



# Vergleichende Lebenszyklusanalyse (LCA) von Abfallwirtschaftsszenarios für die FIS Alpine Ski WM– Saalbach2025

## Endbericht

Erstellt von

Mariana Rivera-Aguilar  
mariana.rivera-aguilar@uni-graz.at

Alexander Fiedler  
alexander.fiedler@edu.uni-graz.at

Supervision: Karl W. Steininger

Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz.

Abgeschlossen: September 2024

Studie im Auftrag der Saubermacher Dienstleistungs AG.

*Saubermacher*

## Inhaltsverzeichnis

1. Relevanz und Zielsetzung.....	1
2. Methodik.....	1
2.1 Szenarien .....	1
2.2 LCA: Zielsetzung und Untersuchungsrahmen .....	3
2.3 LCA: Systemgrenzen und Prozesse .....	3
2.4 LCA: Sachbilanz (Life Cycle Inventory) .....	4
2.4.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung .....	4
2.4.2 Transport .....	4
2.4.3 Emissionsfaktoren Abfallvorbehandlung .....	5
2.4.4 Emissionsfaktoren Thermische Abfallverwertung .....	5
2.4.5 Emissionsfaktoren Materielle Abfallverwertung .....	5
2.4.6 Emissionsfaktoren Deponierung .....	6
2.4.7 Vermiedene Emissionen.....	6
2.4.8 Netto-Emissionen .....	6
2.5 Wirkungsabschätzung.....	6
3. Ergebnisse .....	6
3.1 Sachbilanz (Life Cycle Inventory) .....	6
3.2 Wirkungsabschätzung.....	9
4. Zusammenfassung.....	13
5. Limitationen.....	14
Literaturverzeichnis .....	14
Appendix.....	16

## 1. Relevanz und Zielsetzung

Die Abhaltung von Großveranstaltungen, wie professionellen Sportwettkämpfen führt häufig in nur kurzer Zeit zu großen Mengen Abfall am Veranstaltungsort. Die Ski WM 2013 in Schladming erzeugte beispielsweise 169.73 Tonnen Abfall in 14 Tagen (Österreichischer Ski-Verband 2013).

Daher ist es einerseits essenziell, Abfallmengen bei Großveranstaltungen zu minimieren, beispielsweise durch ein Mehrwegsystem, verpackungsfreie Essensausgabe, biologisch abbaubare Verpackungen und wiederverwendbare Eventstrukturen (Daddi et al. 2021; Duc Thanh 2019). Durch Abfallminimierung können negative Umweltwirkungen verhindert werden.

Andererseits ist es gleichsam bedeutend, die nicht vermeidbaren Abfälle effektiv zu verwerten. Durch einen hohen Anteil an stofflicher Verwertung können Ressourcen eingespart und abfallbedingte Emissionen minimiert werden. Eine hohe Recyclingquote erfordert jedoch eine effektive Abfalltrennung. Eine Durchmischung von Abfällen erschwert die stoffliche Verwertung der verschiedenen Fraktionen. Insbesondere bei Veranstaltungen ist eine fehlerhafte Abfalltrennung durch Besucher/innen jedoch eine Herausforderung. Bei der Ski WM in Garmisch-Partenkirchen 2011 konnten beispielsweise 15% des gesamten Abfalls aufgrund von falscher Trennung nicht dem Recycling zugeführt werden (Stiftung Sicherheit im Skisport 2011).

Mittels gezielter Maßnahmen, wie Informationskampagnen, oder Incentivierung der Besucher/innen kann die Fehlwurfquote bei Veranstaltungen nachweislich reduziert werden (Zelenika et al. 2018). Jedoch gibt es kaum Informationen darüber, wie sich unterschiedliche Fehlwurfquoten auf die Treibhausgasemissionen des Abfallmanagements von Veranstaltungen auswirken. Der Transport ist ebenfalls ein häufig vernachlässigter Aspekt des Abfallmanagements. Studien zeigten jedoch, dass durch elektrische Mülltransportfahrzeuge die Emissionslast bis zu 13,28% reduziert werden kann (Aryan et al. 2023).

Diese hier vorliegende Studie verfolgte daher das Ziel die gesamten Treibhausgasemissionen der Abfallsammlung, des Transports und der Abfallverwertung während und nach der FIS Alpine Ski WM 2025 in Saalbach quantitativ zu bewerten. Dabei wurden verschiedene Szenarien analysiert, um den Einfluss von Abfalltrennung, verschiedenen Fehlwurfquoten, Transportfahrzeugen und eines Mehrwegsystems auf die Gesamtemissionslast des Abfallmanagements zu bewerten.

## 2. Methodik

Um die genannte Zielsetzung zu erreichen, wurde eine Lebenszyklusanalyse (LCA) der prognostizierten Abfallströme für sechs verschiedene Abfallmanagementszenarien bei der Ski WM 2025 durchgeführt. Dies beinhaltete eine Analyse sämtlicher Treibhausgasemissionen von dem Zeitpunkt der Abfalleinsammlung vom Gelände der Ski WM bis zur finalen Verwertung. Die Szenarien sowie die Schritte der LCA werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 2.1 Szenarien

Die Emissionslast des Abfallmanagements bei der Ski WM wurde für sechs mögliche Szenarien berechnet. Ein Überblick über die Szenarien findet sich in Tabelle 1.

#### **Szenario 1: Nur Restmüll**

In Szenario 1 (S1) erfolgt keine Abfalltrennung und der gesamte Abfall wird im Restmüll gesammelt. Die Getränkeausgabe erfolgt über ein Einwegsystem (Dosen, PET-Flaschen). Der Abfalltransport erfolgt ausschließlich mit Dieselfahrzeugen.

Tabelle 1: Übersicht Abfallmanagementszenarien

Szenario		Abfalltrennung		Fehlwurfquote	Transport	
Nr.	Name	Während Event	Abbau		Inbound Transport	Outbound Transport
S1	Nur Restmüll	Nein	Nein	N/A	100% Diesel	100% Diesel
S2	Weltcup 2024	Ja	Nein	Weltcup 2024	45,06% Elektro	100% Diesel
S3.1	Weltcup 2024 max. elektrisch	Ja	Nein	Weltcup 2024	82,96% Elektro	100% Diesel
S3.2	Weltcup 2024 -10% Fehlwürfe	Ja	Ja	-10% Fehlwürfe	82,96% Elektro	100% Diesel
S3.3	Weltcup 2024 -20% Fehlwürfe	Ja	Ja	-20% Fehlwürfe	82,96% Elektro	100% Diesel
S4	Mehrweg -70% LVP	Ja	Ja	Weltcup 2024	82,96% Elektro	100% Diesel

### Szenario 2: Weltcup 2024

Szenario 2 (S2) basiert auf dem Abfallmanagement des FIS Ski Weltcupfinales 2024, wo die meisten Primärdaten gesammelt wurden. In S2 erfolgt eine Abfalltrennung in fünf Fraktionen (Restmüll, Glas, Papier, LVP, Bio). Abfall, der im Zuge des Abbaus der Eventstrukturen entsteht, wird nicht getrennt (Sammlung ausschließlich im Sperrmüll). Eine Aufstellung aller Abfallfraktionen findet sich in Tabelle 2. Die Getränkeausgabe erfolgt über ein Einwegsystem. Gleich wie beim Weltcupfinale 2024 werden keine speziellen Maßnahmen zur Sensibilisierung der Besucher für die Abfalltrennung ergriffen. Die Fehlwurfquoten entsprechen daher jenen des Weltcupfinales. Der Transport zu den Sammelstellen wird zu 54,94% mit Diesel und zu 45,06% mit Elektrofahrzeugen durchgeführt (Inbound Transport, inkl. Abbau)<sup>1</sup>.

### Szenario 3.1: Weltcup 2024 max. elektrisch

Szenario 3.1 (S3.1) entspricht S2 mit dem Unterschied, dass der Abfalltransport bis zu den Sammelstellen zu 82,96% elektrisch erfolgt. Fehlwurfquoten und Mülltrennung entsprechen S2.

### Szenario 3.2: Weltcup 2024 -10% Fehlwürfe

In Szenario 3.2 (S3.2) erfolgt der Abfalltransport ebenfalls elektrisch. Zusätzlich wird jedoch angenommen, dass die Fehlwürfe in jeder Fraktion um 10% geringer sind als beim Weltcupfinale 2024 (z.B. -10% Glas, Papier im Restmüll). Das soll durch Motivations- und Sensibilisierungsmethoden, während der Ski WM erreicht werden und die materielle Verwertung der Abfälle erhöhen. Weiters erfolgt in diesem Szenario eine Trennung der, durch den Abbau entstandenen, Abfälle in die Fraktionen Sperrmüll, Holz und Metall.

### Szenario 3.3: Weltcup 2024 -20% Fehlwürfe

Szenario 3.3 (S3.3) beruht auf denselben Annahmen wie S3.2 mit dem Unterschied, dass eine noch geringere Fehlwurfquote erreicht wird (20% weniger als in S3.1).

### Szenario 4: Mehrweg (-70% LVP)

In Szenario 4 wird ein Mehrwegsystem zur Getränkeausgabe verwendet (wiederverwendbare Becher). Es wird angenommen, dass dadurch eine Reduktion von LVP in Höhe von 70% im Vergleich zum Weltcupfinale 2024 erreicht wird. Der Abfalltransport und die Fehlwurfquoten entsprechen S3.1. Abfälle im Zuge des Abbaus werden getrennt gesammelt.

Tabelle 2: Abfallfraktionen und Materialien

Materialfraktion	Ö-Norm Schlüssel	Materialspezifikation (beispielhaft)
Altglas	31468	Weißglas (Verpackungsglas)
Biomüll	91202	Küchen- und Kantinenabfälle
Karton (Altpapier)	91201	Verpackungen aus Papier und Karton
Kunststoffe (LVP)	57130	PET-Flaschen, gemischt
NE-Metalle (LVP)	35304	Aluminium
Siedlungsabfall	91101	Restmüll, Sperrmüll (Abbau)
Altholz	17202	Altholz behandelt gemischt (Abbau)
FE-Metalle	35103	Eisen-Metalle gemischt (Abbau)

<sup>1</sup> Der Transport von den Sammelstellen zu den Verwertungsanlagen (Outbound Transport) erfolgt immer ausschließlich mit Dieselfahrzeugen

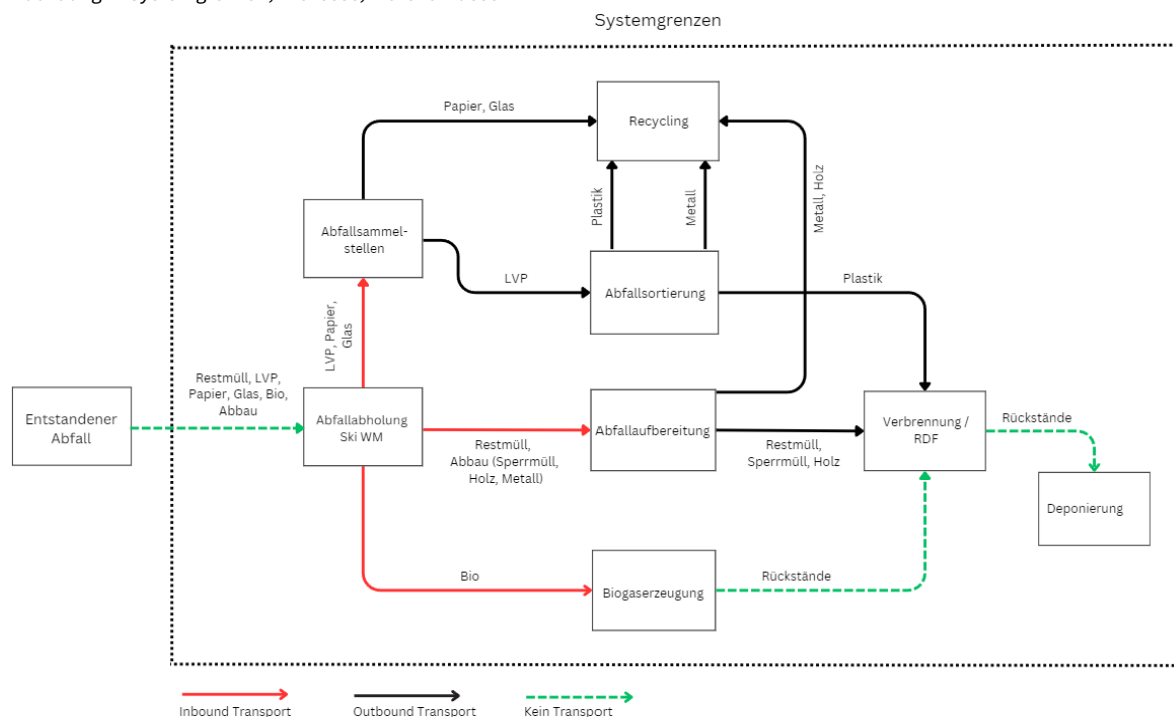
## 2.2 LCA: Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Diese LCA verfolgt das Ziel, basierend auf der gesamten Abfallmenge, die Treibhausgasemissionen, welche für jede Abfallfraktion bei der Ski WM 2025 entstehen, quantitativ zu bewerten. Die funktionelle Einheit beschreibt die Leistung, die das untersuchte System erbringt (European Commission 2011). Für diese Studie wurde sie folgend definiert: **„Einsammlung, Transport, und Verwertung der gesamten, bei der Ski WM 2025 entstandenen, Abfallmenge“**. Alle In- und Outputs der LCA beziehen sich auf diese funktionelle Einheit (ISO 2006).

## 2.3 LCA: Systemgrenzen und Prozesse

Die Systemgrenze wird einerseits bei der Abfalleinsammlung und dem Abfalltransport zur ersten Sammelstelle durch die Saubermacher Dienstleistungs AG (SDAG) gesetzt. Daraufhin wird der Abfall von den Verwertern abgeholt und je nach Fraktion erfolgt eine Abfallvorbehandlung, beziehungsweise weitere Sortierung. Die Systemgrenze am anderen Ende stellt die Endverwertung der Abfälle dar. Diese erfolgt je nach Fraktion thermisch (z.B. Verbrennung) oder stofflich (z.B. Recycling). Die Daten zur Abfallverwertung wurden von den Verwertern bereitgestellt oder aus der Literatur entnommen (BMK 2023; van Eygen 2018). Die Produktion und Reinigung der Mehrwegbecher (S4) sind nicht in den Berechnungen inkludiert. Ein Überblick über die Systemgrenzen und Materialflüsse findet sich in Abbildung 1.

Abbildung 1: Systemgrenzen, Prozesse, Materialflüsse



### 1. Altglas, Karton (Altpapier)

Getrennt gesammeltes Altglas sowie Altpapier/Karton werden von der SDAG von der Ski WM zu Sammelstellen transportiert. Daraufhin werden die beiden Fraktionen von den jeweiligen Verwertern abgeholt und zur Verwertungsstelle transportiert. Sowohl getrennt gesammeltes Altpapier als auch Glas werden zu 100% recycelt.

### 2. Biomüll

Getrennt gesammelter Biomüll wird von der SDAG direkt zum Verwerter gebracht. Dort wird der gesamte Biomüll in eine Biogasanlage eingebracht. 76,11% davon werden zu Biogas.

Die Rückstände werden kompostiert (15,47%) und thermisch verwertet (8,42%).

### **3. Leichtverpackungen (LVP)**

Getrennt gesammelte LVP werden von der Ski WM durch die SDAG zu Sammelstellen transportiert. Daraufhin werden die LVP vom Verwerter zu einer Sortieranlage transportiert. Dort werden Kunststoffverpackungen (primär PET-Flaschen) und Metallverpackungen (primär Getränkedosen, Aluminium) voneinander getrennt. Nach dem Transport zu den jeweiligen Verwertern werden die Kunststoffverpackungen im Durchschnitt zu 69,23% recycelt und zu 30,77% verbrannt. Die Metallverpackungen werden zu 100% recycelt.

### **4. Restmüll**

Restmüll wird durch die SDAG zur Aufbereitungsstelle gebracht. Dort wird Metall, welches durch Fehlwürfe im Restmüll gelandet ist, aussortiert und dem Recycling zugeführt. Fehlwürfe anderer Fraktionen werden gemeinsam mit dem Restmüll verwertet. Der Restmüll wird nach Aufbereitung entweder zu Refuse-Derived Fuel (RDF) verarbeitet, um Wärmeenergie für industrielle Prozesse zu erzeugen (94%) oder direkt zur Erzeugung von Wärme und Elektrizität verbrannt (5%). Fehlwürfe von anderen Fraktionen (z.B. Kunststoff, Papier) werden zu 100% direkt verbrannt. Rückstände (1%) werden deponiert. Glas ist nicht brennbar und bleibt bei Sammlung im Restmüll und Verbrennung zu 100% als Schlacke erhalten und wird deponiert.

### **5. Abbau (Sperrmüll, Holz, Metall)**

Sperrmüll, der im Zuge des Abbaus entsteht, wird auf gleiche Weise verarbeitet wie Restmüll während des Events. Holz wird bei getrennter Sammlung zu 80% recycelt und zu 20% verbrannt, bei Sammlung im Sperrmüll zu 100% thermisch verwertet. Metallabfälle werden zu 100% recycelt, auch bei Sammlung im Sperrmüll, da eine Aussortierung der Metalle erfolgt.

## **2.4 LCA: Sachbilanz (Life Cycle Inventory)**

In der Sachbilanz werden alle In- und Outputs, die in das System und die Prozesse ein- und ausfließen quantifiziert (ISO 2006). Hierfür wurden Primär- und Sekundärdaten herangezogen.

### **2.4.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung**

Abfallspezifische Daten, wie das gesamte Abfallaufkommen, sowie -zusammensetzung und die Fehlwurfquoten wurden auf Basis des FIS Ski Weltcupfinales in Saalbach 2024 berechnet. Die SDAG konnte beim Weltcupfinale umfangreiche Daten zum Abfallaufkommen erheben. Da das Weltcupfinale 2024 von der Struktur her vergleichbar ist und am gleichen Ort stattfand wie die Ski WM, wurde die Annahme getroffen, dass Informationen wie die Fehlwurfquote und die Abfallzusammensetzung auf die Ski WM übertragbar sind. Für die Berechnung des Abfallaufkommens wurde die Abfallmenge pro Besucher beim Weltcupfinale 2024 mit der erwarteten Besucheranzahl bei der Ski WM multipliziert. Für den Abbau wurde die doppelte Abfallmenge für die Ski WM im Vergleich zum Weltcupfinale angenommen.

### **2.4.2 Transport**

Der Ersttransport von der Ski WM zu den Sammel- und Aufbereitungsstellen erfolgt durch die SDAG (Inbound Transport). Die entsprechenden Transportdistanzen wurden beim Ski Weltcupfinale 2024 erhoben. Die gesamte Kilometeranzahl für den Inbound Transport wurde von der SDAG auf Basis der erwarteten Abfallmenge für die Ski WM hochgerechnet. Die Diesel-, bzw. Energieverbräuche der Fahrzeuge beruhen auf Daten der SDAG (Dieselfahrzeuge), bzw. Mobitool V3.0 (elektrische Fahrzeuge) (Paul Scherrer Institut 2023). Die Emissionsfaktoren (in CO<sub>2</sub>-eq/km) wurden auf Basis der Diesel-, bzw. Energieverbräuche der Fahrzeuge mittels Mobitool V3.0 berechnet.

Die Emissionsfaktoren berücksichtigen sowohl die direkten Emissionen aus dem Transport als auch indirekte Emissionen, die durch die Erzeugung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge entstehen. Da die Energiezufuhr bei der Ski WM ausschließlich von erneuerbaren Energien abgedeckt werden soll, wurde für die E-LKWs ebenfalls ein zu 100% aus erneuerbaren Energien bestehender Strommix angenommen. Die Energieverbräuche für E-LKWs laut Mobitool V3.0 wurden für die Kalkulation der Emissionsfaktoren um ein Drittel erhöht, aufgrund des hohen Stop&Go Betriebs von Mülltransportfahrzeugen im Vergleich zu herkömmlichen LKWs.

Der weitere Transport zur finalen Verwertung erfolgt durch Drittanbieter (z.B. Verwerter) (Outbound Transport). Die Transportdistanzen wurden von diesen bereitgestellt. Die benötigten Fahrten pro Abfallfraktion wurde auf folgende Weise berechnet: Fahrten pro Fraktion = Gewicht Abfallfraktion / Kapazität LKW (25t). Die Emissionen (CO<sub>2</sub>-eq/km) der Transportfahrzeuge wurden mit Daten des Mobitools V3.0 berechnet (Dieselbetriebener LKW 25t). Der Outbound Transport erfolgt in jedem Szenario ausschließlich mit Dieselantrieb.

#### 2.4.3 Emissionsfaktoren Abfallvorbehandlung

Gewisse Abfallfraktionen durchlaufen eine Vorbehandlung (Sortierung und/oder Produktion von RDFs). Bei der Berechnung der Emissionen für beide Prozesse wurden der Stromverbrauch (in kWh pro Tonne Abfall) und der Dieserverbrauch (in Liter pro Tonne Abfall) der jeweiligen Anlage berücksichtigt (basierend auf Informationen von der SDAG bzw. Verwerter). Diese Werte wurden mit Emissionsfaktoren multipliziert, die aus dem österreichischen Strommix (in kg CO<sub>2</sub>eq/kWh) und dem Emissionsfaktor von Diesel (in kg CO<sub>2</sub>eq/Liter) abgeleitet wurden.

#### 2.4.4 Emissionsfaktoren Thermische Abfallverwertung

Emissionen der Abfallverbrennung hängen vom Trocken- und Kohlenstoffgehalt der Abfallfraktionen ab. Daher wurden zuerst für Plastik, Papier, Biomüll und Holz die Trocken- und Kohlenstoffgehalte ermittelt und anschließend die entsprechenden Emissionsfaktoren (in CO<sub>2</sub>eq/t) berechnet (auf Basis von IPCC 2006, 2015; World Resources Institute 2015). Bei der Verbrennung von Glas entstehen keine materialbedingten Emissionen, da es aus anorganischen Materialien, ohne Kohlenstoffgehalt, besteht. Für die Verbrennung von Restmüll und RDFs wurden für den fossilen und biogenen Anteil Standardemissionsfaktoren des World Resources Institutes (2015) und Umweltbundesamts (2023) verwendet. Zusätzlich wurde die Nutzung von Hilfsbrennstoffen in der thermischen Verwertung beachtet. Der entsprechende Emissionsfaktor wurde auf Basis österreichischer Verbrennungsanlagen berechnet (Umweltbundesamt 2022).

Die Verbrennung des fossilen Anteils des Restmülls und von Plastik führt zur Freisetzung von fossilen Emissionen. Papier, Holz und Biomüll, und der biogene Anteil des Restmülls hingegen erzeugen in der Verbrennung biogene Emissionen. Da die Abfallentstehung und die Verwertung die Systemgrenzen darstellen, liegt eine potenzielle Aufnahme des biogenen CO<sub>2</sub>s vor oder nach der Verbrennung durch Biomasse außerhalb der Systemgrenzen und wurde nicht beachtet. Daher wurde in dieser Studie der Beitrag von biogenen und fossilen Emissionen zur gesamten Emissionslast gleichermaßen berücksichtigt.

#### 2.4.5 Emissionsfaktoren Materielle Abfallverwertung

CO<sub>2</sub>eq Emissionen, die während des Recyclingprozesses pro Tonne Abfall entstehen, wurden für jede Abfallfraktion auf Basis von Emissionsfaktoren des Umweltbundesamts und der Datenbank EcoInvent bestimmt (Umweltbundesamt 2010; EcoInvent 2023). Die Faktoren berücksichtigen einen Materialverlust durch den Recyclingprozess. Der Emissionsfaktor für die Biogaserzeugung beruht auf Daten von Umweltbundesamt 2011.



#### 2.4.6 Emissionsfaktoren Deponierung

Die Emissionen pro Tonne deponierter Abfälle wurden anhand eines Faktors aus der IPCC-Datenbank für Emissionsfaktoren (EFDB) berechnet (IPCC 2015).

#### 2.4.7 Vermiedene Emissionen

Durch Recycling können Emissionen, die durch die Primärproduktion derselben Menge Material entstanden wären, vermieden werden. Beispielsweise können durch das Recycling von einer Tonne Altglas, Emissionen von der Neuproduktion von einer Tonne Glas vermieden werden. Die Emissionsfaktoren für die Neuproduktion der Materialien wurden aus Umweltbundesamt (2010), Brogaard et al. 2014 (Karton) und Turner et al. 2015 (Altholz) entnommen.

Ähnliches trifft auf die thermische Abfallverwertung zu. Die gewonnene Energie wird als Wärme oder Elektrizität eingesetzt und ersetzt damit die Nutzung von fossilen Energien. Auf Basis des fossilen Energiemix in Österreich (IEA 2024) und der Emissionsfaktoren für fossile Energieträger (World Resources Institute 2015) wurden die fossile Energiemenge und Emissionen berechnet, die durch die thermische Verwertung von einer Tonne Abfall vermieden werden können. Die vermiedenen Emissionen unterscheiden sich je nach Brennwert der Abfallfraktionen (z.B. Papier hat einen höheren Brennwert als Biomüll) und Verwertungsart (Verbrennung oder RDF). Dasselbe gilt für Biogas aus Biomüll, welches ebenfalls Energie aus fossilen Quellen ersetzt.

#### 2.4.8 Netto-Emissionen

Die Nettoemissionen der Abfallverwertung (Recycling/RDF/Verbrennung/ Biogas) wurden wie folgt berechnet: **Nettoemissionen = Erzeugte Emissionen – Vermiedene Emissionen**

### 2.5 Wirkungsabschätzung

Auf Basis der Emissionsfaktoren, der abgeschätzten Abfallmenge und -zusammensetzung sowie der gesamten Transportkilometern, wurden die Treibhausgasemissionen des Abfallmanagements bei der Ski WM 2025 für alle Szenarien berechnet. Die Emissionslast ergibt sich aus der Multiplikation der (Netto-)Emissionsfaktoren mit der Abfallmenge. bzw. den gesamten Transportkilometern. Die Berechnungen erfolgten in CO<sub>2</sub> Äquivalenten. Dadurch konnte sowohl der Effekt von CO<sub>2</sub> berücksichtigt werden als auch jener von Treibhausgasen wie CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O.

## 3. Ergebnisse

In den folgenden zwei Abschnitten werden die Ergebnisse der Sachbilanz (Life Cycle Inventory) und die Treibhausgasemissionslast für alle sechs Szenarien dargestellt.

### 3.1 Sachbilanz (Life Cycle Inventory)

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die erwarteten Abfallmengen bei der Ski WM 2025 je nach Szenario. Beim Ski Weltcupfinale 2024 sind pro Besucher 0,47 kg Abfall entstanden. Hochgerechnet auf 153.400 erwartete Besucher ergibt das 72,10 Tonnen Abfall für die Ski WM.

Die Anteile der Fraktionen am Gesamtabfall sowie die Fehlwurfquoten basieren im Szenario S2 und S3.1 auf Erhebungen beim Weltcupfinale 2024. Dementsprechend finden sich materiell verwertbare Fehlwürfe ausschließlich im Restmüll. Eine kleine Menge Restmüll findet sich in den LVP. In den anderen Fraktionen wird davon ausgegangen, dass keine Fehlwürfe vorkommen. In S2 und S3.1 beträgt die Fehlwurfquote 43,83% des Restmüllaufkommens. In der LVP-Fraktion wurde eine Verteilung von 80% Aluminium- und 20% Kunststoffverpackungen auf Basis von Stichproben beim Weltcupfinale 2024 angenommen. LVP machen mit Abstand den größten Anteil an Abfall aus (23,02t) und auch die meisten Fehlwürfe sind LVP (in S2 = 9,32t LVP im Restmüll). Glas und Papier machen jeweils nur einen geringen Anteil der Fehlwürfe im Restmüll aus (in S2: 0,35t bzw. 1,46t), während Biomüll gar keine Fehlwürfe aufweist.



In S3.2 und S3.3 sind die Fehlwürfe jeder Fraktion um 10, bzw. 20% reduziert. Dadurch verringert sich in diesen Szenarien das Restmüllaufkommen, während die Anteile der anderen Fraktionen steigen, da mehr Abfall in den korrekten Behältern landet. In S1 findet keine Abfalltrennung statt und alle materiell verwertbaren Fraktionen gelten als Fehlwürfe im Restmüll. S4 basiert auf einem Mehrwegsystem und nimmt eine Reduktion der LVP von 70% an. Das führt zu einer geringeren gesamten Abfallmenge (55,98t) und weniger Fehlwürfen, da nur eine geringere Menge LVP vorhanden sind, die im Restmüll landen können.

Die Menge an Abfall, die beim Abbau entsteht beträgt in jedem Szenario 11,12t (siehe Tabelle 4). Je nachdem, ob eine Trennung stattfindet, landet entweder der ganze Abfall im Sperrmüll oder wird in drei Fraktionen getrennt (87% Sperrmüll, 3% Metall, 10% Holz).

Tabelle 3: Abfallmengen und -zusammensetzung nach Szenario (in Tonnen)

<b>Szenario 1</b>						
<b>Keine Mülltrennung</b>						
Weggeworfen im	Restmüll (t)	LVP (t)	Glas (t)	Papier (t)	Biomüll (t)	Gesamt (t)
Restmüllcontainer	14,54	23,02	8,53	9,92	16,09	72,10
LVP-Container	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Glascontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Papiercontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Biomüllcontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>Gesamt</b>	<b>14,54</b>	<b>23,02</b>	<b>8,53</b>	<b>9,92</b>	<b>16,09</b>	<b>72,10</b>
<b>Szenario 2 + 3.1</b>						
<b>Weltcup 2024</b>						
Weggeworfen im	Restmüll (t)	LVP (t)	Glas (t)	Papier (t)	Biomüll (t)	Gesamt (t)
Restmüllcontainer	14,27	9,32	0,35	1,46	0,00	25,40
LVP-Container	0,27	13,70	0,00	0,00	0,00	13,97
Glascontainer	0,00	0,00	8,18	0,00	0,00	8,18
Papiercontainer	0,00	0,00	0,00	8,46	0,00	8,46
Biomüllcontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	16,09	16,09
<b>Gesamt</b>	<b>14,54</b>	<b>23,02</b>	<b>8,53</b>	<b>9,92</b>	<b>16,09</b>	<b>72,10</b>
<b>Szenario 3.2</b>						
<b>-10% Fehlwürfe</b>						
Weggeworfen im	Restmüll (t)	LVP (t)	Glas (t)	Papier (t)	Biomüll (t)	Gesamt (t)
Restmüllcontainer	14,29	8,39	0,31	1,31	0,00	24,31
LVP-Container	0,24	14,63	0,00	0,00	0,00	14,87
Glascontainer	0,00	0,00	8,22	0,00	0,00	8,22
Papiercontainer	0,00	0,00	0,00	8,61	0,00	8,61
Biomüllcontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	16,09	16,09
<b>Gesamt</b>	<b>14,54</b>	<b>23,02</b>	<b>8,53</b>	<b>9,92</b>	<b>16,09</b>	<b>72,10</b>
<b>Szenario 3.3</b>						
<b>-20% Fehlwürfe</b>						
Weggeworfen im	Restmüll (t)	LVP (t)	Glas (t)	Papier (t)	Biomüll (t)	Gesamt (t)
Restmüllcontainer	14,32	7,46	0,28	1,17	0,00	23,23
LVP-Container	0,21	15,56	0,00	0,00	0,00	15,78
Glascontainer	0,00	0,00	8,25	0,00	0,00	8,25
Papiercontainer	0,00	0,00	0,00	8,76	0,00	8,76
Biomüllcontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	16,09	16,09
<b>Gesamt</b>	<b>14,54</b>	<b>23,02</b>	<b>8,53</b>	<b>9,92</b>	<b>16,09</b>	<b>72,10</b>
<b>Szenario 4</b>						
<b>- 70% LVP</b>						
Abfallmenge	55,98 Tonnen					
Weggeworfen im	Restmüll (t)	LVP (t)	Glas (t)	Papier (t)	Biomüll (t)	Gesamt (t)
Restmüllcontainer	14,27	2,80	0,35	1,46	0,00	18,87
LVP-Container	0,27	4,11	0,00	0,00	0,00	4,38
Glascontainer	0,00	0,00	8,18	0,00	0,00	8,18
Papiercontainer	0,00	0,00	0,00	8,46	0,00	8,46
Biomüllcontainer	0,00	0,00	0,00	0,00	16,09	16,09
<b>Gesamt</b>	<b>14,54</b>	<b>6,91</b>	<b>8,53</b>	<b>9,92</b>	<b>16,09</b>	<b>55,98</b>

Tabelle 4: Abfallmengen und -zusammensetzung Abbau (in Tonnen)

Abbau	Keine Trennung: S1, S2, S3.1			
Weggeworfen im	Sperrmüll (t)	Metall (t)	Holz (t)	Gesamt (t)
Sperrmüllcontainer	9,67	0,33	1,11	11,12
Metallcontainer	0	0	0	0
Holzcontainer	0	0	0	0
<b>Gesamt</b>	<b>9,67</b>	<b>0,33</b>	<b>0</b>	<b>11,12</b>
Abbau	Trennung: S3.2, S3.3, S4			
Weggeworfen im	Sperrmüll (t)	Metall (t)	Holz (t)	Gesamt (t)
Sperrmüllcontainer	9,67	0	0	9,67
Metallcontainer	0	0,33	0	0,33
Holzcontainer	0	0	1,11	1,11
<b>Gesamt (t)</b>	<b>9,67</b>	<b>0,33</b>	<b>1,11</b>	<b>11,12</b>

In Tabelle 5 finden sich die gesamt erwartete Kilometeranzahl für den Abfalltransport (Inbound + Outbound) je nach Szenario, sowie die Anteile der verwendeten Fahrzeuge und entsprechenden Emissionsfaktoren (in kg CO<sub>2</sub>eq pro Fahrzeugkilometer = v-km). Die Kilometeranzahl ist für S1 geringer, da in diesem Szenario der gesamte Abfall in Restmüllcontainern gesammelt wird und nur eine Verwertungsstelle angefahren werden muss. Dadurch fällt die Anzahl an benötigten Fahrten im Vergleich zu den anderen Szenarien niedriger aus. Hingegen wurde von der SDAG eingeschätzt, dass die benötigte Kilometeranzahl auch bei geringeren Leichtverpackungsmengen (S4) im Inbound gleichbleibt. Im Outbound ist die Kilometeranzahl in S3.2, S3.3. und S4 etwas geringer als für S2 und S3.1, da aufgrund der besseren Abfalltrennung bzw. geringeren Abfallmenge weniger Fahrten zum Restmüllverwerter benötigt werden. Der Transport des Abbaubausfalls ist für alle Szenarien gleich und wird mit Dieselfahrzeugen durchgeführt.

Tabelle 5: Fahrzeuge, Kilometeranzahl, Emissionsfaktoren – Inbound Transport

Inbound Transport S1 (100% Diesel)	Kilometer %	Kilometer gesamt	Emissionsfaktor
<b>Kilometer Inbound gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>3 494,00 km</b>	
HL Diesel (<18t)	62,68%	2 190,00 km	1,98 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Bus Diesel (<3.5t)	28,78%	1 005,60 km	0,48 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Absetzer LKW (<18t)	8,54%	298,40 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Inbound Transport S2 (48,09% Elektro, 51,91% Diesel)	Kilometer %	Kilometer gesamt	Emissionsfaktor
<b>Kilometer Inbound gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>4 845,00 km</b>	
HL Elektro (<18t)	8,66%	419,70 km	0,39 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
HL Diesel (<18t)	8,66%	419,70 km	1,98 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
E-Pritsche (<3.5t)	29,05%	1 407,40 km	0,20 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Pritsche Diesel (<3.5t)	21,40%	1 037,00 km	0,48 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
E-Bus (<3.5t)	10,38%	502,80 km	0,20 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Bus Diesel (<3.5t)	10,38%	502,80 km	0,48 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Abroller-LKW (Nur Diesel) (<18t)	4,10%	198,60 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Absetzer-LKW (Nur Diesel) (<18t)	7,37%	357,00 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Inbound Transport S3 (alle) + S4 (88,53% elektrisch, 11,47% Diesel)	Kilometer %	Kilometer gesamt	Emissionsfaktor
<b>Kilometer Inbound gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>4 845,00 km</b>	
HL Elektro (<18t)	17,33%	839,40 km	0,39 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
E-Pritsche (<3.5t)	50,45 %	2 444,40 km	0,20 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
E-Bus (<3.5t)	20,76%	1 005,60 km	0,20 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Abroller-LKW (Nur Diesel) (<18t)	4,10%	198,60 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Absetzer-LKW (Nur Diesel) (<18t)	7,37%	357,00 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Inbound Transport Abbau (Alle Szenarien)	Kilometer %	Kilometer gesamt	Emissionsfaktor
<b>Kilometer Inbound gesamt</b>	<b>100%</b>	<b>325,38 km</b>	
Abroller-LKW (Nur Diesel) (<18t)	50,00%	162,69 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Absetzer-LKW (Nur Diesel) (<18t)	50,00%	162,69 km	1,37 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
Outbound Transport	Kilometer %	Kilometer gesamt	Emissionsfaktor
S1 Diesel LKW (26t)	100%	1 031,47 km	1,3337 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
S2 + S3.1 Diesel LKW (26t)	100%	2 005,36 km	1,3337 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km
S3.2 + S3.3 + S4 Diesel LKW (26t)	100%	1 912,82 km	1,3337 kg CO <sub>2</sub> eq/v-km

In Tabelle 6 sind die Emissionsfaktoren der Abfallaufbereitung, sowie die Nettoemissionsfaktoren der Verwertungsmethoden zusammengefasst dargestellt. Diese ergeben sich aus der Differenz, der beim Verwertungsprozess entstanden Emissionen (z.B. Verbrennung) und der dadurch vermiedenen Emissionen (reduzierter Bedarf an Primärmaterial bzw. fossiler Energie durch Recycling bzw. Energienutzung aus Verbrennung). Eine Auflistung der entstandenen und vermiedenen Emissionsfaktoren findet sich im Appendix. Die Emissionen des Recyclings sind durchwegs negativ, da die Herstellung einer Tonne Primärmaterial für alle Fraktionen emissionsintensiver ist als das Recycling einer Tonne Abfall. Insbesondere das Recycling von Aluminiumverpackungen weist hohe Einsparungen pro Tonne aus (-8.140 kg CO<sub>2</sub>eq/t). Abfallverbrennung und RDF weisen hingegen positive Nettoemissionen aus. Das ergibt sich daraus, dass Abfallverbrennung hohe Emissionen erzeugt, jedoch aufgrund des im Vergleich zu fossilen Energieträgern niedrigeren Heizwertes nur wenig fossile Energie pro Tonne Abfall ersetzen kann. Diese vermiedenen Emissionen sind geringer als die bei der Verbrennung freigesetzten Emissionen.

Tabelle 6: Emissionsfaktoren Transport, Abfallaufbereitung, Verwertung

<b>Emissionsfaktoren Abfallaufbereitung</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
Splitting/Sortierung	9,97	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Thermo Team	12,86	kg CO <sub>2</sub> eq/t
<b>Nettoemissionsfaktoren Abfallverwertung</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>
RDF	214,07	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Restmüll (Biogene Fraktion)	491,51	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Restmüll (Fossile Fraktion)	340,71	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Kunststoff LVP	647,86	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Biomüll	332,78	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Papier	683,19	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Holz	730,08	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Glas	0	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Verbrennung, Hilfsbrennstoffe	6,03	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, Altglas	-394,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, Altpapier (Karton)	-320,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, Aluminium LVP	-8140,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, Kunststoff LVP	-818,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, Altholz (Abbau)	-444,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Recycling, FE-Metalle, gemischt (Abbau)	-494,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Biogas	-131,00	kg CO <sub>2</sub> eq/t
Deponierung	101,2	kg CO <sub>2</sub> eq /t

### 3.2 Wirkungsabschätzung

Um die gesamte Emissionslast für alle Szenarien zu berechnen, wurden die erwarteten Abfallmengen und Transportkilometer mit den zutreffenden (Netto-)Emissionsfaktoren multipliziert. Tabelle 7 und Abbildung 2 geben einen Überblick über die verursachten, vermiedenen und Nettoemissionen aller Szenarien. Eine Auflistung der verursachten und vermiedenen Emissionen je Material und der Anteile der biogenen und fossilen Emissionen, verursacht durch die Abfallverbrennung, findet sich im Appendix.

Bei den verursachten Emissionen erzeugt die Abfallverwertung mit Abstand die meisten Emissionen, während der Transport nur einen geringen Beitrag zu den Gesamtemissionen leistet (auch bei 100% Diesel). Die Nettoemissionen für alle Szenarien sind negativ, bedeutend, dass durch die materielle und thermische Nutzung des Abfalls in allen Szenarien Emissionen eingespart werden. Jedoch ist deutlich, dass die Nettoemissionen in S1 (Sammlung im Restmüll, Dieseltransport) deutlich höher sind als in den anderen Szenarien (-119,22t CO<sub>2</sub>eq). Das liegt einerseits an den höheren verursachten Emissionen, entstanden durch den hohen Anteil an Abfallverbrennung. Andererseits sind auch die vermiedenen Emissionen geringer, da durch die Verbrennung der meisten Materialien weniger Emissionen eingespart werden als beim

Recycling und der Biogaserzeugung. Die Nettoemissionslast ist dennoch negativ, da auch in diesem Szenario die Aluminium-LVP zu 100% recycelt werden (Aussortierung in Restmüllaufbereitung). Aufgrund des hohen Anteils an Aluminium-LVP an der Abfallmenge (18,42 Tonnen) und der hohen Emissionseinsparungen (Netto -8.140kg CO<sub>2</sub>eq/Tonne recyceltem Aluminium) im Vergleich zu anderen Abfallfraktionen, ergibt sich auch dann eine Emissionseinsparung, wenn alle anderen Fraktionen thermisch verwertet werden.

Weiters kann beobachtet werden, dass sich die Emissionslast für S2, S3.1, S3.2 und S3.3 kaum unterscheidet (Unterschied zwischen S2 und S3.3 = 3,45t CO<sub>2</sub>eq). Ein Wechsel auf primär elektrischen Transport im Inbound erzeugt eine Emissionsreduktion von 1,51 Tonnen CO<sub>2</sub>eq (in S3.1) im Vergleich zum gemischten Transport. 20% weniger Fehlwürfe im Vergleich zum Weltcupsszenario reduzieren die Emissionen um 1,89 Tonnen. Der Einfluss von einer besseren Abfalltrennung durch Besucher auf die Gesamtemissionen ist daher gering. Das liegt zum einen daran, dass eine 10 bzw. 20% geringere Fehlwurfquote nur geringe Abfallmengen betrifft, die dann statt Verbrennung dem Recycling zugeführt werden können (z.B. bei -20% Fehlwürfen werden nur 0,29 Tonnen Papier mehr recycelt als im Weltcupsszenario). Zum anderen ist es erneut auf die Aluminium-LVP zurückzuführen, die den Großteil der Fehlwürfe ausmachen (7,46 Tonnen von gesamt 11,13 Tonnen Fehlwürfe im Restmüll in S2). Da diese auch zu 100% recycelt werden, wenn sie im Restmüll landen, hat eine bessere Trennung durch Besucher keinen Einfluss auf die finale Verwertung der Aluminium-LVP.

Szenario S4 zeigt deutlich höhere Emissionseinsparungen (-182,06t CO<sub>2</sub>eq) auf als die anderen Szenarien. Durch die geringere Leichtverpackungsmenge in diesem Szenario verringern sich die Emissionen, die durch das Recycling und die Verbrennung von Leichtverpackungen entstehen, deutlich. Währenddessen bleiben die vermiedenen Emissionen aber ähnlich hoch. Auch das Mehrwegsystem ersetzt die Neuproduktion von LVP, da diese gar nicht benötigt werden.

Tabelle 7: Emissionslast Szenarien

	Transport	Aufbereitung	Verwertung	Gesamt verursacht	Vermeidung	Netto-Emissionen
	t CO <sub>2</sub> eq	t CO <sub>2</sub> eq	t CO <sub>2</sub> eq	t CO <sub>2</sub> eq	t CO <sub>2</sub> eq	t CO <sub>2</sub> eq
<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	7,04	1,66	117,04	125,74	-244,96	-119,22
<b>S2 (Weltcup 2024)</b>	6,41	0,87	110,62	117,90	-260,82	-142,92
<b>S3.1 (max. Elektro)</b>	4,90	0,87	110,62	116,39	-260,82	-144,43
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	4,77	0,87	109,23	114,87	-260,83	-145,96
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	4,77	0,86	109,14	114,78	-261,10	-146,32
<b>S4 (Mehrweg)</b>	4,77	0,70	75,49	80,96	-263,02	-182,06

Abbildung 2: Emissionslast Szenarien

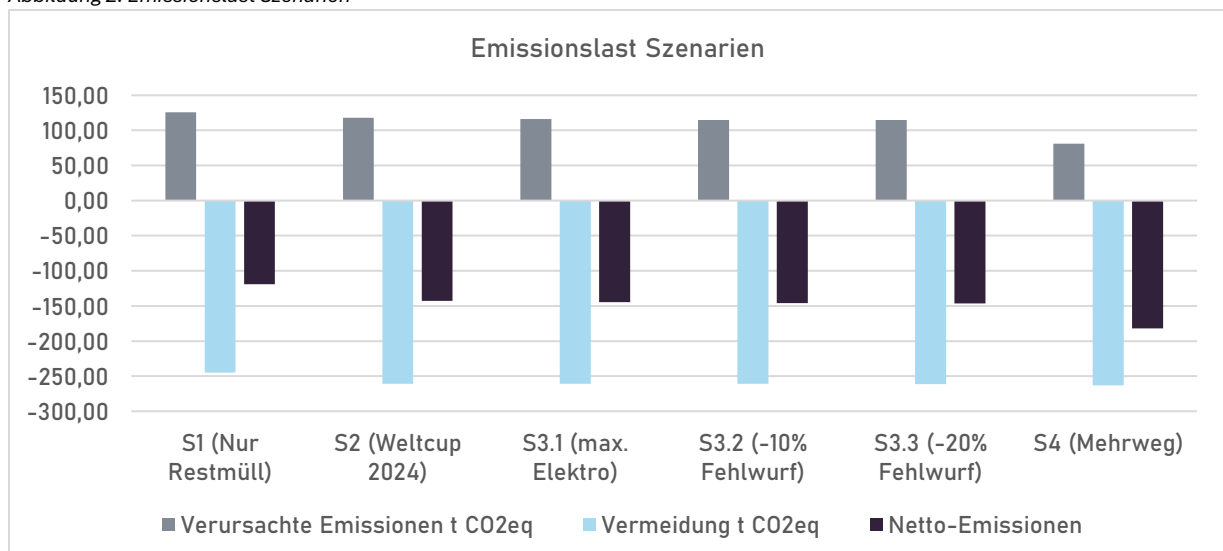


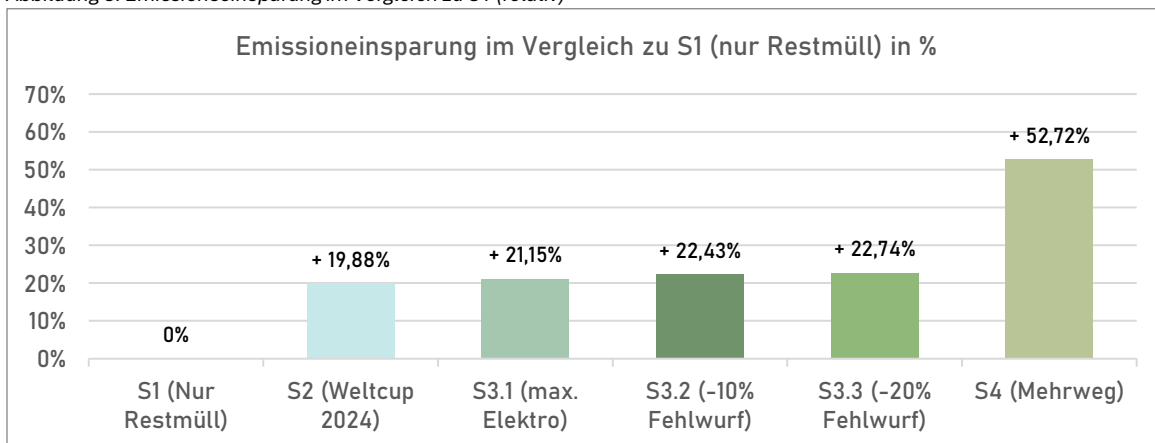
Tabelle 8 und Abbildung 3 zeigen die Emissionseinsparungen der Szenarien im Vergleich zu S1. Wie bereits erwähnt unterscheidet sich die Höhe der Einsparungen der Szenarien S2 bis S3.3 im Vergleich zu S1 kaum, trotz der geringeren Fehlwurfquoten und höheren Anteile an elektrischem Transport. Dennoch wird deutlich, dass allein durch Abfalltrennung und elektrischem Transport (S3.1) 21,15% zusätzlich an Emissionen im Vergleich zu S1 eingespart werden kann.

Tabelle 8: Emissionseinsparung im Vergleich zu S1 (absolut)

	Gesamtemissionen	Emissionseinsparung im Vergleich zu S1 (nur Restmüll)
	t CO2eq	t CO2eq
<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	-119,22	0,00
<b>S2 (Weltcup 2024)</b>	-142,92	23,70
<b>S3.1 (max. Elektro)</b>	-144,43	25,21
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	-145,96	26,74
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	-146,32	27,11
<b>S4 (Mehrweg)</b>	-182,06	62,85

S4 erzielt durch das Mehrwegsystem eine deutlich höhere Emissionseinsparung im Vergleich zu S1 als die anderen Szenarien (+52,72%). Die Abfallvermeidung lässt sich daher als beste Strategie identifizieren, um die maximale Emissionseinsparung zu erzielen.

Abbildung 3: Emissionseinsparung im Vergleich zu S1 (relativ)

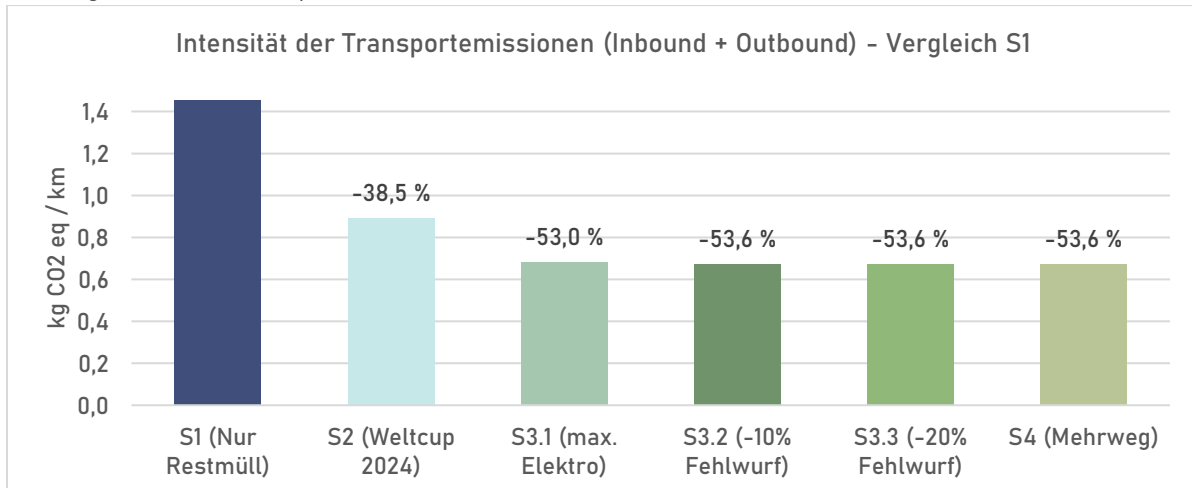


Auch wenn die Transportemissionen nur einen kleinen Anteil an den gesamt erzeugten Emissionen haben, unterschieden sie sich jedoch deutlich in der Höhe, je nach dem Anteil an elektrischen Fahrzeugen. Tabelle 9 zeigt die gesamten Transportemissionen für jedes Szenario, sowie die Transportemissionen in kg CO2eq pro gefahrenem Kilometer. Die Tabelle zeigt, dass trotz geringerer benötigter Kilometeranzahl (aufgrund der ausschließlichen Sammlung im Restmüll) die Emissionen pro Kilometer in S1 deutlich höher sind als in den anderen Szenarien. Das ist auf den ausschließlichen Dieseltransport zurückzuführen. Die Unterschiede werden in Abbildung 4 nochmals verdeutlicht. Bei einem Inbound Transport von 54,94% Diesel und 45,06% Elektro, reduzieren sich die Emissionen pro gefahrenem Kilometer bereits um 38,5% im Vergleich zu ausschließlichem Dieseltransport. Eine weitere Erhöhung des Elektroanteils im Inbound auf 82,96%, reduziert die Transportemissionen pro Kilometer um weitere 14,5-15,1%.

Tabelle 9: Emissionen Transport

Transport	t CO2eq	km	kg CO2eq / km	Emissionsreduktion Im Vergleich zu S1
<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	7,04	4850,85	1,452	
<b>S2 (Weltcup 2024)</b>	6,41	7175,74	0,893	-38,5 %
<b>S3.1 (max. Elektro)</b>	4,90	7175,74	0,683	-53,0 %
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	4,77	7083,20	0,674	-53,6 %
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	4,77	7083,20	0,674	-53,6 %
<b>S4 (Mehrweg)</b>	4,77	7083,20	0,674	-53,6 %

Abbildung 4: Intensität der Transportemissionen

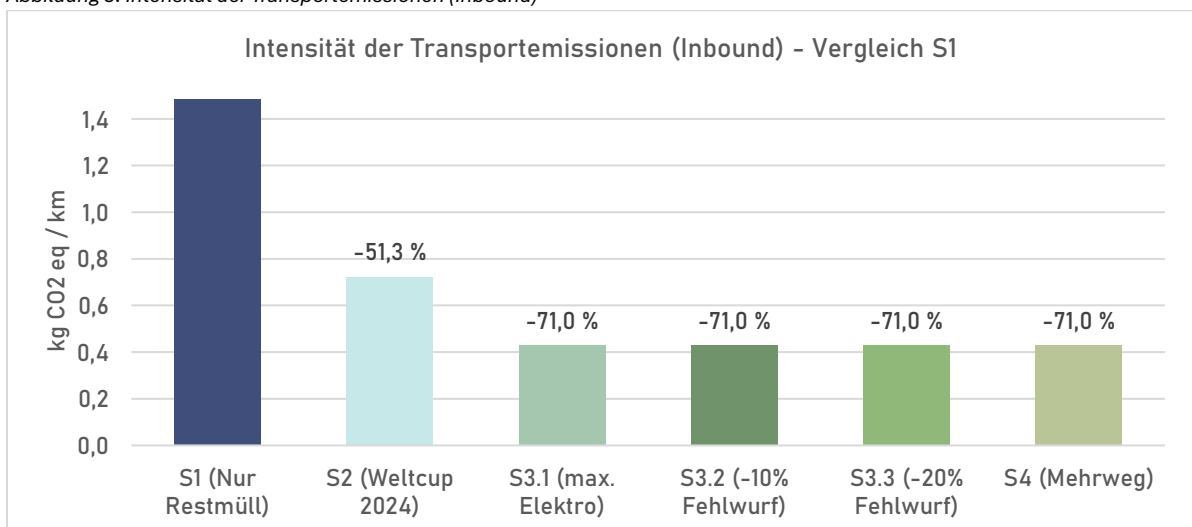


Da der Outbound Transport in allen Szenarien von den Verwertern mit Dieselfahrzeugen durchgeführt wird, lohnt sich zusätzlich ein ausschließlicher Blick auf den Inbound Transport, um die Unterschiede zwischen elektrischem und Dieseltransport eindeutig zu beziffern (siehe Tabelle 10, Abbildung 5). Es kann beobachtet werden, dass die Unterschiede zwischen den Szenarien wachsen, wenn nur der Inbound Transport betrachtet wird. Ein Wechsel auf teilweisen Elektrotransport (S2) reduziert die Inbound Transportemissionen bereits um über 50% im Vergleich zu S1. Bei der primären Nutzung von Elektrofahrzeugen (S3 + S4) kann im Inbound sogar eine Reduktion von 71% im Vergleich zur Nutzung von Dieselfahrzeugen erzielt werden.

Tabelle 10: Emissionen Inbound Transport

Inbound Transport (Inkl. Abbau)				
	t CO2eq	km	kg CO2eq / km	Emissionsreduktion im Vergleich zu S1
<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	5,67	3819,38	1,483	
<b>S2 (Weltcup 2024)</b>	3,73	5170,38	0,722	-51,3 %
<b>S3.1 (max. Elektro)</b>	2,22	5170,38	0,430	-71,0 %
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	2,22	5170,38	0,430	-71,0 %
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	2,22	5170,38	0,430	-71,0 %
<b>S4 (Mehrweg)</b>	2,22	5170,38	0,430	-71,0 %

Abbildung 5: Intensität der Transportemissionen (Inbound)



## 4. Zusammenfassung

Diese Studie erstellte anhand von sechs verschiedenen Szenarien eine quantitative Bewertung der gesamten Treibhausgasemissionen der Abfallsammlung, des Transports und der Abfallverwertung während und nach der FIS Alpine Ski WM 2025 in Saalbach. Es konnte gezeigt werden, dass in allen Szenarien die Gesamtemissionslast negativ ist, bedeutend, dass durch die thermische und materielle Nutzung des Abfalls mehr Emissionen eingespart werden als durch Transport, Aufbereitung und Verwertung entstehen. Das liegt vorwiegend an dem großen Anteil an Aluminium-Leichtverpackungen an der Abfallmenge. Aluminium kann nämlich einerseits auch dann zu 100% recycelt werden, wenn es aufgrund von Fehlwürfen im Restmüll landet. Zum anderen weist Aluminium die mit Abstand höchste Emissionseinsparung pro recycelter Tonne im Vergleich zu anderen Abfallfraktionen auf (Aluminium: -8.140 kg CO<sub>2</sub>eq/t) und kann dadurch auch allenfalls positive Emissionen aus der thermischen Verwertung ausgleichen. Das erklärt zum Teil auch die geringen Unterschiede in der Emissionslast zwischen den Szenarien mit unterschiedlichen Fehlwurfquoten, da Fehlwürfe keinen Einfluss auf die Verwertung des Aluminiums haben. Die anderen relevanten Fraktionen (Plastik, Papier, Glas, Bio) machen nur einen kleinen Teil der gesamten Fehlwürfe im Vergleich zum Aluminium aus. Daher hat ein geringerer Fehlwurfanteil in diesen Fraktionen nur einen kleinen Einfluss auf die Emissionslast.

Dennoch wirkt sich eine Abfalltrennung positiv auf die Emissionsbilanz aus. Die Szenarien mit Abfalltrennung (S2-S3.3) können zwischen 23,70 und 27,11 Tonnen CO<sub>2</sub>eq mehr Emissionen einsparen als das Szenario mit ausschließlicher Sammlung im Restmüll (S1). Das lässt sich durch die deutlich bessere Umweltbilanz des Recyclings und des Biogases im Vergleich zur Abfallverbrennung/RDF für alle Fraktionen erklären. Durch eine Verringerung der Gesamtmenge an Leichtverpackungen, insbesondere durch ein Mehrwegsystem können jedoch die größten Emissionseinsparungen erzielt werden. Aufgrund der starken Abfallreduktion, die Mehrweggetränkebecher bei einer Großveranstaltung erzielen können, werden weniger Emissionen in der Abfallaufbereitung und den Verwertungsprozessen erzeugt. Gleichzeitig werden Emissionen vermieden, da keine Primärproduktion von Leichtverpackungen notwendig ist. Selbst im Vergleich zum Szenario S3.3, dem Einwegsystem mit der geringsten Fehlwurfquote, kann das Mehrwegsystem zusätzliche 35,74 Tonnen CO<sub>2</sub>eq einsparen.

Transport hat im Vergleich zur Verwertung nur einen kleinen Anteil an den gesamt entstandenen Emissionen (zwischen 7,04 und 4,77 Tonnen CO<sub>2</sub>eq). Es konnte aber dennoch gezeigt werden, dass sich die Transportemissionen bereits durch einen verstärkten Fokus auf elektrische Mülltransportfahrzeuge im Inbound stark verringern lassen (-53% pro Kilometer im Vergleich zu 100% Diesel). Durch zusätzliche Nutzung von elektrischen Fahrzeugen im Abbau und Outbound könnten die Transportemissionen weiter reduziert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass, unter den getroffenen Annahmen, eine Kombination aus Mehrwegsystem, Abfalltrennung und elektrischem Abfalltransport, die niedrigsten Nettoemissionen bei der Ski WM erzielt (-182,06 Tonnen CO<sub>2</sub>eq). Das entspricht einer Emissionseinsparung der durchschnittlichen Emissionen von ungefähr 21 Österreichern während eines ganzen Jahres aus all ihren Aktivitäten (Umweltbundesamt 2023). Im Vergleich dazu würde eine Abfallsammlung ausschließlich im Restmüll, mit Einwegsystem und dieselbetriebenen Abfalltransport eine Einsparung der durchschnittlichen Jahresemissionen von ungefähr 14 Österreichern erzielen (-119,22t CO<sub>2</sub>eq). Die erwarteten Umweltwirkungen des Abfallmanagements bei der Ski WM sind dementsprechend im Hinblick auf das einzelne Event signifikant. Bezogen auf alle Aktivitäten in Österreich in einem ganzen Jahr bleiben sie naturgemäß vergleichsweise gering.



## 5. Limitationen

Diese Studie unterliegt Limitationen. Einerseits handelt es sich um eine prädiktive Untersuchung. Alle Daten hinsichtlich Abfallaufkommen, -zusammensetzung, Fehlwurfquoten sowie Transportkilometern beruhen nicht auf den Zahlen der Ski WM selbst, sondern auf Erhebungen beim Ski-Weltcupfinale im März 2024, einer deutlich kleineren Veranstaltung. Daher ist es möglich, dass sich die tatsächlichen Zahlen bei der Ski WM von den für die Berechnungen verwendeten Daten unterscheiden werden. Weiters wurden die Umweltwirkungen erst dann betrachtet, sobald die verwendeten Produkte im Abfall landen. Die Produktions- und Nutzungsphase von beispielsweise Getränkedosen, oder PET-Flaschen sind nicht in der Emissionsbilanz erfasst. Selbiges gilt für die Mehrwegbecher, wo Produktion und Reinigung nicht betrachtet wurden. Auch eine potenzielle Absorption der biogenen Emissionen aus der Verbrennung, durch Biomassenachwuchs und ein damit verringertes Treibhausgaspotenzial der biogenen Emissionen wurde nicht berücksichtigt. Eine Analyse der gesamten Lebensdauer, der bei der Ski WM verwendeten Produkte, könnte die Emissionsbilanz der Szenarien verändern.

Andererseits wurde die Wirkung des Abfallmanagements nur auf Treibhausgasemissionen untersucht. Jedoch wirkt sich Abfall auch auf andere umweltrelevante Indikatoren, wie Humantoxizität, Versauerung und Ressourcenerschöpfung aus. Eine Betrachtung dieser Indikatoren würde ein holistischeres Bild der Umweltwirkungen der Szenarien zeichnen. Hinsichtlich der Emissionsfaktoren bestehen ebenfalls Unsicherheiten. Die Emissionsfaktoren für die Abfallverbrennung basieren teilweise auf internationalen Standardwerten und entsprechen daher nicht zwingend der energetischen Leistung und Emissionsfreisetzung von österreichischen Abfallverbrennungsanlagen.

## Literaturverzeichnis

Aryan, Yash; Kumar, Atul; Subham; Samadder, Sukha Ranjan (2023): Environmental and economic assessment of waste collection and transportation using LCA: A case study. In *Environmental research* 231 (Pt 2), p. 116108. DOI: 10.1016/j.envres.2023.116108.

BMK (2023): Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien.

Brogaard, Line K.; Damgaard, Anders; Jensen, Morten B.; Barlaz, Morton; Christensen, Thomas H. (2014): Evaluation of life cycle inventory data for recycling systems. In *Resources, Conservation and Recycling* 87, pp. 30–45. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.03.011.

Chen, Ying-Chu (2018): Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology. In *Journal of Cleaner Production* 192, pp. 262–269. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.260.

EcoInvent (2023): ecoQuery. Version 3.10. Online verfügbar unter: <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.10/cutoff/search>.

European Commission (2011): Supporting Environmentally Sound Decisions for Waste Management. A technical guide to Life Cycle Thinking (LCT) and Life Cycle Assessment (LCA) for waste experts and LCA practitioners. European Commission; Joint Research Centre; Institute for Environment and Sustainability.

IEA (2024): Austria - Countries & Regions - IEA. IEA. Online verfügbar unter: <https://www.iea.org/countries/austria>, besucht am 7/8/2024.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 5 Waste. Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC (2015): EFDB - Emission Factor Database. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Online verfügbar unter [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/ef\\_detail.php](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/ef_detail.php), besucht am 20/08/2024.

ISO (2006): Environmental management - Life cycle assessment -Principles and framework (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization.

Österreichischer Ski-Verband (2013): Sustainability Report. FIS Alpine Ski WM Schladming 2013.

Paul Scherrer Institut (2023): Mobitool. Version 3.0. Online verfügbar unter <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html>.

Stiftung Sicherheit im Skisport (2011): FIS Alpine Ski-WM 2011 Garmisch-Partenkirchen. Green Legacy Report. Edited by Stiftung Sicherheit im Skisport.

Turner, David A.; Williams, Ian D.; Kemp, Simon (2015): Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. In *Resources, Conservation and Recycling* 105, pp. 186–197. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.10.026.

Umweltbundesamt (2010): Klimarelevanz ausgewählter Recycling-Prozesse in Österreich. Umweltbundesamt. Wien.

Umweltbundesamt (2011): Klimarelevanz und Energieeffizienz der Verwertung biogener Abfälle (KEVBA). Umweltbundesamt. Wien.

Umweltbundesamt (2022): Status Report Waste Incineration. Wien.

Umweltbundesamt (2023): Klimaschutzbericht 2023. Umweltbundesamt. Wien.

van Eygen, Emile (2018): Management of plastic wastes in Austria: analysis of the status quo and environmental improvement potentials. TU Wien.

World Resources Institute (2015): GHG Protocol tool for stationary combustion. Version 4.1.

Zelenika, Ivana; Moreau, Tara; Zhao, Jiaying (2018): Toward zero waste events: Reducing contamination in waste streams with volunteer assistance. In *Waste management (New York, N.Y.)* 76, pp. 39–45. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.03.030.

## Appendix

### Appendix 1: Verursachte und vermiedene Emissionsfaktoren Abfallaufbereitung und -verwertung

<b>Emissionsfaktoren Abfallaufbereitung</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
Splitting/Sortierung	9,97	kg CO2eq/t	Saubermacher Carbon Calculator V1.0
Thermo Team	12,86	kg CO2eq/t	Saubermacher Carbon Calculator V1.0
<b>Emissionsfaktoren Abfallverwertung</b>	<b>Menge</b>	<b>Einheit</b>	<b>Quelle</b>
RDF	1 757,11	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2023
RDF verm. Emissionen	1 543,04	kg CO2eq/t	World Resources Institute (WRI), 2015
Verbrennung Restmüll (Biogene Fraktion)	1 269,74	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen Restmüll (Biogene Fraktion)	778,23	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Verbrennung Restmüll (Fossile Fraktion)	1 011,60	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen Restmüll (Fossile Fraktion)	670,89	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Verbrennung Kunststoff LVP	2 844,60	kg CO2eq/t	IPCC, 2006; WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen Kunststoff LVP	2 196,74	kg CO2eq/t	WRI, 2015; Chen, 2018
Verbrennung Biomüll	562,36	kg CO2eq/t	IPCC, 2006; 2015; WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen Biomüll	229,58	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Verbrennung Papier	1 495,35	kg CO2eq/t	IPCC, 2006; 2015; WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen Papier	812,16	kg CO2eq/t	WRI, 2015; Chen 2018
Verbrennung Glas	0	kg CO2eq/t	IPCC, 2006
Verbrennung verm. Emissionen Glas	0	kg CO2eq/t	IPCC, 2006
Verbrennung, Hilfsbrennstoffe	6,03	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2022
Verbrennung Holz	1 535,95	kg CO2eq/t	IPCC, 2006; 2015; WRI, 2015
Verbrennung verm. Emissionen (Holz)	805,87	kg CO2eq/t	WRI, 2015
Recycling, Altglas	527,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Altglas verm. Emissionen	921,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Altpapier (Karton)	820,00	kg CO2eq/t	Brogaard et al., 2014
Recycling, Altpapier (Karton) verm. Emissionen	1 140,00	kg CO2eq/t	Brogaard et al., 2014
Recycling, Aluminium LVP	1 930,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Aluminium LVP verm. Emissionen	10 070,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Kunststoff LVP	2 677,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Kunststoff LVP verm. Emissionen	3 495,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Altholz (Abbau)	70,22	kg CO2eq/t	EcolInvent, 2023
Recycling, Altholz (Abbau) verm. Emissionen	514,22	kg CO2eq/t	Turner et al., 2015
Recycling, Fe-Metalle (Abbau)	1 876,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Recycling, Fe-Metalle (Abbau) verm. Emissionen	2 370,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2010
Biogas	154,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2011
Biogas verm. Emissionen	285,00	kg CO2eq/t	Umweltbundesamt, 2011
Deponierung	101,2	kg CO2eq /t	IPCC, 2015

Appendix 2: Gesamtemissionen je Material (Verursacht + Vermeidung, exkl. Aufbereitung)

<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	<b>Verursachte Emissionen</b>	<b>Vermeidung</b>	<b>Netto-Emissionen</b>
<b>Material</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>
Restmüll	62,66	-43,45	19,21
Aluminium LVP	35,55	-185,46	-149,92
Kunststoff LVP	0,00	0,00	0,00
Glas	0,00	0,00	0,00
Papier und Karton	0,00	0,00	0,00
Biomüll	0,00	0,00	0,00
Abbau - Sperrmüll	18,21	-15,26	2,95
Abbau - Metalle	0,63	-0,79	-0,16
Abbau - Altholz	0,00	0,00	0,00
<b>S2 + S3.1 (Weltcup 2024)</b>	<b>Verursachte Emissionen</b>	<b>Vermeidung</b>	<b>Netto-Emissionen</b>
<b>Material</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>
Restmüll	32,16	-26,65	5,51
Aluminium LVP	35,55	-185,46	-149,92
Kunststoff LVP	7,48	-8,48	-1,00
Glas	4,31	-7,54	-3,22
Papier und Karton	6,94	-9,65	-2,71
Biomüll	5,35	-7,00	-1,65
Abbau - Sperrmüll	18,21	-15,25	2,95
Abbau - Metalle	0,63	-0,79	-0,16
Abbau - Altholz	0,00	0,00	0,00
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	<b>Verursachte Emissionen</b>	<b>Vermeidung</b>	<b>Netto-Emissionen</b>
<b>Material</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>
Restmüll	31,42	-26,14	5,28
Aluminium LVP	35,55	-185,46	-149,92
Kunststoff LVP	7,99	-9,06	-1,07
Glas	4,33	-7,57	-3,24
Papier und Karton	7,06	-9,82	-2,76
Biomüll	5,35	-7,00	-1,65
Abbau - Sperrmüll	16,50	-14,36	2,14
Abbau - Metalle	0,63	-0,79	-0,16
Abbau - Altholz	0,48	-0,69	-0,21
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	<b>Verursachte Emissionen</b>	<b>Vermeidung</b>	<b>Netto-Emissionen</b>
<b>Material</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>
Restmüll	30,69	-25,63	5,05
Aluminium LVP	35,55	-185,46	-149,92
Kunststoff LVP	8,50	-9,63	-1,14
Glas	4,35	-7,60	-3,25
Papier und Karton	7,18	-9,98	-2,80
Biomüll	5,35	-7,00	-1,65
Abbau - Sperrmüll	16,50	-14,36	2,14
Abbau - Metalle	0,63	-0,79	-0,16
Abbau - Altholz	0,40	-0,63	-0,23
<b>S4 (Mehrweg)</b>	<b>Verursachte Emissionen</b>	<b>Vermeidung</b>	<b>Netto-Emissionen</b>
<b>Material</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>	<b>t CO2eq</b>
Restmüll	28,44	-23,78	4,66
Aluminium LVP	10,66	-55,64	-44,97
Kunststoff LVP	2,25	-2,54	-0,30
Glas	4,31	-7,54	-3,22
Papier und Karton	6,94	-9,65	-2,71
Biomüll	5,35	-7,00	-1,65
Reduktion LVP	0,00	-141,09	-141,09
Abbau - Sperrmüll	16,50	-14,36	2,14
Abbau - Metalle	0,63	-0,79	-0,16
Abbau - Altholz	0,40	-0,63	-0,23

Appendix 3: Anteil fossile/biogene Emissionen Verbrennung/RDF

<b>Verbrennung + RDF</b>	<b>Fossile Emissionen</b>	<b>Biogene Emissionen</b>	<b>Biogener Anteil an Emissionen</b>
	t CO2 eq	t CO2 eq	%
<b>S1 (Nur Restmüll)</b>	40,13	39,85	49,83 %
<b>S2 (Weltcup 2024)</b>	34,68	18,80	35,15 %
<b>S3.1 (max. Elektro)</b>	34,68	18,80	35,15 %
<b>S3.2 (-10% Fehlwurf)</b>	34,32	17,22	33,42 %
<b>S3.3 (-20% Fehlwurf)</b>	33,96	17,02	33,38 %
<b>S4 (Mehrweg)</b>	29,29	17,43	37,31 %

