

Umweltwirkungen der End-of-Life Szenarien von starren PET-Verpackungen in Österreich

Katrin Detter^{1*}, Hanna Schenk^{1*}, Manuel Pfitzner^{1*}, Viktoria Helene Gabriel^{1*}

¹Section Packaging- and Resource Management, FH Campus Wien, University of Applied Sciences, Vienna, Austria

Abstract. Mit dem Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union soll die vorherrschende lineare Wertschöpfung in ein Kreislaufwirtschaftssystem übergeführt werden. Gemäß dem Vorschlag der Verpackungs- und Verpackungsabfallrichtlinie sollen bis 2030 Recyclingquoten von 55 % der Kunststoffverpackungen erreicht werden, die derzeit in Österreich bei 26 % liegen und hauptsächlich durch das Recycling von Polyethylenterephthalat (PET)-Getränkeflaschen bestimmt werden (1). Im Forschungsprojekt "PET2Pack" wurden für die spezifischen Anwendungsfälle PET-Lebensmittelschalen und PET-food- und PET-non-food-Flaschen das Abfallaufkommen im Gelben Sack sowie die Umweltwirkungen der derzeitigen End-of-Life-Szenarien auf der Ebene der Sortier- und Recyclingprozesse untersucht. Dabei soll erhoben werden, welche Umweltwirkungen das werkstoffliche Recycling starrer PET-Verpackungen in geschlossenen Kreisläufen im Vergleich zur Primärproduktion hat.

Hierfür wurden Massenbilanzen und Prozessflussdiagramme entwickelt, die österreichische Sortier- und Recyclinganlagen abbilden. Für die einzelnen Prozesse wurden in Zusammenarbeit mit Anlagenbetreibern Input- und Outputmaterialmassenflüsse, Transferkoeffizienten und Energieverbräuche erhoben bzw. berechnet. Die jeweiligen Treibhauspotenziale (kg CO₂-Äquivalente) und weitere Wirkungskategorien wurden mit der Methode der Ökobilanzierung (ISO 14040/14044; Midpoint; EF 3.1) und mit Hilfe von Szenariotechniken verglichen.

Die quantitative Bewertung des Status Quo und die angepassten End-of-Life-Szenarien ermöglichen den Vergleich der Umweltwirkungen, die mit der Herstellung von sekundärem PET-Granulat für Lebensmittelschalen und non-food-Flaschen vs. primärem Granulat verbunden sind. Dabei wurden die jeweiligen Treibhauspotenziale in kg CO₂-Äquivalente und weiterer Wirkungskategorien berechnet. Die vorläufigen Ergebnisse zeigen, dass recyceltes PET im Vergleich zu Neuware ein Reduktionspotenzial von bis zu 85 % in Bezug auf das Treibhauspotenzial aufweist.

Keywords: Life Cycle Assessment, LCA, Ökobilanz, PET-Recycling, End-of-Life

1 EINLEITUNG

Mit dem Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union soll die vorherrschende lineare Wertschöpfung in ein Kreislaufwirtschaftssystem übergeführt werden. Gemäß dem Vorschlag der Verpackungs- und Verpackungsabfallrichtlinie sollen bis 2030 Recyclingquoten der Kunststoffverpackungen von 55 % erreicht werden, diese liegen derzeit in Österreich bei 26 % und sind hauptsächlich durch das Recycling von Polyethylenterephthalat (PET)-Getränkeflaschen bestimmt (1, 2). Im Branchenprojekt "PET2Pack" wurden Stellschrauben für das werkstoffliche Recycling bzw. die geschlossene Kreislaufführung der spezifischen Kunststoffverpackungs-Anwendungsfälle PET-Lebensmittelschalen (PET food trays) und PET-Nichtgetränkeflaschen (PET non-food bottles) analysiert.

2 ZIEL & UNTERSUCHUNGSRAHMEN

Das Ziel der Analyse der Umweltwirkungen der End-of-Life Szenarien von starren PET Verpackungen war es den ökologischen Nutzen eines stofflichen Recyclings der Zielfractionen (PET food trays & PET non-food bottles) zu evaluieren. Gegenstand dieser Analyse stellte einerseits die Bilanzierung eines Datensatzes für 1 kg rPET-Granulat für PET-Getränkeflaschen, PET food trays und PET non-food-bottles und der Vergleich mit der Primärproduktion von PET dar. Andererseits wurden Szenarien für die End-of-Life-Verwertung der Zielfractionen definiert und miteinander verglichen. Hierbei wurde speziell die offene und geschlossene Kreislaufführung dem Status Quo gegenübergestellt und die jeweiligen Umweltwirkungen bewertet, die mit der Verwertung (stofflich/thermisch) von 1 kg PET-Zielfraktion verbunden sind. Die resultierenden Umwelt- bzw. Reduktionspotentiale wurden evaluiert und interpretiert. Aus dieser Zielsetzung ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Welche Umweltwirkungen ergeben sich für die Produktion von 1 kg rPET Granulat (PET-Getränkeflaschen, PET food trays und PET non-food-bottles) in Österreich und welche Reduktionspotentiale ergeben sich aus dem Vergleich mit der Primärproduktion von PET Granulat?
- Ist die Schließung von Kreisläufen, i.e. offene bzw. geschlossene Kreislaufführung, im End-of-Life Bereich für starre PET-Verpackungen (food trays und non-food bottles) ökologisch vorteilhaft und welche Umweltwirkungen haben diese im Vergleich zum aktuellen Status Quo?

3 METHODEN

Zur Evaluierung der Umweltwirkungen der End-of-Life Verarbeitung sowie der Szenarien der starren PET-Verpackungskörper wurde die Methode der Lebenszyklusanalyse angewandt. Hierbei wurden die Treibhauspotentiale (kg CO₂-Äquivalente) und weitere Wirkungskategorien des Recyclings von PET-Getränkeflaschen im Status Quo, der angepassten Sortier- und Verwertungsverfahren für die PET-Zielfractionen sowie End-of-Life-Szenarien der offenen und geschlossenen Kreislaufführung berechnet und mit Hilfe von Szenariotechniken verglichen. Die Bilanzierung erfolgte nach ISO 14040/14044 (3, 4). Als Methode zur Midpoint-Wirkungsabschätzung wurde der Product Environmental Footprint (PEF) der EU (Version 3.1) in Kombination mit der Circular Footprint Formula des Joint Research Centers für die Allokation von Belastungen / Gutschriften (5). Für die Auswahl von LCI Datensätzen wurde die Datenbank Ecoinvent in der Version 3.10. verwendet (6).

Für die Erhebung der Umweltwirkungen der End-of-Life Szenarien wurde im ersten Schritt die Sortier- und Recyclinginfrastruktur für starre PET-Verpackungskörper (PET food trays, PET beverage bottles, PET non-food bottles) in Österreich analysiert und Massen- und Energiebilanzen ausgewählter Sortier- und Recyclinganlagen für PET-Verpackungen in Österreich erhoben. Dabei wurden relevante Anlagen in Österreich identifiziert und, für die Darstellung der Prozessabläufe auf der Ebene der Sortierung sowie des Recyclings, Primärdaten erhoben und durch Sekundärdaten aus Literatur und Publikationen des Umweltbundesamts Österreich ergänzt (7). Ausgehend von den Prozessen des Recyclings von PET-Getränkeflaschen wurden die Prozesse für die Use Cases (Lebensmittel-Trays und Nicht-Getränkeflaschen) modelliert. Dabei wurden Energie- und Massenbilanzen sowie Transferkoeffizienten berechnet und Durchschnittswerte nach Jahreskapazitäten -bzw. verarbeiteten Mengen der betrachteten österreichischen Sortier- und Verwertungsanlagen gewichtet.

Für die Allokation der Zielfraktionen und Hochrechnung wurden die Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Sortieranalysen in das Modell integriert. Bei den Sortieranalysen wurden Abfallaufkommen im Gelben Sack sowie in der Sortieranlagen-Outputfraktion "PET Misch" der Untersuchungsfraktionen PET food trays und PET non-food bottles erhoben und das Mengenpotential in Österreich berechnet. Für die Berechnungen der Umweltpotentiale und die Hochrechnung dieser in Österreich wurden die Anteile der Zielfraktionen in der Outputfraktion "PET Misch" herangezogen (8). Transportdistanzen wurden auf Basis von Literaturdaten modelliert (9, 10). Energieverbräuche der Sortierprozesse wurden basierend auf den Prozessschritten und anfallenden Outputfraktionen der Anlagen allokiert. Durch den aktuellen Fokus auf Ebene des Recyclings auf PET-Getränkeflaschen wurden die Umweltwirkungen der End-of-Life-Verwertung dieser Fraktion als Basis für die Berechnungen erhoben und Adaptierungen für die Verwertung der Zielfraktionen aus Expert:inneneinschätzungen kombiniert mit Primärdatenerhebung durchgeführt.

4 ERGEBNISSE

4.1 Life Cycle Inventory (LCI): Sachbilanz

Auf der Ebene der **Sortierung** (siehe Abbildung 1) wird das Inputmaterial der Leichtfraktion (in Österreich gesammelt im "gelben Sack" bzw. der "gelben Tonne") zuerst mittels Sacköffner zugänglich gemacht, wobei das Folienmaterial der Sammelsäcke entfernt wird. Anschließend werden z. B. mittels Trommelsiebe kleinere (<50 mm) und größere Fraktionen (> 240 mm) wie Kanister und Folien aussortiert und verwertet sowie Restfraktionen entfernt. Dem Hauptstrom (50 bis 240 mm) folgen Sortierungen im Magnetfeld/elektrischen Feld zur Aussortierung von Nichteisenmetallen und Eisenmetallen und Sortierschritte nach Dichte, Abmessung, Gewicht und Form. Der ballistische Separator wird eingesetzt, um zweidimensionale und flexible Verpackungen von starren dreidimensionalen zwischen Formkörper-Verpackungen sowie nach Abmessung der Verpackungen zu trennen. Mittels Windsichter werden Folien und leichte Verpackungen aus dem Materialstrom aussortiert. Die Anordnung dieser Prozessschritte variiert zwischen Sortieranlagen und wird ggf. durch zusätzliche Prozessschritte ergänzt. Anschließend werden sensorgestützte, optische Sortierverfahren eingesetzt, um z. B. mittels Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR) nach Material (z. B. PET, Polypropylen (PP), High Density Polyethylen (HDPE) usw.) auszusortieren und mittels visueller Spektroskopie (VIS) Zielfraktionen nach Farbe zu erhalten (11). Nach dem Aussortieren von PET-Getränkeflaschen in transparent natur, blau und grün und einer manuellen Nachsortierung dieser Fraktionen wird der verbleibende PET-Verpackungsabfall in der

Outputfraktion "PET Misch" in Ballen zur weiteren Verwertung aufbereitet.

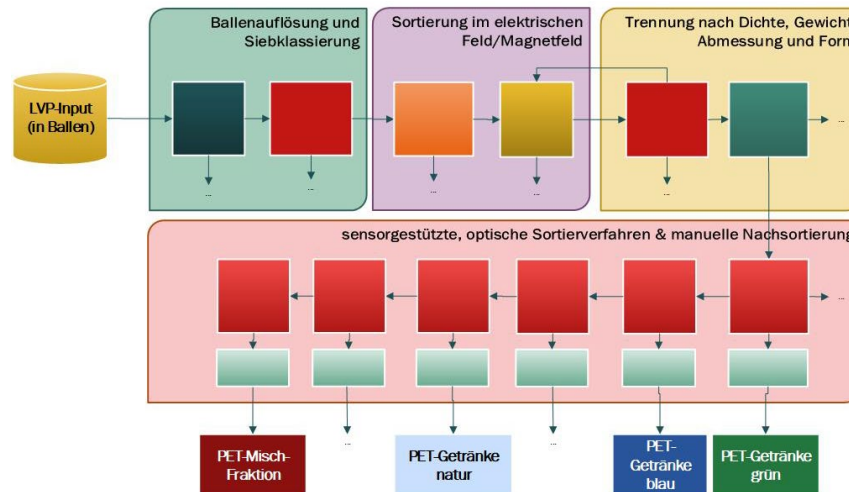


Abbildung 1: PET2Pack – Prozessflüsse Sortierung für PET-Getränkeflaschen und PET-Mix

Auf Basis der erhobenen Transferkoeffizienten liegt das durchschnittliche, gewichtete Inputmaterial für eine PET-Zielfraktion (Getränkeflaschen und PET-Mischfraktion) von 1 t bei 5,9 t Input Leichtfraktion. Gemäß Gabriel et al. (8) sind 43,7 % der PET-Misch-Outputfraktion Zielfraktionen des Forschungsprojektes, wie in Tabelle 1 ersichtlich ist. Die Energieverbräuche wurden basierend auf den Prozessschritten und anfallenden Zielfraktionen allokiert. Diese können neben der PET-Mischfraktion und der PET-Getränkefraktionen je nach Sortieranlagekonzeption unter anderem die Zielfraktionen PP, HDPE, Polystyrol (PS), Kanister, Kübel, Folien, Holz, Getränkeverbundkartons, Nichteisenmetalle und Eisenmetalle enthalten. Der Energieverbrauch des Sortierprozesses für die Zielfraktionen PET-Flaschen bzw. PET-Trays beträgt durchschnittlich 68,7 kWh/t sortierte Outputfraktion.

Tabelle 1: Zusammensetzung der sortierten PET Mischfraktion (8)

Zusammensetzung der sortierten PET-Misch-Fraktion [Gabriel et al. 2023]	
PET beverage bottles	11,4 %
PET bottles food	23,7 %
PET bottles non-food	28,7 %
PET trays food mono	15,0 %
PET trays food multi	12,0 %
PET trays non-food mono	2,0 %
PET others	1,0 %
Störstoffe, Nicht-PET	6,2 %

Auf der Ebene des **Recyclings** (siehe Abbildung 2) wird das sortierte Ballenmaterial der Sortieranlage zugeführt. Nach der Ballenauflösung erfolgt eine Vorsortierung, wobei verbliebene Fremdmaterialien, Fremdfarben und Störstoffe aussortiert werden. Je nach Anlagenkonfiguration wird dies z. B. mittels Siebklassierung, Sortieren im Magnetfeld/elektrischen Feld, ballistischen Separatoren, sensorgestützten optischen Sortierverfahren und manueller Sortierung umgesetzt. Anschließend folgt das Mahlen der Fraktion, meist verbunden mit einer Vorwäsche, wobei die Zerkleinerungsprozesse bei diesen Fraktionen generell unter Zugabe von Wasser stattfinden (11). Danach folgt ein Heißwaschverfahren unter Zufuhr von Natronlauge und ggf. weiteren Chemikalienzusätzen, wobei Kontaminationen des Inputmaterials wie Schmutz, Klebstoffe,

Etiketten usw. entfernt werden. Im Anschluss kann auch noch eine Dichtentrennung mittels Schwimm-Sink-Verfahren und Windsichter erfolgen. Bei einer weiteren Nachsortierung werden nochmals Fremdpolymere, Metalle, Fremdfarben und weitere Störstoffe aussortiert. Abschließend erfolgt die Regranulierung mittels Schmelzprozessen, welche dann für die geschlossene Kreislaufführung wieder zur Herstellung von Verpackungen eingesetzt werden können. Bei den betrachteten Anlagen wurden die Prozessschritte der Dekontamination, Extrusion, Filterung, Kristallisation, Polykondensation sowie Granulierung und Kühlung analysiert. Bei gültigem Zulassungsantrag und der Einhaltung der Verfahrenskriterien der European Food Safety Authority (EFSA) kann durch diesen Prozess aus Lebensmittelkontaktmaterial wieder Lebensmittelkontaktmaterial hergestellt werden (11).

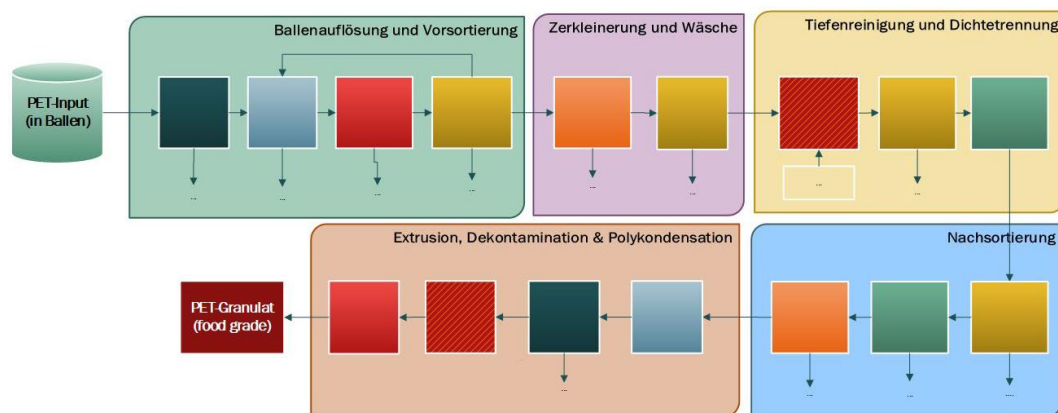


Abbildung 2: PET2Pack – Prozessflüsse Recycling für PET-Getränkeflaschen und PET-Mix

Im Durchschnitt werden im gesamten Prozess der Ebene Recyclinganlage 36,5% des PET-Flaschen und 39,8% des PET-Tray Inputmaterials abgetrennt. Demzufolge ist für 1 kg PET-Regranulat 1,57 kg PET-Flaschen-Inputmaterial bzw. 1,66 kg PET-Tray-Inputmaterial erforderlich. Der durchschnittliche Stromverbrauch der Recyclingebene beträgt bei PET-Nicht-Lebensmittelflaschen rund 857 kWh und bei PET-Lebensmittel-Trays rund 804 kWh je Tonne Regranulat. Zusätzlich werden rund 20 kWh Erdgas, 15 kWh Diesel und 0,8 m³ Wasser verbraucht. Dazu werden durchschnittlich rund 5 l Hilfsstoffe (Natronlauge, Schwefelsäure, Waschkraftverstärker und Entschäumer) und rund 112 kg Stickstoff (SSP) benötigt.

Die Bilanzierung erfolgte unter Anwendung eines Österreichischen Strommixes (Referenzjahr: 2020). Infrastruktur wie Anlagen und Maschinen wurden in der Bilanzierung nicht berücksichtigt und liegen im Cut-Off.

4.2 Life Cycle Impact Assessment (LCIA) - Wirkungsabschätzung

Die Umweltwirkungen der Sortier- und Recyclingprozesse bis hin zum fertigen rPET-Granulat wurden für PET-Getränkeflaschen sowie für PET food trays und non-food bottles (PET-Mix) berechnet. Ein Vergleich der Umweltwirkungen für die rPET-Granulate (PET-Getränkeflaschen und PET-Mix) und primäres PET (vPET) je Wirkungskategorie ist in Abbildung 3 dargestellt. Die rPET-Granulate weisen in allen betrachteten Wirkungskategorien wesentlich geringere Umweltwirkungen auf als das vPET-Granulat. Zum Beispiel ergeben sich in der Klimawirkung Reduktionspotentiale der rPET-Granulate von bis zu -85% (rund 0,5 kg CO₂eq. der rPET-Granulate vs. 3,3 kg CO₂eq. des vPET-Granulats).

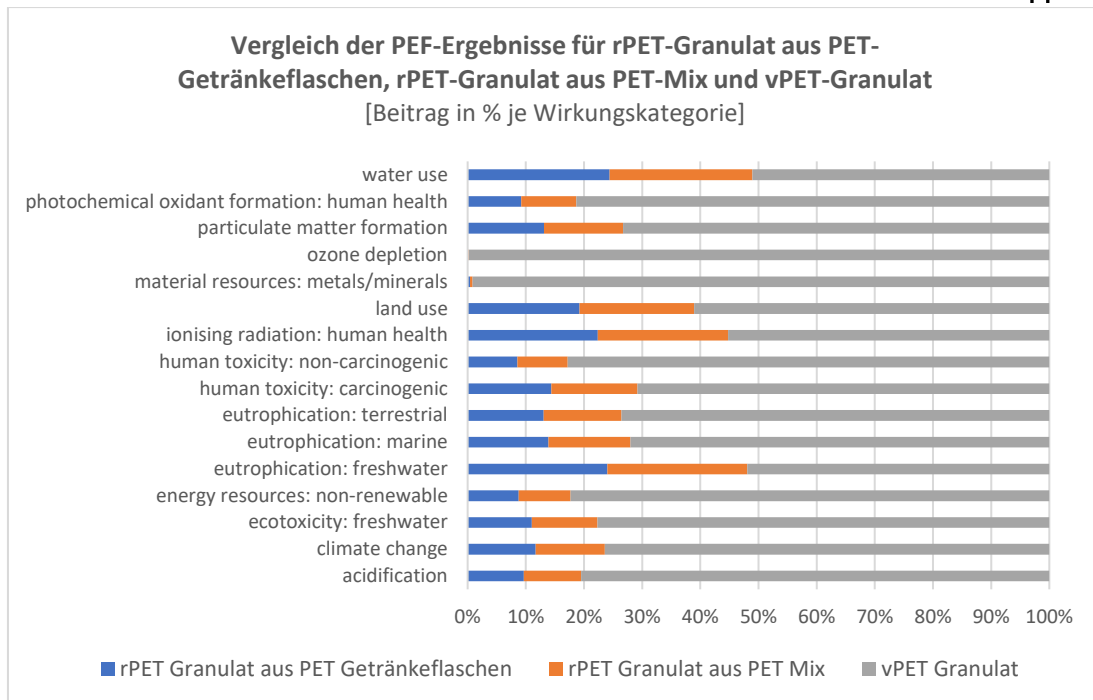


Abbildung 3: Vergleich der Environmental Footprint Ergebnisse für rPET-Granulat aus PET-Getränkeflaschen, rPET-Granulat aus PET-Mix und vPET-Granulat.

Die Analyse des End-of-Life wurde für vier verschiedene Szenarien durchgeführt:

- **Status Quo 1 (SQ 1)** – 15% thermische Verwertung (kommunale Müllverbrennung mit Energierückgewinnung) und 85% Downcycling (non-food grade)
- **Status Quo 2 (SQ 2)** – 90% thermische Verwertung (s. o.) und 10% PET-Getränkeflaschenrecycling
- **Offene Kreislaufführung** – 9,8% PET-Getränkeflaschenrecycling, 80,1% Downcycling (non-food-Grade) und 10,1% thermische Verwertung (s. o.)
- **Geschlossene Kreislaufführung** – 9,8% PET-Getränkeflaschenrecycling, 33,5% Downcycling (non-food grade), 56,7% food-grade Recycling und 10,1 % thermische Verwertung (s. o.)

Die Quantifizierung der End-of-Life Szenarien zeigt, dass beide Kreislaufführungsszenarien eine Reduktion der Klimawirkungen bedeuten (offene Kreislaufführung im Vergleich zu SQ 1 von -18% und im Vergleich zu SQ 2 -165%; geschlossene Kreislaufführung im Vergleich zu SQ 1 von -56% und im Vergleich zu SQ 2 -186%).

5 CONCLUSIO

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung der End-of-Life Szenarien im Projekt PET2Pack heben klar hervor, dass sowohl eine geschlossene als auch eine offene Kreislaufführung in der österreichischen Sortier- und Recyclinginfrastruktur aus ökologischer Sicht als positiv zu bewerten ist. Zudem zeigt die Quantifizierung der Klimawirkungen von rPET-Granulat für PET-Getränkeflaschen, PET-Nicht-Getränkeflaschen und PET-Lebensmittelschalen, dass der Einsatz von Rezyklat, welches unter den beschriebenen Bedingungen produziert wird, zu erheblichen Einsparungen der Treibhausgasemissionen von bis zu 85% führen kann.

6 REFERENZEN

1. Neubauer C, Bernhardt A, Brandstätter C, Broneder C, Kral U, Oliva J et al. Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich - Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021. Wien; 2023 [Stand: 25.04.2024].
2. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on packaging and packaging waste, amending Regulation (EU) 2019/1020 and Directive (EU) 2019/904, and repealing Directive 94/62/EC: PPWR; 2022 [Stand: 30.04.2024]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0677>.
3. ISO 14040: Environmental management -- Life cycle assessment -- Principles and framework.; 2006.
4. ISO 14044: Environmental management -- Life cycle assessment -- Requirements and guidelines.; 2006.
5. European Commission. Product Environmental Footprint Category Rules Guidance (PEFCRs), Version 6.3, Annex C - List of default values for A, R1, R2, R3 and Qs/Qp: European Commission Brussels, Belgium; 2020. Verfügbar unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/Annex_C_V2.1_May2020.xlsx.
6. Ecoinvent. Datenbank Version 3.10: Swiss Centre for Life Cycle Inventories; 2023. Verfügbar unter: <https://ecoinvent.org/>.
7. Neubauer C, Stoifl B, Tesar M, Thaler P. Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich. Anhang. Wien; 2020.
8. Gabriel VH, Schaffernak A, Pfitzner M, Fellner J, Tacker M, Apprich S. Rigid Polyethylene Terephthalate Packaging Waste: An Investigation of Waste Composition and Its Recycling Potential in Austria. Resources 2023; 12(11):128. doi: 10.3390/resources12110128.
9. Allesch A, Färber B, Getzner M, Grüblinger G, Huber-Humer M, Jandric A et al. Benchmarking für die österreichische Abfallwirtschaft [Benchmarking for the Austrian waste management system]. Vienna, Austria: TU Wien -Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft; 2015 [Stand: 02.05.2024]. Verfügbar unter: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_247861.pdf.
10. van Eygen E. Bewirtschaftung von Kunststoffabfällen in Österreich: Analyse des Ist-Zustandes und Ermittlung von Optimierungspotentiale aus ökologischer Sicht [Dissertation]. Wien: Technischen Universität Wien; 2018.
11. Neubauer C, Stoifl B, Tesar M, Thaler P. Sortierung und Recycling von Kunststoffabfällen in Österreich: Status 2019. Wien; 2021.