Verhältnisse ändern sich also nicht.

Angesichts der Unsicherheiten bei der Modellierung und bei Ökobilanzdaten im Allgemeinen ist der beobachtete Unterschied der Varianten für die Umweltbelastungspunkte UBP 2013 als nicht signifikant einzustufen.

In Abbildung 7-2 ist in analoger Weise das kumulierte Treibhauspotenzial über den Produktlebenszyklus der beiden Ausfachungselemente dargestellt.

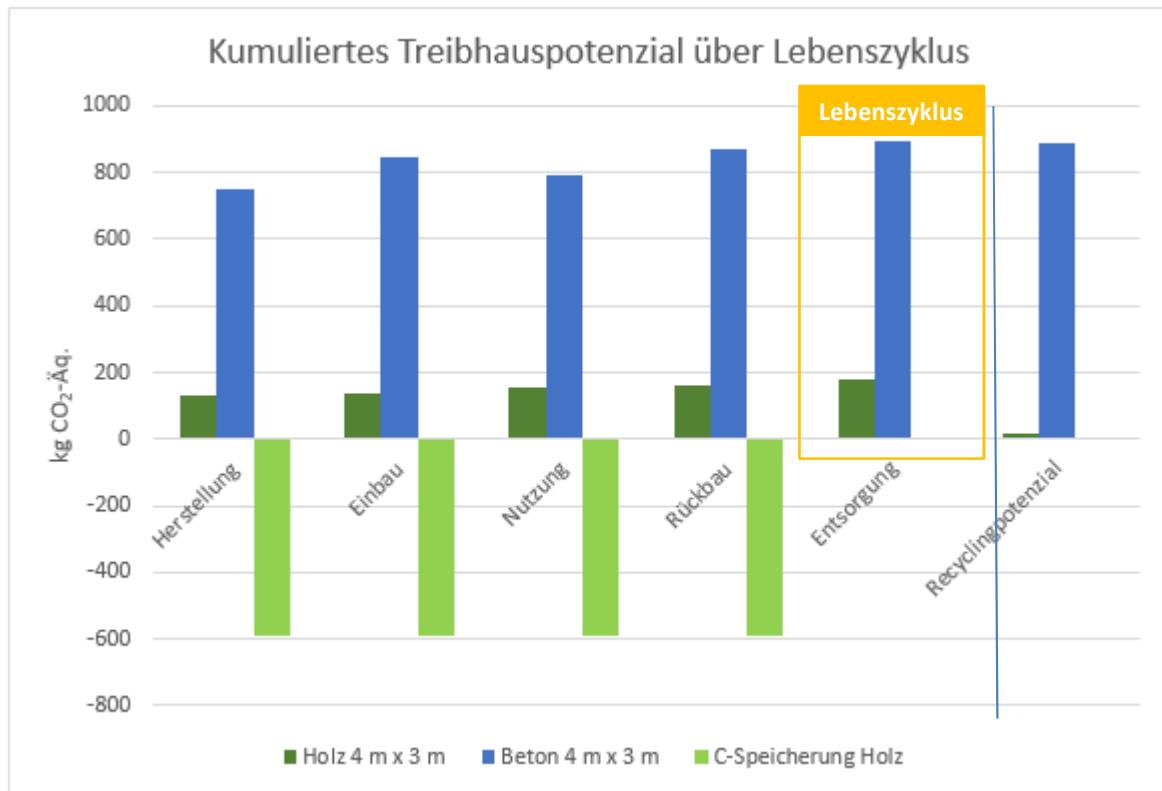


Abbildung 7-2: Kumulierte Treibhausgasemissionen für die Ausfachungselemente aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Beim Treibhausgaspotenzial liegen die kumulierten Werte für die Variante aus Holz über den gesamten Lebenszyklus um ein Mehrfaches unter den Werten der Variante aus Beton. Dies ist im Wesentlichen dem Umstand geschuldet, dass die Herstellung des Klinkers für die Zementvariante sehr CO₂-intensiv ist; ein Teil der geogenen CO₂-Emissionen wird zwar während der Nutzungsphase rückgebunden („karbonatisiert“); über den Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Entsorgung“ ändert sich aber die Treibhausgasbilanz im Vergleich zur Herstellung nur unwesentlich.

Im Falle der Variante aus Holz ist in der Konstruktion rund sechsmal so viel Kohlenstoff in CO₂-Äquivalent gebunden, wie fossile CO₂ Emissionen während der Herstellung freigesetzt werden. Die entsprechende Menge biogenes CO₂ wird bei der thermischen Verwertung des Holzes wieder freigesetzt.

Betrachtet man zusätzlich das Recyclingpotenzial, so kompensieren die eingesparten fossilen CO₂-Emissionen durch die Substitution fossiler Energieträger die über den Lebenszyklus freigesetzten fossilen CO₂-Emissionen fast vollständig. Sowohl für biogenes CO₂ als auch für fossiles CO₂ resultiert also für die Variante aus Holz unter Berücksichtigung der Substitutionswirkung der energetischen Verwertung rechnerisch CO₂-Neutralität.

In Abbildung 7-3 ist in analoger Weise der kumulierte Input an Primärenergie dargestellt, wobei die Primärenergie erneuerbar, Primärenergie nicht erneuerbar und die Summe der beiden Indikatoren als Primärenergie total ausgewiesen werden.

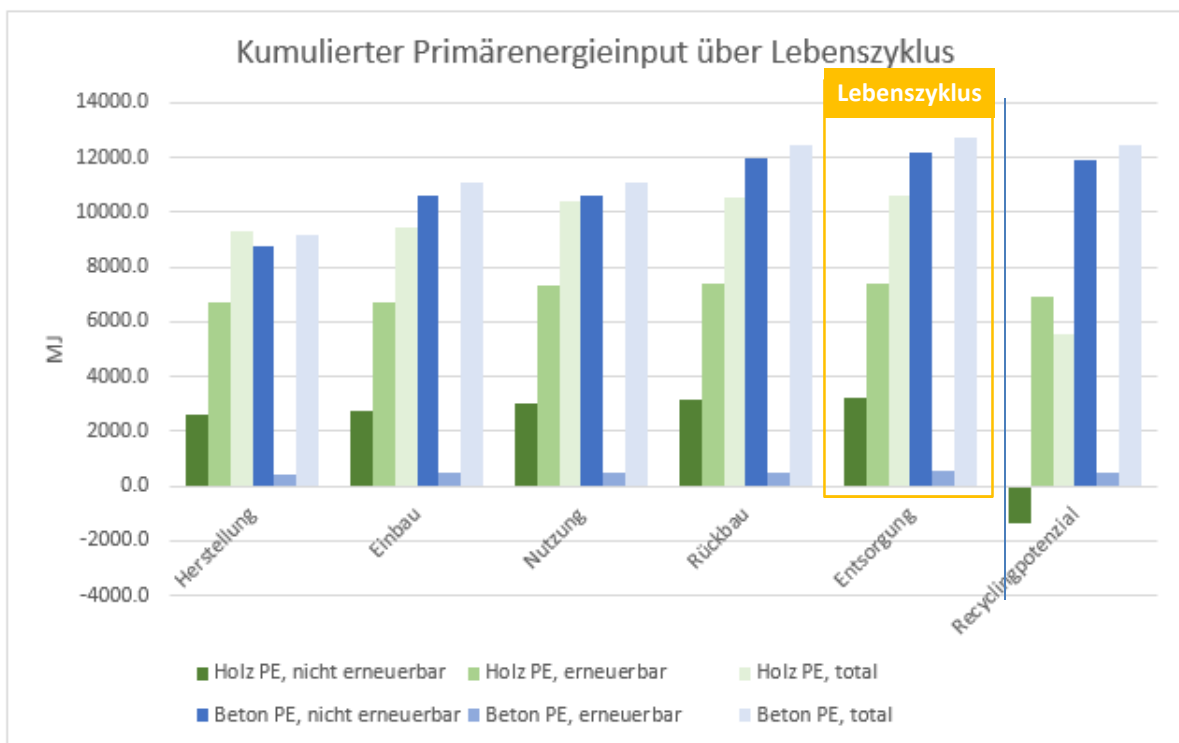


Abbildung 7-3: Kumulierter Primärenergieeinsatz für die Ausfachelemente aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Der totale Primärenergieeinsatz für die Herstellung der beiden Varianten unterscheidet sich kaum; allerdings stammt der Primärenergieeinsatz für die Betonvariante fast vollständig aus dem Einsatz nicht-erneuerbarer Primärenergie, während rund 75 % des Primärenergieeinsatzes der Holzvariante aus erneuerbaren Quellen, namentlich Holz, kommen.

Der Transport auf die Baustelle als „Einbau“ und der Transport zur Entsorgung als „Rückbau“ schlagen sich nur im Primärenergieeinsatz nicht erneuerbar nieder und dabei für die Betonvariante aufgrund des Gewichtes etwas stärker als für die Holzvariante. Aufgrund des angenommenen Unterhaltes für die Holzvariante steigen die kumulierten Werte für die 3 Primärenergieindikatoren um nicht ganz 10 %; für die Variante aus Beton ändert sich die kumulierte Primärenergie während der Nutzungsphase nicht.

Auch durch die Entsorgung der Materialien ändern sich die Verhältnisse nicht mehr grundlegend, so dass der Primärenergieeinsatz total „von der Wiege bis zur Entsorgung“ betrachtet für die Holzvariante um rund 20 % tiefer liegt als für die Betonvariante; dabei liegt der Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie („Graue Energie“) für die Betonvariante um ein Vielfaches über der Variante aus Holz, wobei in der Holzvariante um ein Vielfaches mehr erneuerbare Primärenergie eingesetzt wird.

Durch die Substitutionsüberlegungen ändern sich die Verhältnisse deutlich. Durch die Möglichkeit der Substitution fossiler Energieträger aus der energetischen Nutzung des Holzes liegt der Primärenergieverbrauch total der Holzvariante bei nur mehr rund 40 % der Betonvariante, wobei mehr fossile Energie eingespart werden kann, als über den Lebenszyklus der Holzvariante eingesetzt wird.

Die Werte für die Betonvariante ändern sich durch die Substitutionsüberlegungen kaum, ebenso wenig wie der Einsatz erneuerbarer Energie für die Holzvariante.

8 Sensitivitätsanalysen

Dieses Kapitel umfasst verschiedene Sensitivitätsbetrachtungen. Die Veränderungen im Vergleich zu den in der Basisvariante bilanzierten Prozessen sind in folgenden Tabellen blau hinterlegt.

8.1 Import von Nadelholz aus Sibirien/Russland für Ausfachungselemente aus Holz

Werden Lärmschutzwände nicht aus imprägnierter Fichte/Tanne aus der Schweiz hergestellt, so kann u.U. Lärchenholz Skandinavien oder Russland zum Einsatz kommen.

Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wird angenommen, dass die Sägeware importiert wird. Für den Import des Holzes werden ein zusätzlicher LKW-Transport von 300 km und ein zusätzlicher Bahntransport von 3000 km bilanziert (Tabelle 8-1).

Abbildung 8-1 fasst die Auswirkung der Holzherkunft aus Russland bzw. Skandinavien zusammen.

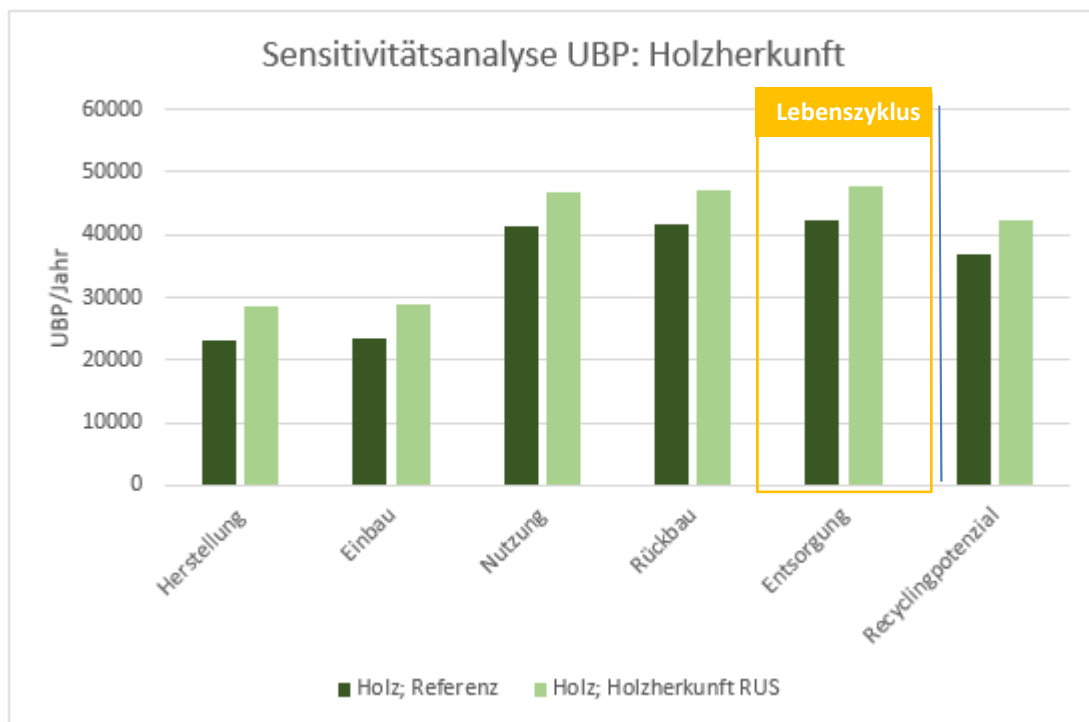


Abbildung 8-1: Sensitivitätsanalyse: Herkunft des Holzes für das Ausfachungselement aus Holz (4 m x 3 m) aus Russland/Skandinavien; die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Durch den Import von Sägeware aus Russland bzw. Skandinavien erhöht sich die Umweltwirkung der Holzvariante als UBP 2013 um rund 25 % im Vergleich zur Verwendung von Schweizer Holz.

Tabelle 8-1: Sensitivitätsanalyse: Verwendung von sibirischer Lärche und Holzbearbeitung ausserhalb der Schweiz (basierend auf Tabelle 4-5).

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkte					
Lärmschutzwand 4 m x 3 m			1	p	LSW Holz Herstellung 4 m x 3 m
Hobelspäne	zur internen Verwendung	m ³ fest	0.173		alloziert (0/100)
Inputs: Materialien/Energie					
Gurte	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.331		
Pfosten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.0827		
			0.360	m ³	sawnwood, beam, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/RER
Schalung	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.449		sawnwood, board, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/RER
Staketen	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.198		
Isotationsleisten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.032		
			0.230	m ³	sawnwood, lath, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Gittergewebe	PE mit PVC-Beschichtung	kg	3.28		
			1.31	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
			1.31	kg	Injection moulding/RER
			1.97	kg	Polyvinylchloride, at regional storage/RER
Isolation	Steinwolle	kg	20.2	kg	Rock wool, at plant/CH
Nägel	Cr-Stahl	kg	1.56		
Grundplatte plus Schrauben	Cr-Stahl	kg	0.650		
			2.21	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
Gurte und Kleinmaterial	Polyamid	kg	0.050	kg	Nylon 6, at plant/RER
Dichtungen	EPDM	kg	2.00	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Metalldach	Kupfer	kg	6.7	kg	Copper, at regional storage/RER
			6.7	kg	Copper product manufacturing, average metal working/RER
Einbringung Holzschutzmittel ¹⁾		kg	3.68	kg	Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration/CH_ohne Emissionen ins Wasser
Stromverbrauch/Hobeln		kWh	28.6	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Infrastruktur/Hobeln		p	6.80E-07	p	Planing mill/RER/I U
Transport LKW international ²⁾		tkm	30.1	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Transport LKW national ²⁾		tkm	25.4	tkm	Transport, lorry >28t, fleet average/CH
Transport LKW zur Abfallbeseitigung		tkm	1.04	tkm	Transport, municipal waste collection, lorry 21t/CH

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Outputs: Abfälle zur Behandlung					
Abfall: Gittergewebe	Entsorgung in KVA	kg	0.156		
			0.0626	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0938	kg	disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Abfall: Steinwolle	Entsorgung in Inertstoffdeponie	kg	0.960	kg	Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH
Restholz, imprägniert	Entsorgung in KVA	m ³ fest	0.103		
			50.7	kg	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0603	kg	disposal, copper, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Szenariobetrachtung: Transporte International					
Transport LKW international		tkm	196	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Transport Bahn international ¹⁾		tkm	1960	tkm	Transport, freight, rail/RER

8.2 Import von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Beton

Als zweite Sensitivitätsbetrachtung wird davon ausgegangen, dass die Lärmschutzwand aus Beton aus Europa importiert wird, wobei ein mittlerer Transportradius von 500 km angesetzt wird.

Dabei wird für die Herstellung der Rippenplatte der Europäische Strommix zugrunde gelegt und die Transporte als Transporte in Europa angenommen.

Tabelle 8-2: Sensitivitätsanalyse: Herstellung des Ausfachungselementes aus Leichtbeton in Europa (basierend auf Tabelle 5-5)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Herstellung 4 m x 3 m (S2)
Inputs: Material/Energie			
Trageschale	1.2	m ³	Beton, Tiefbaubeton CEM II/B 2009-2013_2015
Rippenplatte	1224	kg	Lightweight concrete block, expanded clay, at plant/CH (mit Strommix ENTSO)
EU-Armierungsstahl	48	kg	Reinforcing steel, at plant/RER
EU-Transporte mit LKW	43.5	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
EU-Transport der Betonzusatzmittel mit LKW	1.8	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
EU-Transporte mit Bahn	88.3	tkm	Transport, freight, rail/RER

Aufwendungen für Schalungen, etc. werden vernachlässigt.

Für den Einbau wird angenommen, dass das Ausfachungselement 500 km in ein Zwischenlager in der Schweiz transportiert wird und von dort entsprechend dem allgemeinen Szenario für den Einbau auf die Baustelle gefahren wird.

Tabelle 8-3: Sensitivitätsanalyse: Import des Ausfachungselementes aus Leichtbeton aus Europa (basierend auf Tabelle 5-7)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Einbau 4 m x 3 m (S2)
Inputs: Material/Energie			
Transport der LSW & Hilfsmaterial auf Baustelle	416	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH
EU-Transporte der Hilfsmaterialien in CH	3.08	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
EU-Transporte Import LSW	2080	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER
Dichtungsband, Gummi	4.7	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Herstellung Cr-Schrauben	0.626	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
	0.626	kg	Chromium steel product manufacturing, average metal working/RER
Herstellung PE-Platten	0.768	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
	0.768	kg	Extrusion, plastic pipes/RER
Kunststoffkappen, Polyamid	0.08	kg	Nylon 6, at plant/RER

Da für den Armierungsstahl ein Europäischer Durchschnittswert mit einem Recyclinganteil von 37 % bilanziert ist, errechnet sich die Nettoschrottmenge unter Berücksichtigung von 10 % Schrottinput bei

der Herstellung von Primärstahl mit 24.9 kg, aus denen bei einem Umschmelzverlust von 10 % rund 22.4 kg Sekundäreisen entstehen.

Tabelle 8-4: Sensitivitätsanalyse Verrechnung des Europäische durchschnittlichen Rezyklatanteils beim Armierungsstahl (basierend auf Tabelle 5-12)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Beton Potenzial im EoL 4 m x 3 m (S2)
Inputs: Material/Energie			
Substitut: Wärme aus Erdgas	-58.1	MJ	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Substitut: Strom ab Netz	-8.3	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Substitut: Rundkies	-3580	kg	Gravel, round, at mine/CH
Umschmelzen der Nettomenge des Schrottes	22.4	kg	EPD Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER
Substitut: Roheisen	-22.4	kg	Pig iron, at plant/GLO

Abbildung 8-2 fasst die Auswirkung des Importszenarios für das Ausfachungselement aus Beton zusammen.

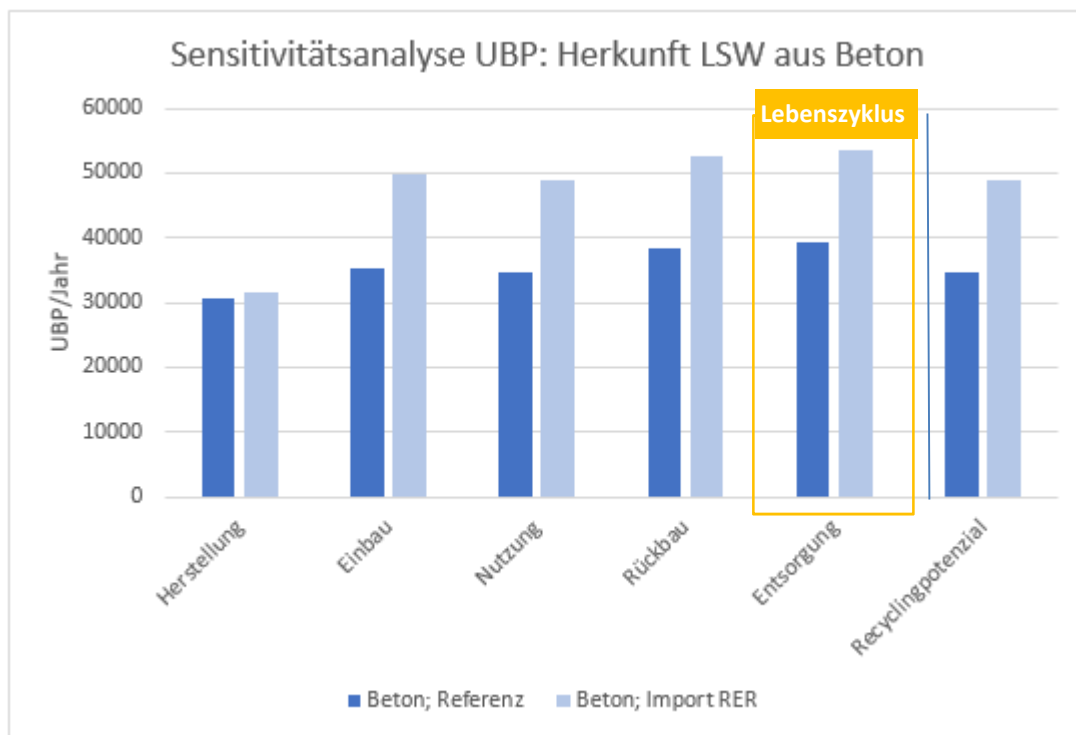


Abbildung 8-2: Sensitivitätsanalyse: Herkunft des Ausfachungselementes aus Beton (4 m x 3 m) unter Annahme eines Importradius von 500 km; die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Durch den Import des Ausfachungselementes mit einem Transportradius von 500 km erhöht sich die Umweltwirkung als UBP 2013 der Betonvariante ebenfalls um rund 1/3 im Vergleich zur Verwendung eines in der Schweiz produzierten Ausfachungselementes aus Beton.

8.3 Lebensdauern

Laut dem Fachhandbuch Trasse/Umwelt (ASTRA 2017) wird für Ausfachungselemente von Lärmschutzwänden eine minimale Nutzungszeit von 30 Jahren ausgeschrieben. Die praktischen Erfahrungen bzw. Erwartungen des ASTRA⁴ bzw. des Tiefbauamtes des Kantons Aargau⁵ gehen für eine dritte Sensitivätsbetrachtung von folgenden Annahmen aus (Tabelle 8-5):

Tabelle 8-5: Nutzungsdauer gemäss Mindestanforderungen des ASTRA (ASTRA 2017) und Erfahrungs- bzw. Erwartungswerte des ASTRA und des Tiefbauamtes Aargau

	Holz	Lavabeton
Nutzungsdauer gemäss Ausschreibung	30 Jahre	30 Jahre
Erfahrungs-/Erwartungswert	40 Jahre	50 Jahre

Die Karbonatisierung des Betons über 50 Jahre wird entsprechend Tabelle 5-9 berechnet und ergibt eine Rückbindung von 64.3 kg/CO₂ über 50 Jahre.

Für die Variante in Holz werden dieselben Auswaschungsraten angenommen, da die Basisvariante bereits auf einer groben Abschätzung beruht.

Abbildung 8-3 fasst die Auswirkung der unterschiedlich angenommenen Lebensdauern als kumulierte Werte über den Produktlebenszyklus zusammen.

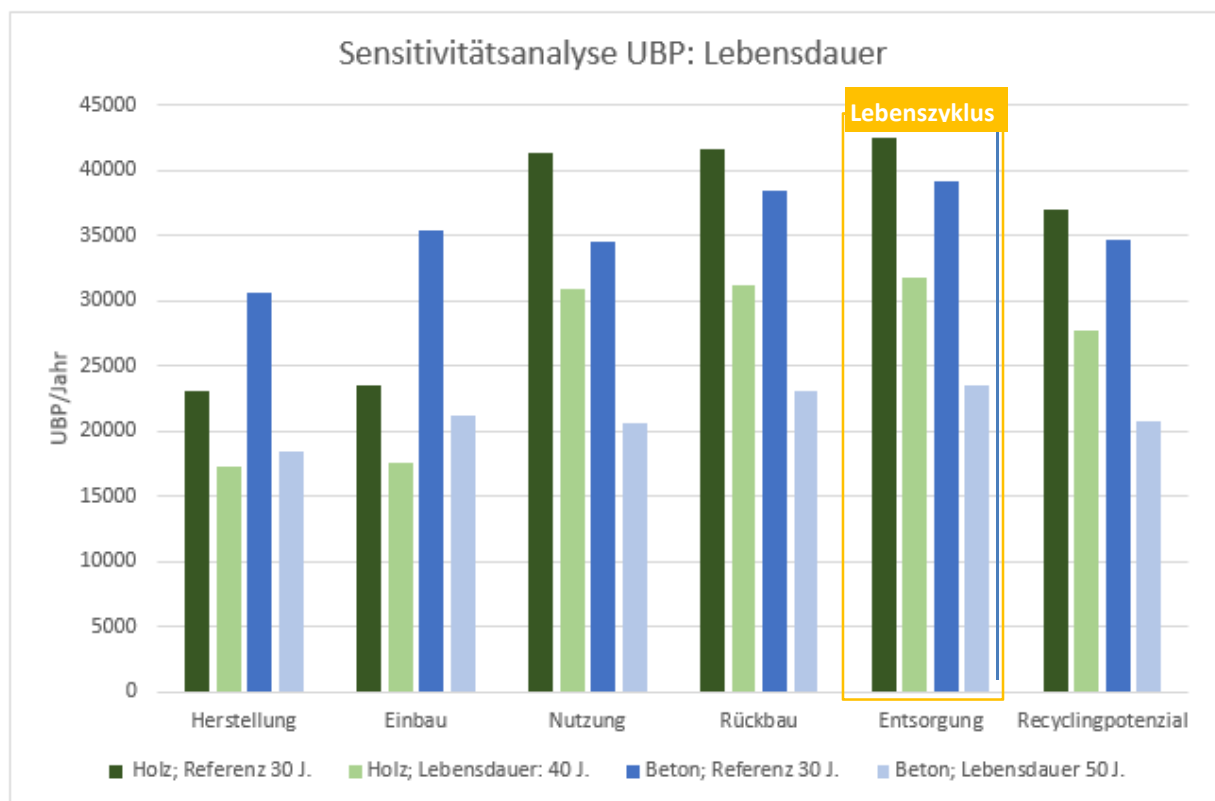


Abbildung 8-3: Sensitivitätsanalyse: Einfluss der angenommenen Lebensdauern (Wert für die Ausschreibung versus Erwartungswerte) für die Lärmschutzwände aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

⁴ persönliche elektronische Mitteilung vom 17.4.2018, Hr. Waeber, Astra

⁵ persönliche elektronische Mitteilung vom 24.4.2018, Hr. Gloor, Tiefbauamt Aargau

Die Annahme unterschiedlicher Lebensdauern hat einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz, da sich in diesem Fall die Ökobilanzergebnisse im Verhältnis der angenommenen Lebensdauern verändern.

Zwar schneidet die Holzvariante in der Herstellung unter Annahme einer Lebensdauer von 40 Jahren im Vergleich zu einer Lebensdauer der Betonvariante von 50 Jahre günstiger ab, so liegen die Umweltwirkungen der Betonvariante unter Annahme einer Lebensdauer von 50 Jahren im Vergleich zur Holzvariante mit angenommenen 30 Jahren tiefer.

Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus „von der Wiege bis zur Entsorgung“, so schneidet die Betonvariante unter Annahme einer Lebensdauer von 50 Jahre rund 25 % günstiger ab als die Holzvariante über 40 Jahre.

Dieses Ergebnis gilt im Grundsatz auch bei einer Berücksichtigung des Recyclingpotenzials.

8.4 Verwendung eines Stahl- statt eines Kupferdaches für die Holzvariante

In dieser Sensitivitätsbetrachtung wird untersucht, wie sich die Umweltkennzahlen für die Holzvariante bei Verwendung eines verzinkten Stahldaches im Vergleich zu einer Abdeckung in Kupfer unterscheiden. Dafür werden bei identischer Abdeckung 6.7 kg Kupferdach durch 7.4 kg verzinktes Stahlblech ersetzt.

Damit ändert sich die Modellierung in den verschiedenen Lebensabschnitten der Holzvariante wie folgt (Tabelle 8-6 bis Tabelle 8-10).

Dabei wird die Transportdistanz für das Stahlblech als gleich wie für das Kupferblech angenommen; ebenso bleiben die Annahmen für den Transport auf die Baustelle und zur Entsorgung sowie der Aufwand für den Unterhalt (festgelegt als Prozentsatz) und das Emissionsverhalten während der Nutzungsphase unverändert.

Tabelle 8-6: Prozessdaten für die Herstellung von Ausfachungselementen für Lärmschutzwände aus Holz (4 m x 3 m) für die Variante mit Stahldach und deren Modellierung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkte					
Lärmschutzwand 4 m x 3 m			1	p	LSW Holz Herstellung 4 m x 3 m
Hobelspäne	zur internen Verwendung	m ³ fest	0.173		alloziert (0/100)
Inputs: Materialien/Energie					
Gurte	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.331		
Pfosten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.0827		
			0.360	m ³	sawnwood, beam, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Schalung	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.449		sawnwood, board, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Staketen	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.198		
Isolationsleisten	Holz Fichte/Tanne	m ³	0.032		
			0.230	m ³	sawnwood, lath, softwood, raw, air dried (u=20%), at sawmill/m3/CH
Gittergewebe	PE mit PVC-Beschichtung	kg	3.28		
			1.31	kg	Polyethylene, HDPE, granulate, at plant/RER
			1.31	kg	Injection moulding/RER
			1.97	kg	Polyvinylchloride, at regional storage/RER
Isolation	Steinwolle	kg	20.2	kg	Rock wool, at plant/CH
Nägel	Cr-Stahl	kg	1.56		
Grundplatte inkl. 8 Schrauben	Cr-Stahl	kg	0.650		
			2.21	kg	Chromium steel 18/8, at plant/RER
Gurte und Kleinmaterial	Polyamid	kg	0.050	kg	Nylon 6, at plant/RER
Dichtungen	EPDM	kg	2.00	kg	Synthetic rubber, at plant/RER
Metalldach	Verzinktes Stahlblech	kg	7.39		
			7.39	kg	Steel, low-alloyed, at plant/RER
			7.39	kg	Hot rolling, steel/RER U
			2.32	m ²	Zinc coating, coils/RER
Einbringung Holzschutzmittel ¹⁾		kg	3.68	kg	Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration/CH_ohne Emissionen ins Wasser
Stromverbrauch/Hobeln		kWh	28.6	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Infrastruktur/Hobeln		p	6.80E-07	p	Planing mill/RER/I U
Transport LKW international ²⁾		tkm	30.4	tkm	Transport, lorry >16t, fleet average/RER

Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Transport LKW national ²⁾		tkm	25.4	tkm	Transport, lorry >28t, fleet average/CH
Transport LKW zur Abfallbeseitigung		tkm	1.04	tkm	Transport, municipal waste collection, lorry 21t/CH
Bestandteil	Material/Anmerkungen	Einheit	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Outputs: Abfälle zur Behandlung					
Abfall: Gittergewebe	Entsorgung in KVA	kg	0.156		
			0.0626	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0938	kg	disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Abfall: Steinwolle	Entsorgung in Inertstoffdeponie	kg	0.960	kg	Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH
Restholz, imprägniert	Entsorgung in KVA	m ³ f.	0.103		
			50.7	kg	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
			0.0603	kg	disposal, copper, 0% water, to municipal incineration/kg/CH

¹⁾ 4 kg (GK3: 3 kg/m³; GK4: 5 kg/m³): die Einbringmenge wird je nach Imprägnierwerk und erwarteten Ansprüchen (z.B. bei Überwachung u.a.m.) für GK3 oder GK 4 gewählt.

²⁾ Grundlagen, s. Tabelle 4-6

Tabelle 8-7: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) aus Holz für die Variante mit Stahlblech auf die Baustelle in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Einbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport auf Baustelle	41.5	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH

Tabelle 8-8: Modellierung des Transports des Ausfachungselementes (4 m x 3 m) aus Holz für die Variante mit Stahlblech von der Baustelle zur Entsorgung in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Rückbau 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Transport zur Entsorgung	41.5	tkm	Transport, lorry 20-28t, fleet average/CH
Cr-Stahl zum Recycling	0.650	kg	cut-off

Tabelle 8-9: Modellierung der Entsorgung eines Ausfachungselementes (4 m x 3 m) aus Holz in der Variante mit Stahldach in einer KVA in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Entsorgung 4 m x 3 m
Outputs: Abfälle zur Behandlung			
Entsorgung Gittergewebe: PE	1.32	kg	disposal, polyethylene, 0.4% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Gittergewebe: PVC	1.97	kg	disposal, polyvinylchloride, 0.2% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Dämmstoff	20.2	kg	Disposal, mineral wool, 0% water, to inert material landfill/CH
Entsorgung Holz	402	kg	disposal, wood untreated, 20% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Holzschutzmittel	0.417	kg	disposal, copper, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Stahlnägel	1.97	kg	disposal, steel, 0% water, to municipal incineration/kg/CH
Entsorgung Stahldach	7.34	kg	cut-off

Für das rezyklierte Stahlblech wird für die Modellierung der Belastungen und Vorteile die Nettoschrottmenge berechnet, die das Produktsystem verlässt. Unter Annahme eines Sekundärmaterialanteils von 37 % im verwendeten Stahl (entsprechend dem verwendeten Datensatz) und Umschmelzverlusten von 10 % errechnet sich eine Nettoschrottmenge von 4.32 kg, die umgeschmolzen 3.89 kg Roheisen ersetzen können.

Tabelle 8-10: Modellierung der Belastungen und Vorteile aus der Energierückgewinnung aus der Entsorgung einer Lärmschutzwand aus Holz (4 m x 3 m) in der Variante mit einem Stahldach in der nachgeführten Version von ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)

Prozess	Menge	Einheit	Datensatz in ecoinvent 2.2 (KBOB 2016b)
Produkt			
	1	p	LSW Holz Potenzial zur Energierückgewinnung im EoL 4 m x 3 m
Inputs: Material/Energie			
Substitut: Wärme aus Erdgas	-1583.6	MJ	Heat, natural gas, at boiler condensing modulating >100kW/RER
Substitut: Strom ab Netz	-223.6	kWh	electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH
Umschmelzen Nettoschrottmenge	3.89	kg	Steel, electric, un- and low-alloyed, at plant/RER U (excl. scrap input)
Substitut: Roheisen	-3.89	kg	Pig iron, at plant/GLO

Im Ergebnis führt die Verwendung eines Stahldaches bei den UBP zu einer deutlichen Reduktion der Umweltwirkungen der Holzvariante um fast 25 % (Abbildung 8-4).

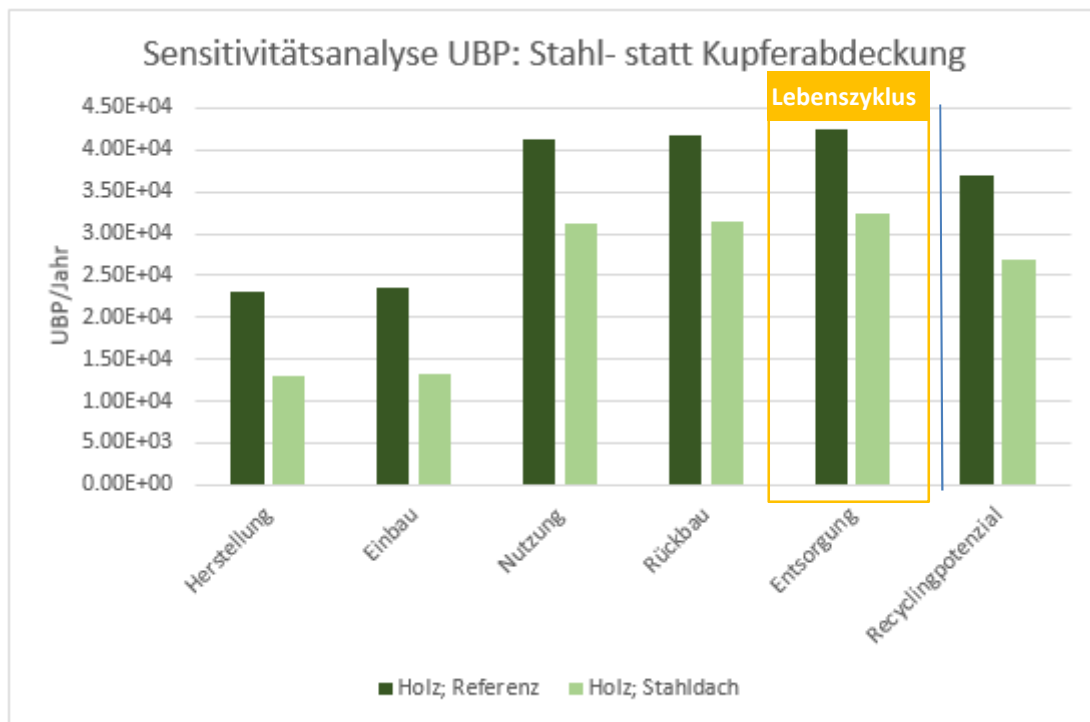


Abbildung 8-4: Sensitivitätsanalyse UBP: Verwendung einer Stahl- statt einer Kupferabdeckung; die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Beim Treibhauspotenzial liegen die Werte der Stahlvariante unbedeutend über der Variante aus Kupferblech (Abbildung 8-5); das heisst, die Wahl der Metallabdeckung (Kupfer/Stahl) beeinflusst beim Treibhauspotenzial das Gesamtergebnis der Ökobilanz nicht.

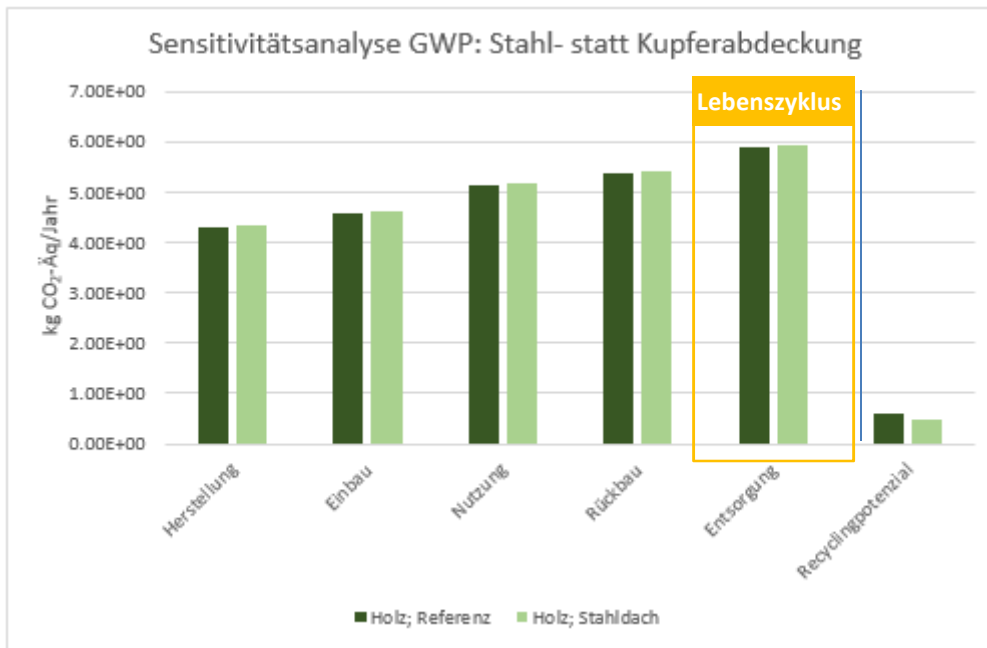


Abbildung 8-5: Sensitivitätsanalyse GWP: Verwendung einer Stahl- statt einer Kupferabdeckung; die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

8.5 Min/max-Betrachtung

Bei dieser letzten Sensitivätsbetrachtung werden diejenigen Szenariokombinationen betrachtet, die für die beiden untersuchten Ausfachungselemente zu den jeweils höchsten bzw. tiefsten Werten eines Indikators führen. Dies sind für die Berechnung der UBP:

Für die Holzvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Holzes aus Russland/Skandinavien

Min: Lebensdauer 40 Jahre, Verwendung von Schweizer Holz in der Variante mit Stahldach

Für die Betonvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Betonelementes (500 km Radius)

Min: Lebensdauer 50 Jahre, Produktion in der Schweiz

In Abbildung 8-6 sind die Ergebnisse dieser Min/Max-Betrachtung für die UBP wieder für die über den Lebenszyklus kumulierten Werte zusammengestellt.

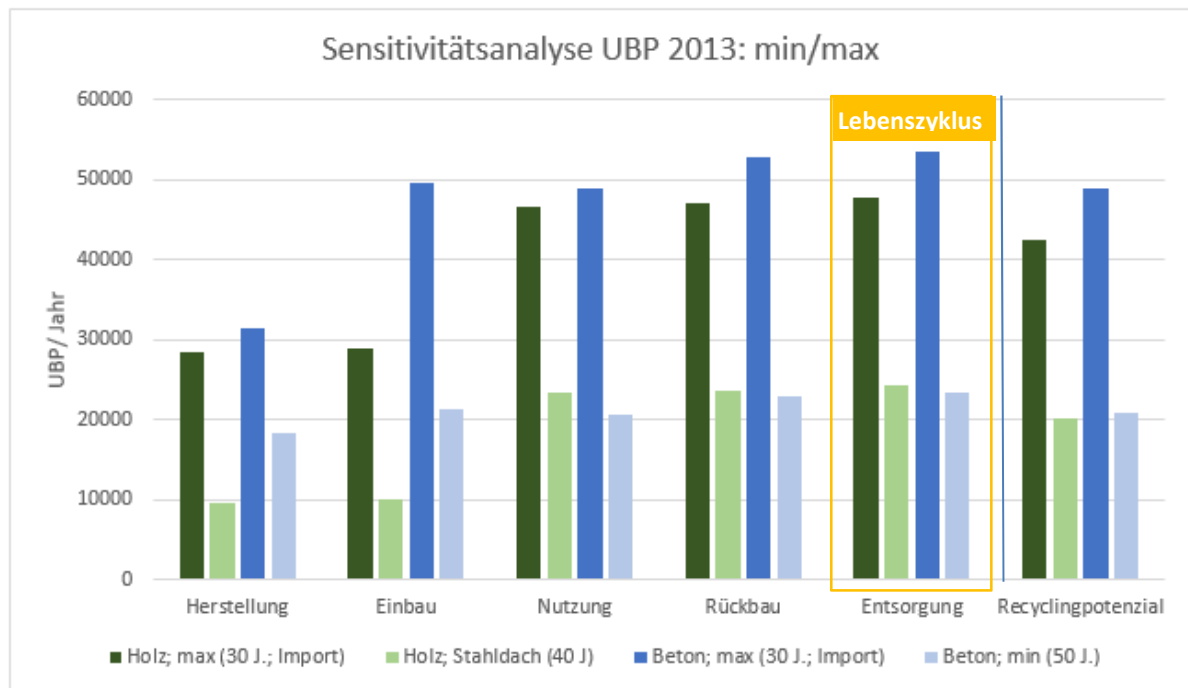


Abbildung 8-6: Sensitivitätsanalyse: Betrachtung der Minimal/Maximalvarianten für die Lärmschutzwände aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

Zwischen der Minimal- und der Maximalvariante besteht für jedes Material eine grosse Spanne. Eine sorgfältige Wahl kann die Umweltwirkung auch innerhalb eines Materials stark beeinflussen.

Bei dieser Betrachtung wird ersichtlich, dass sich in der Minimalvariante die Umweltwirkung als UBP 2013 der beiden Varianten bei Verwendung der Erwartungswerte von 50 Jahre Lebensdauer für die Betonvariante und 40 Jahren für die Ausführung in Holz bei „heimischer“ Produktion und einer Stahlabdeckung nicht signifikant unterscheiden. Bei der Maximalvariante als 30 Jahre Nutzungsdauer bei einem Importszenario liegen die Werte der Ausführung in Beton deutlich über den Umweltwirkungen der Holzvariante. Dies unterstreicht die Bedeutung lokaler Beschaffung, einer sorgfältigen Materialwahl und einer langen Lebensdauer des Ausfachungselementes.

Für die Berechnung des Treibhauspotenzials (wie auch der Primärenergie gesamt) sind dies folgende Varianten:

Für die Holzvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Holzes aus Russland/Skandinavien

Min: Lebensdauer 40 Jahre, Verwendung von Schweizer Holz in der Variante mit Kupferdach

Für die Betonvariante:

Max: Lebensdauer 30 Jahre, Import des Betonelementes (500 km Radius)

Min: Lebensdauer 50 Jahre, Produktion in der Schweiz

Hinsichtlich des Treibhauspotenzials lässt sich schlussfolgern, dass die Unterschiede zwischen den Varianten derart gross sind, dass die Holzvariante im Vergleich zur Betonvariante deutlich günstiger abschneidet (Abbildung 8-7).

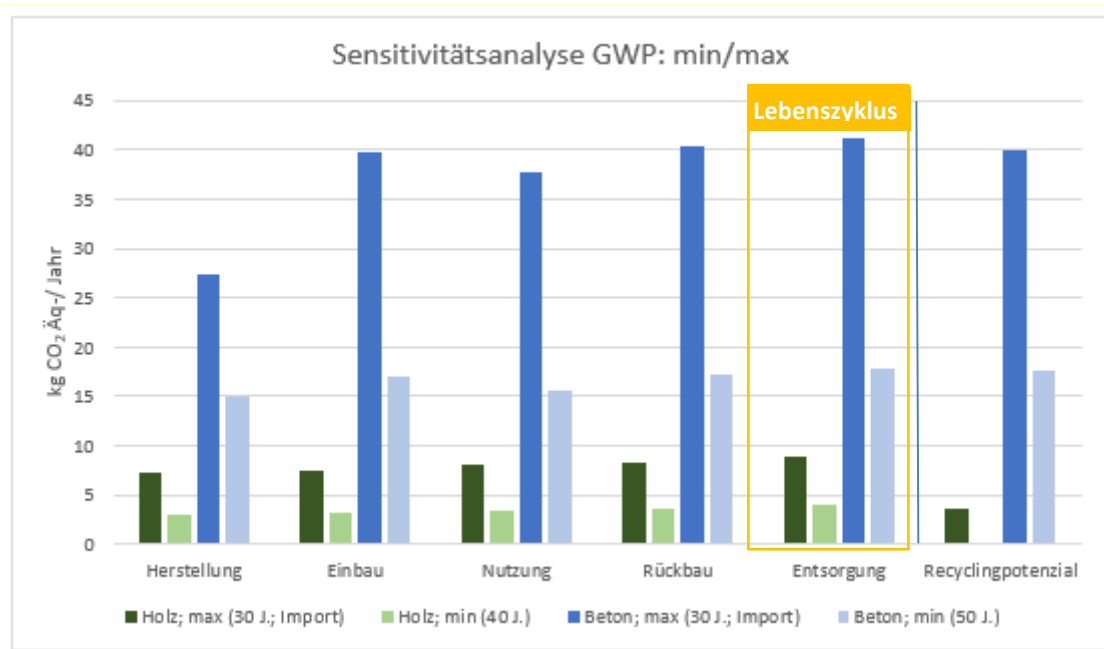


Abbildung 8-7: Sensitivitätsanalyse: Betrachtung der Minimal/Maximalvarianten für die Lärmschutzwände aus Holz bzw. Beton (4 m x 3 m); die Beiträge der einzelnen Abschnitte sind über den Lebenszyklus aufaddiert.

In obiger Darstellung ist die temporäre C-Speicherung im Holz nicht mit berücksichtigt, die sich für die Holzvarianten nicht unterscheidet (s. auch Abbildung 8-7).

9 Einschätzung der Datenqualität

Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser Studie muss berücksichtigt werden, dass sich die Datenqualität der beiden bilanzierten Varianten deutlich unterscheidet. Basieren die Daten für die Produktion der Holzvariante auf realen Produktionsdaten eines Herstellers, so stellen die Daten für die Betonvariante einen – zwar mit einem Betonexperten konsolidierten – „best guess“ dar.

Auf der anderen Seite beruht das Auswaschungsszenario für die Holzvariante – zumindest für die Berechnung der UBP 2013 ein überaus signifikanter Treiber – ebenfalls auf einem „best guess“. Die Ergebnisse der Studie, die der Abschätzung des Emissionsverhaltens zugrunde liegt, sind nicht ohne weitere Annahmen auf die bilanzierten Auswaschungen für die hier bilanzierte Einbringmenge und über die hier angenommene Lebensdauer des Ausfachungselementes übertragbar.

Weitere Szenarioannahmen wie die Transportdistanz auf die Baustelle bzw. zur Entsorgung sind von untergeordneter Bedeutung, und die angenommenen Entsorgungspfade dürften der Realität bzw. den derzeitigen gesetzlichen Anforderungen an die Entsorgung von druckimprägniertem Holz bzw. dem Betonrecycling in der Schweiz entsprechen.

Aus methodischer Sicht folgt die Ökobilanz mehrheitlich den Vorgaben der EN 15804 für Bauprodukte. Dies gilt z.B. für die Klassifizierung der bei der Klinkerproduktion eingesetzten alternativen Brennstoffe als Abfälle (s. auch CEN TR 16970) oder für die Berücksichtigung von potenziellen Vorteilen und Belastungen ausserhalb des Produktlebenszyklus durch die Berücksichtigung von Recyclingpotenzialen oder der Substitution von fossilen Brennstoffen durch die energetische Verwertung von Holz.

Weiter werden bei der Berechnung des Recyclingpotenzials auch negative „Nettooutputmengen“ berücksichtigt, was für die Berechnung der UBP 2013 nicht signifikant, für die Berechnung des GWP von untergeordneter Bedeutung ist.

Weiter werden neben der Herstellung und Entsorgung auch weitere Abschnitte des Produktlebenszyklus betrachtet, so der Transport auf die Baustelle oder die Umweltwirkung der Nutzungsphase.

Würde die Ökobilanz strikt nach Vorgaben der KBOB gerechnet, so würde:

- sich das Treibhauspotenzial aufgrund der Verrechnung der CO₂-Emissionen aus Abfällen bei der Klinkerherstellung geringfügig erhöhen,
- die potenziellen Vorteilen und Belastungen ausserhalb des Produktlebenszyklus durch die Berücksichtigung von Recyclingpotenzialen oder der Substitution von fossilen Brennstoffen durch die energetische Verwertung von Holz unberücksichtigt bleiben – die Bilanz würde wie diskutiert die Ökobilanz „von der Wiege bis zur Entsorgung“ umfassen,
- die Abschnitte Einbau als Transport der Ausfachungselemente auf die Baustelle sowie die Umweltwirkung der Nutzungsphase – also im Falle der Holzvarianten ein ergebnisrelevanter Abschnitt – vernachlässigt werden.

Vor diesem Hintergrund erscheint die Methodenwahl gerechtfertigt.

10 Referenzen

NORMEN UND GESETZE

ISO 14044 SN EN ISO 14044:2006-10, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.

ISO 14025 SN EN ISO 14025:2007-10, Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren.

EN 15804 SN EN 15804:2013-05, Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltdeklarationen für Produkte – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

EN 16757 EN 16757, Sustainability of construction works – Environmental product declarations – Product Category Rules for concrete and concrete.

SN EN 16485 SN EN 16485:2014-04, Rund- und und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen.

SN EN 16908 SN EN 16908:2017, Zement und Baukalk – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln in Ergänzung zu EN 15804; Deutsche Fassung EN 16908:2017.

CEN/TR 16970 CEN/TR 16970:2016, Nachhaltiges Bauen – Leitfaden für die Anwendung von EN 15804.

SIA 2032 Merkblatt SIA 2032:2010, Graue Energie. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.

WEITERE REFERENZEN

- ASTRA 2017** ASTRA (2017): Fachhandbuch Trasse/Umwelt. ASTRA 22 001, Version Juli 2017, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.
Online: [https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/fachdokumente_fuernationalstrassen/astra_21001_fachhandbuchtrasseumweltpdf.pdf.download.pdf/ASTRA%2021001%20Fachhandbuch%20Trasse%20%20Umwelt%20\(PDF\).pdf](https://www.astra.admin.ch/dam/astra/de/dokumente/fachdokumente_fuernationalstrassen/astra_21001_fachhandbuchtrasseumweltpdf.pdf.download.pdf/ASTRA%2021001%20Fachhandbuch%20Trasse%20%20Umwelt%20(PDF).pdf)
- Bafu 2013** Frischknecht. R. und S. Büsser Knöpfel (2013): Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz. Umwelt-Wissen Nr. 1330. Bundesamt für Umwelt. Bern.
- Frischknecht et al. 2007a** Frischknecht, R., N. Jungbluth, H.-J. Althaus, G. Doka, T. Heck, S. Hellweg, R. Hischier, T. Nemecek, G. Rebitzer, M. Spielmann und G. Wernet (2007): Overview and Methodology. ecoinvent report No. 1, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf.
- Frischknecht et al. 2007b** Frischknecht R., Jungbluth N., Althaus H.-J., Bauer C., Doka G., Dones R., Hellweg S., Hischier R., Humbert S., Margni M. and Nemecek T. (2007): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. ecoinvent report No. 3, v2.0. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- IBU 2016** Institut Bauen und Umwelt (2016): Umweltproduktdeklaration für die Schallschutzwand der Neolit GmbH, EPD-NEO-20150056-CBA1-D, veröffentlicht beim Institut Bauen und Umwelt (Hrsg.), Berlin.
- IPCC 2013** Myhre.G., D. Shindell. F.-M. Bréon. W. Collins. J. Fuglestedt. J. Huang. D. Koch. J.-F. Lamarque. D. Lee. B. Mendoza. T. Nalajima. A. Robock. G. Stephens. T. Takemura. H. Zhang et al.: In: Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. 30. September 2013. Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. S. Table 8.1.A. pages 8-88 to 8-99.
- KBOB et al. 2015** KBOB. eco-bau and IPB (2015) Regeln für die Ökobilanzierung von Baustoffen und Bauprodukten in der Schweiz. Version 3.0. Plattform "Ökobilanzdaten im Baubereich". KBOB. eco-bau. IPB. Bern.
Online: https://www.ecobau.ch/resources/uploads/Oekobilanzdaten/Plattform_O-eDB_Memo_Produktspezifische%20Regeln_v3 %200.pdf
- KBOB et al. 2016a** KBOB, eco-bau und IPB (2016) Ökobilanzdaten im Baubereich. Stand September 2016. Empfehlung Nachhaltiges Bauen 2009/1. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- KBOB et al. 2016b** KBOB. eco-bau und IPB (2016) ecoinvent Datenbestand 2016 basierend auf Datenbestand ecoinvent 2.2; Grundlage für die KBOB Empfehlung 2009/1:2016: Ökobilanzdaten im Baubereich. Stand April 2016. Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren c/o BBL Bundesamt für Bauten und Logistik.
- Leemann A et al. 2018** Leemann A., Hunkeler F. und Widmer H. (2018): Berechnung der CO₂-Aufnahmen während der Nutzungsdauer zementgebundener Baustoffe. Cemsuisse, Bern.
- Müller-Steinag Elemente AG 2018** Müller-Steinag Elemente AG (2018): FAVERIT® Lärmschutzelemente, Betonelemente mit Schalldämmung bis 38 dB, Müller-Steinag Elemente AG, Rickenbach.
- OECD (2000)** OECD (2000): Emission scenario document for wood preservatives, part 1. OECD series on emission scenario documents, number 2, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris.

- Pfadigan et al. (2014)* Pfadigan N., Fürhapper Ch. und Gründlinger R. (2014): Wirkstoffemissionen aus Holz, imprägniert mit Kupfer-Amin basierten Holzschutzmitteln; Studie über zwei Jahre Freilandexposition im Semi-Feldtest. *holztechnologie* 55(3):41-46.
- Rütgers (2012)* Rütgers (2012): impralit-KDS, Technisches Merkblatt, Version vom 10.4.2012. Rütgers Organics GmbH, Mannheim.
- Tschümperlin L. und Frischknecht R. (2016)* Tschümperlin L. und Frischknecht R. (2016): Ökobilanz ausgewählter Betonsorten, Schlussbericht. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Bericht-Nr. 11/2016, Zürich.
- Werner et al. 2014* Werner F., Bauer C., Büsser S., Doka G., Kaufmann E., Kono J., Luginbühl, U., Mina M., Frischknecht R., Thees O, Wallbaum H., Zimmermann W., Hischer R. (2014): Aktualisierung der Modelle und Datensätze zu Holz und Holzprodukten in der Datenbankecoinvent. Auftraggeberin: Bundesamt für Umwelt, Aktionsplan Holz, Bern, Auftragnehmer: Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA. Schlussbericht 30. Juni 2014.
- Werner 2015* Werner F. (2015): Arbeitsbericht für die unabhängige Prüfung der Berechnung der Indikatorwerte für Betone für die KBOB-Liste (inkl. Neuberechnungen der Klinkerdaten für die KBOB-Liste 2014), Eine Studie im Auftrag von cemsuisse, Bern. Werner Umwelt & Entwicklung, Zürich (unveröffentlicht).

Anhang I: Ergänzende Datensätze

Folgende Datensätze sind in diesem Anhang dokumentiert:

- Anlage zur Druckimprägnierung: Wood preservation facility, oscillating pressure method
- Druckimprägnierung: Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration
- Herstellung Holzschutzmittel: Wood preservative, organic salt, Cr-free

Tabelle A1-1: Modellierung Infrastruktur: Wood preservation facility, oscillating pressure method (Quelle: ecoinvent 3.3; Werner 2017)

Flows in ecoinvent	Amount	Unit
Products		
Wood preservation facility, oscillating pressure method/GLO	1	p
Resources		
Occupation, industrial area	131250	m ² a
Occupation, urban/industrial fallow	562500	m ² a
Transformation, from unknown	9250	m ²
Transformation, to industrial area	1750	m ²
Transformation, to urban/industrial fallow	7500	m ²
Materials/fuels		
Building, hall/CH/I	750	m ²
Concrete, sole plate and foundation, at plant/CH	3	m ³
Electronics for control units/RER	200	kg
Sheet rolling, steel/RER	25000	kg
Steel, low-alloyed, at plant/RER	25000	kg
Waste to treatment		
Disposal, electronics for control units/RER	200	kg
Disposal, building, concrete gravel, to sorting plant/CH	6900	kg
Disposal, building, reinforcement steel, to recycling/CH	25000	kg

Tabelle A1-2: Modellierung Druckimprägnierung (ohne Emissionen ins Wasser): Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration (Quelle: ecoinvent 3.3; Werner 2017)

Flows in ecoinvent	Amount	Unit
Products		
Wood preservation service, oscillating pressure, class 4, Cr-free, 2.1% salt concentration/CH_ohne Emissionen ins Wasser	1	kg
Materials/fuels		
electricity, medium voltage, at grid/kWh/CH	1.15	kWh
Sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant/RER	0.0107	kg
Sulphuric acid, liquid, at plant/RER	0.025	kg
tap water, at user/kg/CH	45.5	kg
Wood preservation facility, oscillating pressure method/GLO	2.78E-07	p
Wood preservative, organic salt, Cr-free/GLO	1	kg
Emissions to air		
Water to air unspecified	0.0154	kg

Tabelle A1-3: Modellierung Herstellung Holzschutzmittel: Wood preservative, organic salt, Cr-free (Quelle: ecoinvent 3.3; Werner 2017)

Flows in ecoinvent	Amount	Unit
Products		
Wood preservative, organic salt, Cr-free/GLO	1	kg
Materials/fuels		
Adipic acid, at plant/RER	0.0500	kg
Boric acid, anhydrous, powder, at plant/RER	0.0500	kg
Chemical plant, organics/RER/I U	4E-10	p
Chemicals organic, at plant/GLO U	0.0350	kg
Copper carbonate, at plant/RER	0.163	kg
electricity, medium voltage, at grid/kWh/DE U	0.0200	kWh
Ethylenediamine, at plant/RER	0.410	kg
Polycarboxylates, 40% active substance, at plant/RER S	0.00600	kg
Potassium carbonate, at plant/GLO U	0.0125	kg
Water, deionised, at plant/CH	0.273	kg